

REBAIXAMENTO PERMANENTE DO NÍVEL DA ÁGUA EM ESCAVAÇÕES: ESTUDO ECONÓMICO

JOÃO DE ABREU MAGALHÃES TEIXEIRA

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM GEOTECNIA

Professor Doutor António Manuel Barbot Campos e Matos

Professor Doutor Paulo Miguel Cunha Matos Lopes Pinto

JULHO DE 2015

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2014/2015

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2012/2013 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2013.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Aos meus Pais, pelo enorme apoio e paciência.

The known is finite, the unknown infinite; intellectually we stand on an islet in the midst of an illimitable ocean of inexplicability. Our business in every generation is to reclaim a little more land.

Thomas Henry Huxley

AGRADECIMENTOS

Ao professor António Campos e Matos, pelo acompanhamento prestado ao longo deste trabalho.

Ao professor José Couto Marques e ao engenheiro Paulo Pinto, pelo apoio prestado e pela completa disponibilidade e entrega na prestação desse apoio.

À Joana, pelo apoio incondicional ao longo dos últimos anos e por ser a pessoa que mais acredita em mim.

Aos meus pais. Aos meus irmãos. À minha família. Aos meus amigos. Ao 7°F.

RESUMO

De todas as áreas de especialização no âmbito da Engenharia Civil, a área de Geotecnia é talvez aquela que tem na experiência profissional o maior peso, devido essencialmente à variabilidade intrínseca das características dos solos. Como em outras áreas da Engenharia Civil, um projeto geotécnico admite normalmente várias soluções possíveis.

Este trabalho teve por objetivo fazer a comparação entre soluções de impermeabilização/drenagem passíveis de ser adotadas num projeto de escavação e contenção periférica de um parque de estacionamento subterrâneo. As soluções exploradas seguiram uma solução base idêntica, variando no que toca à opção pela impermeabilização total da solução final ou por uma solução com bombagem do caudal infiltrado.

O trabalho contempla a modelação das várias soluções no programa de elementos finitos SEEP/W.

As soluções que contemplam bombagem implicarão, à partida, um investimento inicial mais baixo do que as soluções com impermeabilização total da estrutura. Entende-se, no entanto, que os custos futuros decorrentes da exploração das soluções impermeáveis será bastante inferior.

Numa altura em que a sustentabilidade financeira está na ordem do dia, este trabalho propôs-se a realizar uma Análise Custo Ciclo de Vida que permitisse comparar quais são os custos totais envolvidos em cada solução e qual a que sairá mais barata tendo em conta toda a sua vida útil.

PALAVRAS-CHAVE: Rebaixamento do nível freático, SEEP/W 2D, Análise Custo Ciclo de Vida, Escavações, Geotecnia.

ABSTRACT

Within the many areas involved in Civil Engineering, Geotechnics is probably the one in which professional experience is most relevant. This is essentially due to the intrinsic variability of soil characteristics. Like in other areas within Civil Engineering, a geotechnical project usually admits several possible solutions.

The main goal of the work herein presented is to compare several solutions regarded as suited to be employed in the permanent dewatering or permanent groundwater exclusion in an excavation and peripheral containment project for an underground parking lot. All the solutions compared follow the same basic structural options, varying only in the way each deals with the water present in the soil. On one side there are solutions that contemplate continuous pumping of the water that infiltrates through the bottom of the structure, while on the other there are solutions which opt for getting the whole structure waterproofed, not letting any water in.

Most of the solutions in the work herein were analyzed using the finite element software SEEP/W.

The solutions based on continuous water pumping are expected to imply lower initial investment than the solutions in which total waterproofing is adopted. However, when future costs are taken into account, these former solutions will most likely prove to be more costly.

In a time when sustainability is in paramount, this work proposes to run an economical analysis based on the Life Cycle Cost Analysis procedure, to try and determine which solution will come cheaper when the costs involved throughout their whole lifespan are considered.

KEY-WORDS: Groundwater Lowering, SEEP/W 2D, Life Cycle Cost Analysis, Excavations, Geotechnics.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.2. OBRA EM ESTUDO	1
1.2.1. TIPOLOGIA.....	1
1.2.2. GEOLOGIA DO LOCAL	2
1.2.3. SOLUÇÃO CONSTRUTIVA ADOTADA	2
1.3. OBJETIVOS E METODOLOGIA	2
2. SISTEMAS PERMANENTES DE CONTROLO DA ÁGUA NO SOLO EM ESCAVAÇÕES	5
2.1. INTRODUÇÃO	5
2.2. ABORDAGENS POSSÍVEIS	6
2.2.1. MEDIDAS DE BOMBAGEM.....	6
2.2.2. MEDIDAS DE EXCLUSÃO	10
2.2.2.1. Medidas de exclusão assentes na instalação de barreiras físicas	10
2.2.2.2. Medidas de exclusão assentes no tratamento do solo com vista à diminuição da sua permeabilidade	13
2.3. SISTEMAS PERMANENTES DE CONTROLO	13
2.4. SOLUÇÕES COMPARADAS NO ÂMBITO DESTE TRABALHO	15
2.4.1. SOLUÇÕES PERMEÁVEIS	15
2.4.2. SOLUÇÕES IMPERMEÁVEIS	15
3. MODELAÇÃO NUMÉRICA E DIMENSIONAMENTO	17
3.1. INTRODUÇÃO À MODELAÇÃO NUMÉRICA	17
3.2. MODELAÇÃO NUMÉRICA UTILIZANDO PROGRAMAS INFORMÁTICOS	17
3.3. MODELAÇÃO EM PROGRAMA DE ELEMENTOS FINITOS SEEP/W	18
3.3.1. INTRODUÇÃO.....	18

3.3.1.1. <i>Steady-state vs Transient</i>	18
3.3.1.2. Visão especial da análise	19
3.3.1.3. Condições de fronteira aplicáveis aos modelos.....	20
3.3.1.4. Modelos relativos aos materiais.....	21
3.3.2. MODELAÇÃO DO PROBLEMA EM ESTUDO.....	22
3.3.2.1. Opções base.....	22
3.3.2.2. Hipóteses simplificativas relativamente à geometria em planta da escavação.....	23
3.3.2.3. Hipóteses simplificativas relativamente às paredes moldadas.....	24
3.3.2.4. Hipóteses simplificativas relativamente à estratigrafia do modelo e à geometria do local.....	24
3.3.2.5. Modelos adotados.....	25
3.4. RESULTADOS E DIMENSIONAMENTO DE SOLUÇÕES	28
3.4.1. SEGURANÇA AO LEVANTAMENTO HIDRÁULICO	28
3.4.1.1. Final da escavação	28
3.4.1.2. Final da construção	29
3.4.2. SOLUÇÕES PERMEÁVEIS.....	30
3.4.2.1. Introdução.....	30
3.4.2.2. Bombagem a partir dos pisos -4,-3 ou -2.....	30
3.4.3. SOLUÇÕES IMPERMEÁVEIS.....	31
3.4.3.1. Laje espessa.....	32
3.4.3.2. Malha de ancoragens.....	32
4. ANÁLISE CUSTO CICLO DE VIDA	33
4.1. INTRODUÇÃO	33
4.2. METODOLOGIA	34
4.2.1. PREPARAÇÃO DA ANÁLISE.....	34
4.2.1.1. Definição do projeto e objetivos.....	34
4.2.1.2. Definição das soluções a comparar	34
4.2.1.3. Organização dos custos	34
4.2.1.4. Estabelecimento do período de estudo e data de início de utilização	35
4.2.1.5. Definição dos parâmetros da análise – o valor temporal do dinheiro	35
4.2.2. PASSOS PARA A REALIZAÇÃO DA ACCV	40
4.3. ACCV EM SISTEMAS DE BOMBAGEM	41

4.3.1. NOTA INTRODUTÓRIA	41
4.3.2. PARÂMETROS DA ACCV EM SISTEMAS DE BOMBAGEM	42
4.4. ACCV DAS VÁRIAS SOLUÇÕES	47
4.4.1. OPÇÕES ADOTADAS	47
4.4.2. RESULTADOS DAS ACCV	48
4.4.3. ANÁLISES DE SENSIBILIDADE	49
4.4.3.1. Sensibilidade à variação da taxa de inflação.....	50
4.4.3.2. Sensibilidade à alteração da taxa de variação do preço da eletricidade	52
5. CONCLUSÕES.....	55
5.1. CONCLUSÕES GERAIS	55
5.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	56
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57
ANEXOS.....	59

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig.1 – Modelo volumétrico da escavação.....	1
Fig. 2 – Dois sistemas possíveis de poços verticais.....	7
Fig. 3 – Sistema de poços horizontais.....	7
Fig. 4 – Sistema de poços profundos	8
Fig. 5 – Poços de alívio de pressão associados à utilização de medidas de exclusão.....	8
Fig. 6 – Exemplo de um poço coletor	9
Fig. 7 – Medidas de rebaixamento a utilizar de acordo com a altura de rebaixamento e a permeabilidade dos solos.....	10
Fig. 8 – Ilustração do processo construtivo de cortinas de estacas-prancha	11
Fig. 9 – Ilustração do processo construtivo de paredes de membranas de grout.....	11
Fig. 10 – Vista em planta da instalação de cortinas de estacas	12
Fig. 11 – Ilustração do processo construtivo de uma parede de lamas	12
Fig. 12 – Ilustração do processo construtivo de paredes moldadas	13
Fig. 13 – Sistema de rebaixamento do nível freático.....	14
Fig. 14 – Ilustração de uma secção-tipo axissimétrica	19
Fig. 15 – Ilustração de uma secção-tipo 2D.....	20
Fig. 16 – Funções-tipo da quantidade de água no solo para diferentes tipos de solo	21
Fig. 17 – Curva de variação da permeabilidade para um solo arenoso muito fino	21
Fig. 18 – Planta simplificada para o modelo axissimétrico	23
Fig. 19 – Planta simplificada da escavação para o modelo 2D.....	23
Fig. 20 – Simplificações relativas à geometria do problema adotadas no modelo em questão	24
Fig. 21 – Modelo 2D – secção com 39,5 m de largura e paredes moldadas às cotas -20 m e -13 m, com indicação das condições de fronteira aplicadas de acordo com o código de cores da figura 22..	26
Fig. 22 – Índice do código de cores das condições de fronteira aplicado na figura 21	26
Fig. 23 – Modelo 2D – secção com 62,6 m de largura e paredes moldadas às cotas -13 m e -16 m ..	24
Fig. 24 – Modelo axissimétrico – Secção com raio 28 m e paredes moldadas à profundida 15,4 m ...	27
Fig. 25 - Planta justificativa do terceiro modelo: misto 2D e axissimétrico	28
Fig. 26 – Taxas de juro associadas às OTs portuguesas e às <i>bunds</i> alemãs, ambas com maturidade 10 anos.....	37
Fig. 27 – Média dos <i>yields</i> a 10 anos de todos os países da zona euro	37
Fig. 28 – Média dos <i>yields</i> a 10 anos dos países da zona euro com rating AAA	38
Fig. 29 – Média dos <i>yields</i> a 30 anos de todos os países da zona euro	38

Fig. 30 – Média dos <i>yields</i> a 30 anos dos países da zona euro com rating AAA	39
Fig. 31 – Diagrama ilustrativo da coincidência entre a data base (<i>base date</i>) e a data de início da utilização (<i>service date</i>).....	40
Fig. 32 – Custos típicos durante o ciclo de vida de uma bomba industrial de dimensão média.....	41
Fig. 33 – Custos do ciclo de vida das várias soluções analisadas	49
Fig. 34 – Custos iniciais vs. custos operacionais das várias soluções analisadas	49
Fig. 35 – Custos de investimento, em milhões de euros, para as várias soluções considerando valores para taxa de inflação iguais a 0%, 2% e 4%	50
Fig. 36 – Custos operacionais, em milhões de euros, para as várias soluções considerando valores para a taxa de inflação iguais a 0%, 2% e 4%	51
Fig. 37 – Custos do ciclo de vida, em milhões de euros, para as várias soluções considerando valores para a taxa de inflação iguais a 0%, 2% e 4%	51
Fig. 38 - Custos operacionais, em milhões de euros, para as várias soluções considerando valores para a taxa de variação do preço da eletricidade iguais a 0,5%, 2,5% e 4,5%	52
Fig. 39 - Custos de ciclo de vida, em milhões de euros, para as várias soluções considerando valores para a taxa de variação do preço da eletricidade iguais a 0,5%, 2,5% e 4,5%	53

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 – Valores de caudal diário, de pressão aplicada na base da construção e da quantidade de aço presente nas lajes de fundo para a bombagem a partir dos vários pisos	31
Quadro 2 – Bombas e correspondentes gastos energéticos resultantes do dimensionamento.....	32
Quadro 3 – Índice das várias soluções analisadas	48
Quadro 4 – Valores atuais dos custos iniciais e operacionais ao longo de todo o ciclo de vida do parque	48

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

- Aplanta - área de implantação do parque [m²]
c - custo [€]
dlaje - espessura da laje [m]
djet - espessura da camada de jet grouting [m]
e - taxa de variação do preço da eletricidade [%]
Fanc - Força realizada pelas ancoragens [kN]
Fstb - forças estabilizantes [kN]
Fdst - forças desestabilizantes [kN]
g - aceleração da gravidade [m²/s]
H - altura manométrica [m]
i - taxa de inflação [%]
j - taxa de juro [%]
k - coeficiente de permeabilidade [m/s]
l - largura [m]
P - potência da bomba [kW]
Pestrutura - peso total da estrutura [kN]
Q - caudal [m³/s]
r - raio [m]
r - taxa de atualização [%]
t - tempo [anos]
u - pressão neutra [kPa]
 γ_{BA} - peso volúmico do betão armado [kN/m³]
 $\gamma_{sat,jet}$ - peso volúmico saturado do jet grouting [kN/m³]
 η_b - rendimento da bomba [%]
 η_m - rendimento do motor [%]
 σ' - tensão efetiva [kPa]
 σ - tensão total [kPa]
Cdescom. - custo de descomissionamento [€]
Cenerg. - custos energéticos [€]
Cinst - custo de instalação [€]
Cinv.inicial - custo de investimento inicial [€]

Cmanut. - custo de manutenção [€]

Coper. - custo de operação [€]

Cparag. - custo de paragem [€]

ACCV – Análise Custo Ciclo de Vida

ACV – Análise Ciclo de Vida

ANACOM – Autoridade Nacional das Comunicações

BCE – Banco Central Europeu

EMEL – Empresa Municipal de Mobilidade e Estacionamento de Lisboa, E.M. S.A.

ERSE – Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos

E.U.A. – Estados Unidos da América

FS – Fator de Segurança

GEG – Gabinete de Estruturas e Geotecnia, Lda.

IAR – Inflation Adjusted Return

INE – Instituto Nacional de Estatística

LCA – Life Cycle Analysis

LCCA – Life Cycle Costing Analysis

MTBF – Mean Time Between Failures

NIST – National Institute of Standards and Technology

OMR – Operação, Manutenção e Reparação

O&M – Operação e Manutenção

OT – Obrigação do Tesouro

PIB - Produto Interno Bruto

S.A. – Sociedade Anónima

SPT – Standard Penetration Test

VA – Valor Atual

1

INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O rebaixamento do nível freático associado à construção é um tema extremamente abrangente e de grande importância. Este trabalho vai incidir sobre uma pequena parte desse tema, prendendo-se com a comparação do ponto de vista económico de soluções construtivas passíveis de serem adotadas na execução de um edifício enterrado, distintas entre si no modo como abordam o problema da água no solo e sua interação com a estrutura.

O edifício que inspira a análise é um edifício real mas, sendo este um trabalho académico, serve apenas de base para a construção do modelo no qual este se baseia.

O autor deste trabalho conhece somente em traços gerais a solução adotada no caso real. Deste modo, todas as soluções aqui comparadas são soluções com base nos modelos aqui apresentados, modelos esses que apresentam traços comuns aos modelos adotados pela empresa projetista aquando da definição da solução real adotada. Embora esses pontos em comum existam, as diferenças entre os modelos utilizados e as opções tomadas pelo autor deste trabalho e pelo projetista do edifício em causa levarão, à partida, a soluções diferentes da solução real adotada.

1.2. OBRA EM ESTUDO

1.2.1 TIPOLOGIA

O edifício em análise no presente trabalho é um parque de estacionamento subterrâneo, localizado no Largo 1º de Maio, em frente à Câmara Municipal de Portimão, com 325 lugares de estacionamento. O parque tem quatro pisos enterrados, com cerca de 2470 m² por piso. O piso -4 encontra-se à cota -9,50 m e o topo do edifício, no final da construção, encontra-se à cota +2,55 m.

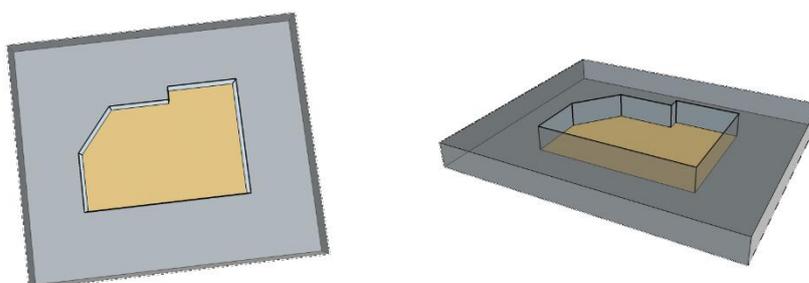


Figura 1 - Modelo volumétrico da escavação.

1.2.2 GEOLOGIA DO LOCAL

Os vários ensaios de caracterização geotécnica realizados no local (SPT, Lefranc e pressiométricos) permitiram identificar uma geologia típica de um meio sedimentar. À superfície observa-se uma zona de aterro (referente ao aterro daquela zona, inicialmente lodosa, no século XIX) seguido por um estrato de solos de origem aluvionar, essencialmente areias finas, um estrato referente ao período Mio-Pliocénico, constituído principalmente por argilas arenosas, e um estrato de calcarenito do período Miocénico. A permeabilidade tende a aumentar com a profundidade, sendo o valor máximo observado referente ao estrato do Miocénico. O nível freático está próximo da superfície, sendo muito influenciado pela proximidade do rio Arade. Os perfis geológicos elaborados pela empresa GEG – Gabinete de Estruturas e Geotecnia, Lda a partir dos ensaios de caracterização geotécnica encontram-se em anexo no final deste trabalho.

1.2.3 SOLUÇÃO CONSTRUTIVA ADOTADA

A solução construtiva geral passou pela execução de paredes moldadas com 0,45 m de espessura ao longo de todo o perímetro da escavação, a atingir profundidades variáveis, entre as cotas -12,20 m e -21,70 m. A opção por paredes moldadas nesta situação tem a ver com o facto de estas permitirem criar uma barreira, necessária, à entrada da água, apresentando ao mesmo tempo uma capacidade resistente que permite a sua consideração como parte integrante da solução estrutural final. Seguiu-se a execução de uma camada de *jet-grout* com 2,0 m de espessura à profundidade máxima prevista da escavação, 10,20 m, camada essa que serve de contraventamento às paredes moldadas.

À medida que a escavação avançou foram executados sucessivamente três níveis de ancoragens temporários que visaram limitar o movimento da parede para o interior da escavação sob o impulso do solo aplicado nas mesmas, ancoragens essas que foram sendo desativadas à medida que as lajes de cada piso foram construídas, passando estas a funcionar como elementos de contraventamento definitivos.

Foi necessária a instalação de capacidade de bombagem durante toda a escavação e construção, mantendo-se, para a solução adotada, a necessidade da mesma durante a fase de exploração do parque.

1.3. OBJETIVOS E METODOLOGIA

Esta dissertação tem por objetivo a comparação de soluções alternativas referentes à impermeabilização ou não do parque subterrâneo supracitado. Esta comparação vai ter o seu enfoque sobre todos os custos económicos envolvidos em cada solução, com base numa Análise Custo Ciclo de Vida (ACCV).

O ponto de partida foi a definição das várias soluções a estudar, seguido da criação de um modelo simplificado da obra em estudo. Nos casos em que a solução adotada é estanque, o problema é hidrostático, sendo de análise simples. Nos casos em que a solução não é estanque, é estabelecido um escoamento para dentro da escavação, tendo sido realizada uma análise do problema utilizando o *software* de elementos finitos de análise de percolação SEEP/W.

Após a análise dos resultados obtidos procedeu-se ao dimensionamento de cada uma das soluções. Nas soluções que contemplam bombagem, foram dimensionados os sistemas elevatórios e as lajes de fundo considerando diferentes cotas de bombagem, correspondentes às cotas dos pisos -4, -3 e -2; nas soluções impermeáveis foram dimensionadas as lajes de fundo e, numa solução em particular, uma malha de ancoragens, de modo a impedir o levantamento da estrutura, como será visto mais à frente.

Numa fase posterior foi aplicado o conceito de Análise Custo Ciclo de Vida e fez-se a comparação dos custos envolvidos nas várias soluções para um tempo de vida útil de 50 anos.

2

**SISTEMAS PERMANENTES DE
CONTROLO DA ÁGUA NO SOLO EM
ESCAVAÇÕES****2.1. INTRODUÇÃO**

O controlo da água no solo assume particular importância no contexto das escavações. Para alguém não ciente dos aspetos hidrogeológicos envolvidos, a primeira grande consequência do não controlo da água numa escavação recai sobre a falta de condições de trabalhabilidade do local de obra e a eventual inundação da mesma. No entanto, as consequências da presença de água no solo vão muito além das condições de trabalhabilidade, influenciando fortemente a estabilidade dos solos envolvidos e o dimensionamento das estruturas a edificar.

Para se entender estes dois últimos aspetos, o conceito de tensão efetiva tem de ser apresentado. Este conceito foi introduzido por Karl von Terzaghi em 1925 [1] e é hoje um dos dogmas da mecânica dos solos. O conceito da tensão efetiva estabelece que, num solo saturado com água, a tensão efetiva é igual à tensão total aplicada no solo subtraída da pressão aplicada na água dos poros (equação 1.1). Assim, a tensão efetiva representa a parcela da tensão total instalada no esqueleto sólido do solo.

$$\sigma' = \sigma - u \quad (1.1)$$

Deste modo, a presença de água no solo leva a uma diminuição da tensão efetiva aplicada no solo. Esta diminuição corresponde a uma diminuição das forças instaladas nos contactos entre as partículas de um solo, levando a que um escorregamento entre estas mobilize menos atrito resistente do que se as forças instaladas fossem superiores [2], levando a uma fragilização do solo quando comparado com um solo idêntico sem que haja presença de água.

Além do que foi acima referido, a simples presença de água num solo representa um acréscimo muito significativo de peso a considerar no dimensionamento de uma possível estrutura de contenção do mesmo, levando a soluções potencialmente mais robustas e dispendiosas.

Não só a simples presença de água no solo diminui a sua resistência, também o seu movimento no solo influencia a estabilidade através de mecanismos distintos. Um dos mecanismos tem a ver com a lavagem das partículas mais finas do solo. Um solo natural é um material heterogéneo, constituído por partículas com diferentes tamanhos. A dimensão reduzida de algumas partículas possibilita o seu transporte pela água no interior dos “tubos” pelos quais circula. Este fenómeno de remoção das

partículas mais finas fragiliza a estrutura do solo, podendo em alguns casos comprometer mesmo a sua estrutura e levar à sua rotura. Controlando a percolação da água, é possível controlar este fenómeno.

Além da lavagem de partículas, outro mecanismo relativo ao movimento da água influencia a estabilidade global da escavação. O movimento da água de um ponto com maior potencial hidráulico para um ponto com menor pode ser visto como uma força aplicada no sentido do movimento. Desta forma, o movimento de percolação da água para o interior de uma escavação pela base da mesma vai criar uma força vertical de sentido ascendente, tanto maior quanto maior for o diferencial do potencial hidráulico em causa, que vai ser somada à impulsão já presente caso a situação fosse hidrostática. Estas forças podem, no limite, causar a rotura do fundo da escavação por levantamento. Mais uma vez, o controlo da água no solo permite diminuir o diferencial hidráulico aplicado, limitando essa força e a força de impulsão total.

Assim, o controlo da água no solo torna-se essencial para o seguinte:

- Controlar a percolação para o interior da escavação, quer através das paredes da escavação, quer através do fundo da mesma;
- Reduzir as cargas laterais aplicadas nas estruturas de contenção;
- Aumentar a estabilidade das paredes e da base da escavação;
- Prevenir a perda de material nos limites da escavação devido à erosão causada pela percolação;
- Permitir condições de trabalho adequadas, como a melhoria das condições de tráfego;
- Melhorar a trabalhabilidade dos solos e as suas características no caso de haver necessidade de utilização dos mesmos, por exemplo, em aterro.

2.2. ABORDAGENS POSSÍVEIS

As medidas aplicadas em qualquer sistema de controlo da água no solo podem ser divididas em dois tipos principais: medidas de bombagem e medidas de exclusão. Tal como os nomes indicam, as medidas de bombagem assentam no princípio de que a água é removida do solo, e as medidas de exclusão têm por base o impedimento da entrada da água. Por norma os sistemas instalados são constituídos por uma combinação destes dois tipos. Há toda uma panóplia de soluções e combinações possíveis de ser adotadas, sendo que o seu processo de escolha depende de fatores como a profundidade da escavação a realizar, o tipo de obra a executar, as características hidrogeológicas do local, as condições disponíveis em termos de, por exemplo, espaço ou abastecimento energético, questões ambientais ou, por vezes, questões orçamentais ou de disponibilidade de equipamentos. De seguida vão ser introduzidas algumas das opções existentes para os dois tipos de medidas introduzidas.

2.2.1. MEDIDAS DE BOMBAGEM

As medidas de bombagem podem ser utilizadas tanto na remoção de água de uma escavação como no rebaixamento do nível freático em redor desta e, por isso, na diminuição da pressão aplicada nas faces da escavação: quer nas paredes, quer na sua base.

Algumas das medidas de controlo da água por bombagem mais correntes são:

- Recolha de água em poços de bombagem superficiais com bombas de sucção (*Sump pumping*):
Este método é usado durante as escavações e consiste no encaminhamento da água que se acumula no fundo da escavação em direção a um poço de recolha a partir do qual é feita a

bombagem. No limite, estes poços podem ser utilizados para rebaixamentos limitados do nível freático em casos de escavações pouco profundas. Associados às bombas corretas permitem um maior controlo sobre a quantidade de finos retirados do solo durante a bombagem do que os outros tipos de sistemas;

- **Poços Verticais (*Well Points*):**

Consistem na furação de poços para recolha de água e bombagem por sucção dos mesmos. São amplamente utilizados em escavações pouco profundas e a capacidade de rebaixamento do nível freático está diretamente ligada à capacidade das bombas instaladas. Não raras vezes estes poços são agrupados, com pequeno espaçamento entre eles, em sistemas que permitam um rebaixamento na área desejada. De referir que, neste tipo de sistemas, uma só bomba pode ser, e normalmente é, responsável pela extração de água de vários poços;

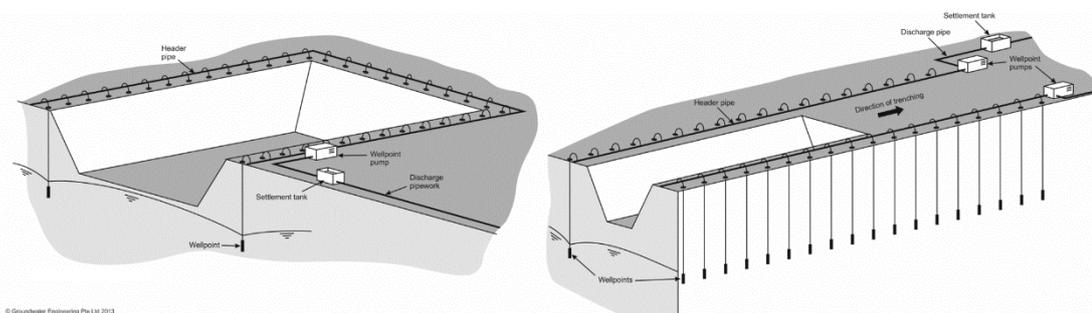


Figura 2 - Dois sistemas possíveis de poços verticais (fonte: Groundwater Engineering Pte Ltd [3])

- **Poços Horizontais:**

São poços horizontais instalados por máquinas especializadas que permitem uma grande área de influência. São empregues em situações nas quais não é desejável, ou é mesmo impossível, a instalação de poços verticais. A furação é realizada fora da zona a drenar, sendo esta atravessada pelo poço, aproximadamente horizontal, abaixo da superfície.

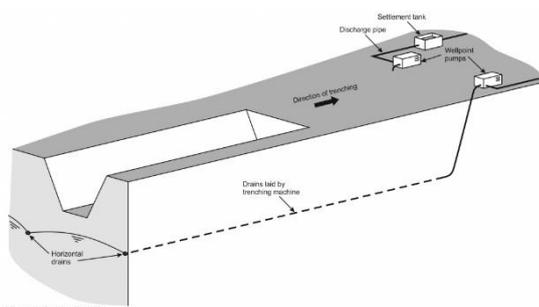


Figura 3 - Sistema de poços horizontais (fonte: Groundwater Engineering Pte Ltd [3])

- **Poços Verticais Profundos (*Deep Well Points*):**

Utilizados em escavações profundas, permitem maiores descidas do nível freático uma vez que utilizam bombas submersíveis, que permitem uma maior elevação da água. São, por isso, mais caros e de instalação mais complexa. Apresentam a vantagem de influenciar uma maior área, devido à forma que o nível freático rebaixado vai apresentar, podendo por vezes uma menor quantidade de poços deste tipo realizar a função de um maior número de poços verticais ordinários. Também estes podem ser associados entre si para formar sistemas de rebaixamento, com afastamentos entre si superiores aos afastamentos que se verificam nos

sistemas de poços ordinários (*Well Point Systems*). Podem ser associados a bombas com capacidade de vácuo, melhorando a eficiência em solos mais finos onde a velocidade de percolação da água para o poço seria demasiado lenta;

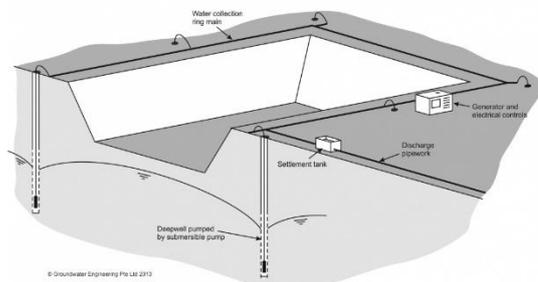


Figura 4 - Sistema de poços profundos (fonte: Groundwater Engineering Pte Ltd [3])

- **Sistemas Edutores (*Ejector ou Eductor Systems*):**
Estes sistemas são constituídos por malhas de poços equipados com bombas ejetoras. Estas bombas fazem uso do efeito de Venturi para criar vácuo, sendo por isso ideais para uso em solos menos pouco permeáveis, nos quais o fluxo de água para o poço seria insuficiente caso não houvesse esse diferencial de pressão extra;
- **Poços de Alívio de Pressão (*Pressure Relief Wells*):**
Nos casos em que uma escavação é realizada num estrato localizado acima de um aquífero confinado, ao alívio de pressão resultante da escavação acresce o excesso de pressão instalado no aquífero, aumentando a probabilidade da ocorrência de um levantamento da base da escavação. Para estes casos, a utilização de poços de alívio de pressão revela-se a melhor solução. A execução destes consiste na simples furação de poços a partir do fundo da escavação e com introdução no aquífero, criando assim caminhos preferenciais para a percolação da água. Devido ao diferencial de pressão instalado, estes poços não necessitam de bombagem, sendo por isso estes sistemas também chamados de sistemas passivos. A água ascende ao fundo da escavação, sendo normalmente recolhida por sistemas de trincheiras e bombeada para a superfície.

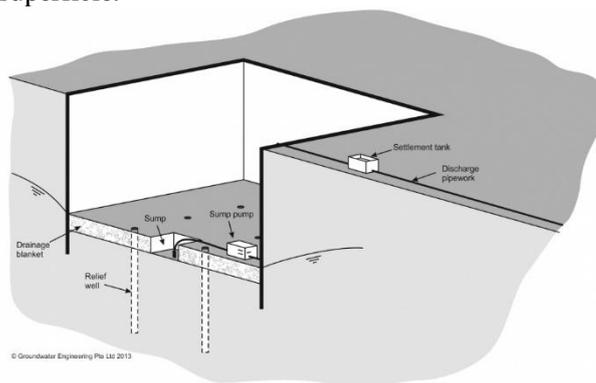


Figura 5 - Poços de alívio de pressão associados a sump pumping e à utilização de medidas de exclusão (fonte: Groundwater Engineering Pte Ltd [3])

- **Poços Coletores (*Collector Wells*):**
Um poço coletor consiste numa coluna oca enterrada, normalmente em betão, para a qual é conduzida a água através de drenos horizontais que, permitindo um aumento da área de drenagem, aumentam a eficiência do sistema. A bombagem da água é realizada por uma bomba instalada no poço. Mantendo o nível da água no interior do poço baixo, é mantido o

diferencial de pressão instalado entre o mesmo e a água no solo, promovendo a contínua percolação desta para o seu interior. Este sistema não é muito aplicado em sistemas de rebaixamento do nível freático, em grande parte devido aos elevados custos de instalação envolvidos [4].

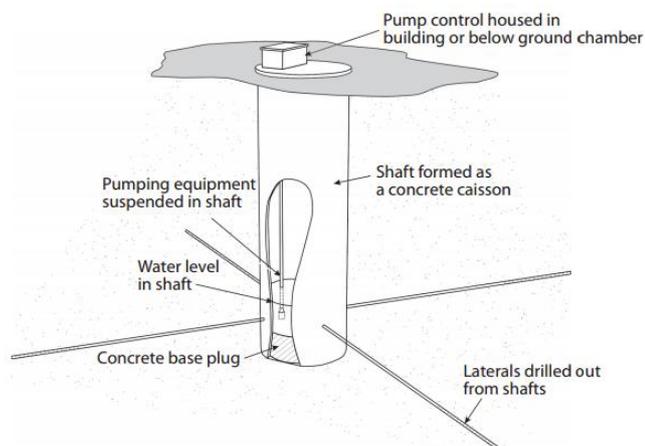


Figura 6 - Exemplo de um poço coletor (fonte: Groundwater control-design and practice - CIRIA report C515 [5])

- Electro-Osmose:

Esta técnica não tem um enquadramento tão definido nas medidas de bombagem como as restantes referidas até este ponto. No fundo, esta pode ser descrita mais como uma técnica de tratamento do solo aliada a um sistema de bombagem [4]. A electro-osmose é aplicada a solos muito finos, siltosos ou argilosos, com permeabilidades tão baixas que inviabilizam a utilização uma técnica de bombagem convencional como as que foram acima referidas. Esta técnica assenta não na criação de uma diferença de potencial hidráulico, mas sim numa diferença de potencial elétrico. Esta diferença de potencial é gerada através da criação de uma rede de eléctrodos enterrados alternados entre si com potenciais negativos e positivos, estabelecendo-se uma corrente eléctrica entre eles que promove a migração da água no sentido da corrente. Em torno dos eléctrodos positivos (receptores) são instalados poços para recolha da água afluyente, associados a uma bomba para extração da mesma. Esta técnica retira na prática pouca água do solo, mas é muitas vezes suficiente para melhorar as características resistentes do solo. É, no entanto, altamente especializada, o que faz com que, associado ao seu elevado consumo energético, tenha um custo económico elevado, sendo raramente utilizada.

A opção por cada uma destas soluções recai sobre o rebaixamento que se pretende obter e as características dos solos nos quais estes se pretendem. A figura 7 ilustra uma orientação geral de apoio à escolha face à altura de rebaixamento pretendida e à permeabilidade dos solos envolvidos.

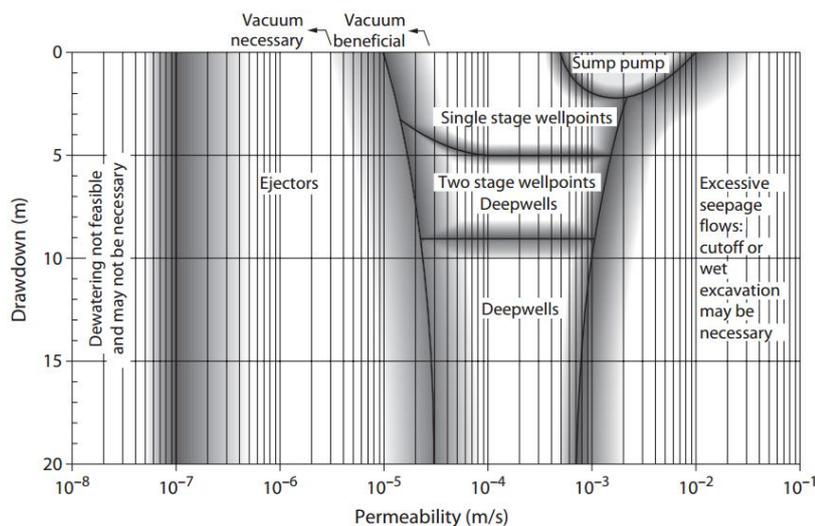


Figura 7 - Medidas de rebaixamento a utilizar de acordo com a altura de rebaixamento e a permeabilidade dos solos. (fonte: Groundwater Lowering in Construction [4])

2.2.2. MEDIDAS DE EXCLUSÃO

As medidas de exclusão têm por objetivo criar uma barreira à entrada de água numa escavação ou estrutura enterrada abaixo do nível freático.

Quando se querem aplicadas a um sistema de controlo permanente, e indo de encontro aos princípios de simplicidade e eficiência acima referidos, estas podem constituir barreiras físicas à entrada da água, ou assentar no emprego de técnicas de tratamento de solos que permitam, nesta aplicação em particular, a diminuição da sua permeabilidade.

2.2.2.1. Medidas de exclusão assentes na instalação de barreiras físicas

As barreiras físicas à percolação de água podem ser de diversos tipos, sendo os seguintes os exemplos mais correntes:

- Cortinas de estacas-prancha:

Esta barreira consiste na cravação de perfis metálicos contíguos, tipicamente em U ou Z, no solo, unidos entre si através de juntas de encaixe nos seus bordos. Estas barreiras podem exercer função de suporte das paredes laterais da escavação se forem utilizadas juntamente com ancoragens. Existe uma variação destas cortinas que alterna os perfis normalmente utilizados com perfis mais resistentes, normalmente com secções tubulares, de modo a conferir uma maior resistência às mesmas;

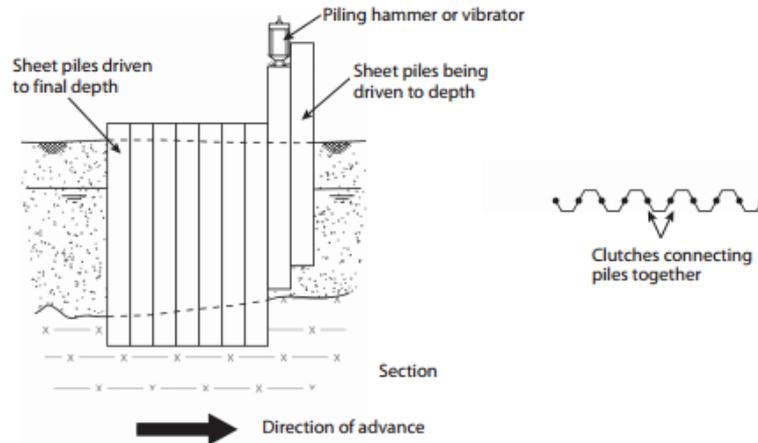


Figura 8 - Ilustração do processo construtivo de cortinas de estacas-prancha. (fonte: Groundwater Lowering in Construction [4])

- Membranas de grout:

Estas membranas são formadas através da cravação consecutiva e contígua de um perfil metálico em H no solo, seguido da sua remoção e do enchimento do espaço por um *grout*, normalmente uma calda de cimento e bentonite. São barreiras finas, sem capacidade estrutural, e por isso normalmente utilizadas como barreiras temporárias profundas;

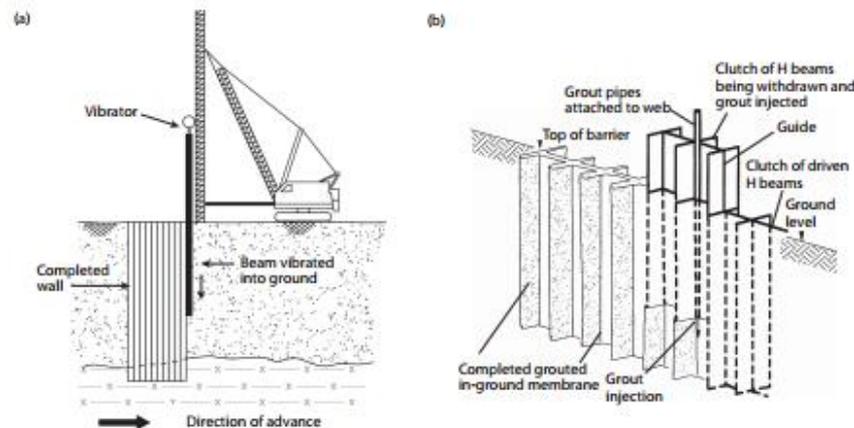


Figura 9 - Ilustração do processo construtivo de paredes membranas de grout (fonte: Groundwater Lowering in Construction [4])

- Cortinas de estacas:

Estas cortinas são constituídas por uma fileira de estacas executadas secantes umas às outras (cortina de estacas secantes) ou com afastamento superior ao diâmetro entre si (cortina de estacas contíguas). Juntamente com as paredes moldadas, são as duas soluções desta lista que têm uma maior função resistente, podendo no entanto servir como uma barreira impermeável. No caso das cortinas de estacas secantes, esta impermeabilização é normalmente conseguida através de um revestimento de betão projetado à medida que a escavação avança. Esta solução pode ser conjugada com níveis de ancoragens para aumento da sua função resistente.

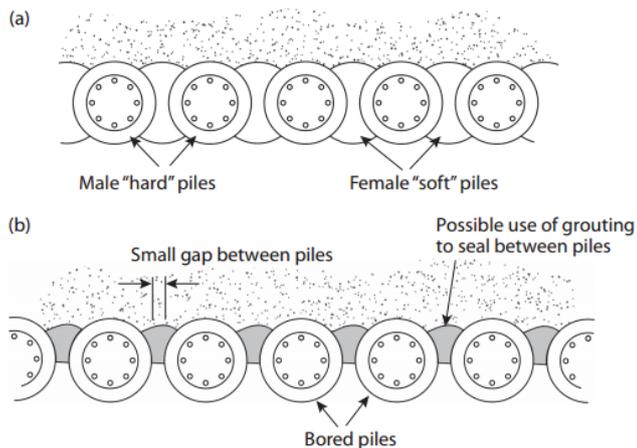


Figura 10 - Vista em planta da instalação de cortinas de estacas: a)secantes e b)contíguas. (fonte: Groundwater Lowering in Construction [4])

▪ Paredes de lamas:

Estas paredes são construídas através da escavação de uma trincheira que é imediatamente preenchida com lamas, por norma bentoníticas, com consistência suficiente para suportar as paredes da trincheira. De seguida é introduzida na trincheira uma mistura de bentonite com solo (em alguns casos, o solo escavado pode não ser adequado) ou com cimento, que vão enrijecer e formar uma barreira à passagem de água. Estas paredes não apresentam capacidade de suporte lateral, a não ser que elementos estruturais sejam introduzidos;

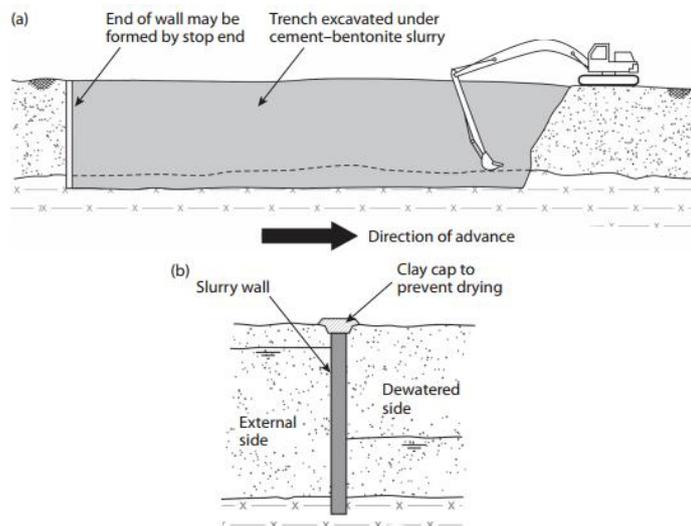


Figura 11 - a) Ilustração do processo construtivo de uma parede de lamas; b) Corte transversal usual neste tipo de barreiras. (fonte: Groundwater Lowering in Construction [4])

▪ Paredes moldadas:

Tal como acontece com as paredes de lamas bentoníticas, inicialmente é aberta uma trincheira que é preenchida com lamas com vista ao suporte das suas paredes. De seguida, é introduzida a armadura necessária e os painéis começam a ser betonados a partir do fundo. Sendo o betão mais denso do que as lamas, estas são expulsas, sendo o resultado final uma parede de betão armado impermeável, com capacidade para suportar as paredes da escavação, se necessário

conjugado com ancoragens. Esta solução é, de todas, aquela que apresenta maior resistência estrutural, sendo normalmente incluída na estrutura resistente final da obra em questão.

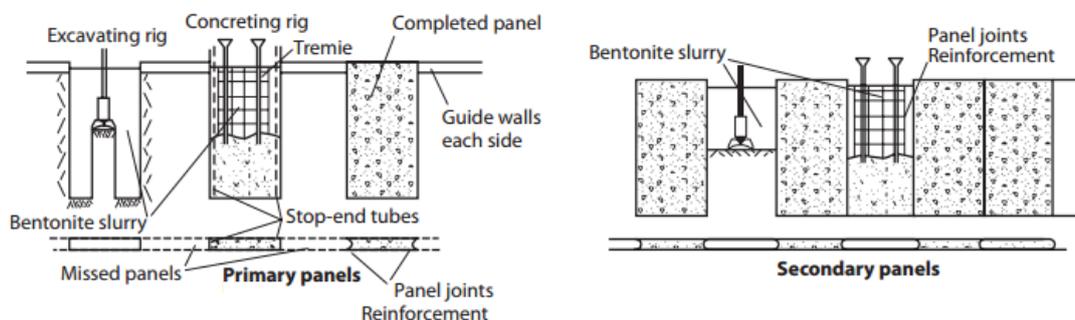


Figura 12 - Ilustração do processo construtivo de paredes moldadas. (fonte: *Groundwater Lowering in Construction* [4])

2.2.2.2. Medidas de exclusão assentes no tratamento do solo com vista à diminuição da sua permeabilidade

- Tratamento com grouts

O tratamento de solos com *grouts* é um assunto vasto com diversos campos de aplicação e consiste na injeção de *grouts* de forma controlada nos solos, com vista à melhoria das suas características. Há vários tipos diferentes de *grouts*, sendo a maioria destes materiais cimentícios que se encontram em estado líquido aquando da sua aplicação, endurecendo após a mesma. As técnicas de tratamento com os mesmos são variadas, desde as que não alteram a estrutura do solo, com vista somente ao preenchimento de vazios, àqueles que alteram profundamente a estrutura do solo, misturando-o e substituindo-o parcialmente por *grout*, dos quais é exemplo a técnica de *Jet Grouting*;

- Congelamento do solo

Esta técnica consiste na inserção de tubos no solo, em proximidade entre si, pelos quais é circulado um fluido a temperaturas extremamente baixas. Deste modo, a água presente no solo à volta dos tubos começa a congelar, aumentando o volume congelado em redor do tubo até se unir com o solo congelado em redor dos tubos vizinhos, criando uma barreira impermeável. Esta técnica não é de uso corrente uma vez que é muito dispendiosa e precisa de condições muito específicas para a sua aplicação. O seu preço e complexidade de execução faz com que não seja possível a sua aplicação no controlo permanente da percolação.

2.3. SISTEMAS PERMANENTES DE CONTROLO

Na grande maioria dos casos nos quais são aplicadas medidas de rebaixamento do nível freático em escavações, estas assumem-se como sendo temporárias. Casos há, no entanto, em que estas medidas se querem permanentes, seja por opção ou necessidade.

A maior parte das estruturas construídas abaixo do nível freático, mesmo as que se querem totalmente impermeáveis, só o são até certo ponto. Na maioria dos casos há entrada de água, mesmo que em quantidade reduzida, sendo necessária a instalação de alguma capacidade de recolha e bombagem da mesma [6].

De um modo geral, os princípios utilizados no dimensionamento de sistemas temporários são idênticos aos utilizados em sistemas permanentes, sendo a principal diferença exatamente a exigência de operação contínua e prolongada. É intuitivo que o desenho dos segundos deve ser conservador, por exemplo prevendo a possibilidade de ocorrência de condições mais desfavoráveis do que as presentes no momento do seu dimensionamento, e assentar em princípios de simplicidade e robustez com vista a diminuir a probabilidade de ocorrência de falhas e evitar a instalação de sistemas de controlo complexos ou a necessidade de um operador humano em permanência. De modo análogo, incluir no projeto de um sistema permanente elementos que facilitem a inspeção, monitorização do comportamento e manutenção do mesmo revela-se muito mais fulcral do que num projeto de um sistema temporário. Além disto, os sistemas permanentes adotados tornam-se parte integrante da estrutura final, tendo o seu dimensionamento de ter em conta de forma muito mais premente aspetos como a longevidade, eficiência, e impacte ambiental.

A figura 13 é um exemplo de um sistema de rebaixamento permanente. Nesta é possível observar a utilização de uma parede impermeável, poços de alívio de pressão e *sump pumping*. Além disto, é observável a escavação do solo nas cunhas em redor da escavação e substituição do mesmo por materiais com permeabilidade bem definida de modo a controlar o caminho de percolação da água naquela zona encaminhando-a para a zona de bombagem na base da escavação.

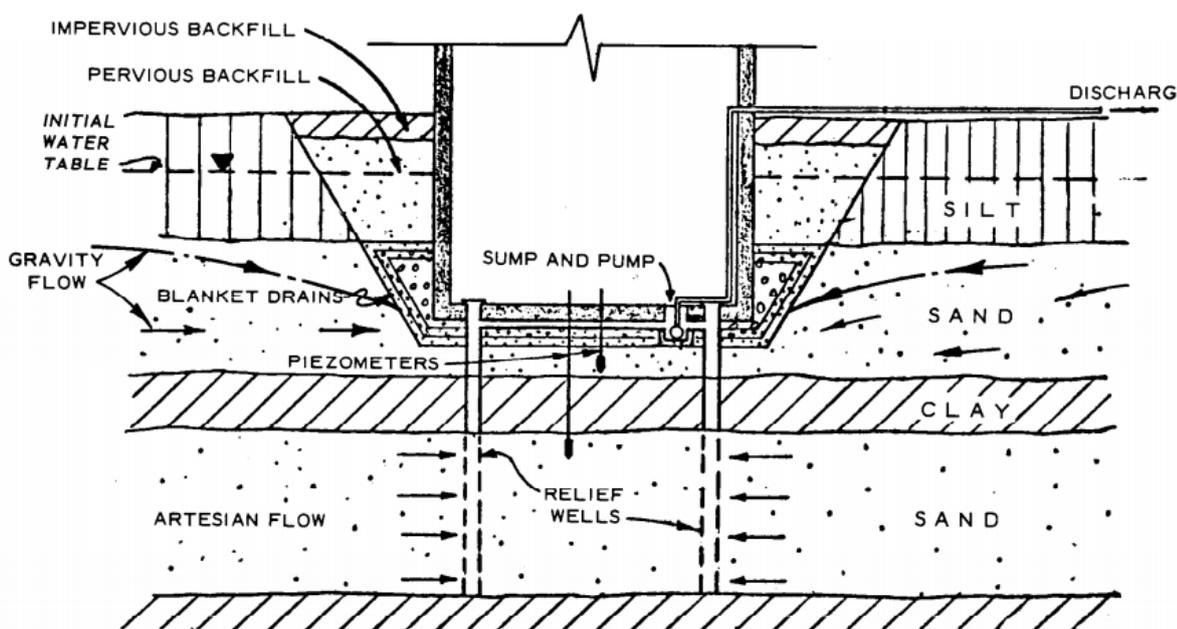


Figura 13 - Sistema de rebaixamento permanente do nível freático. (fonte: *Dewatering and groundwater control*, US Department of Defense [7])

Numa tentativa de evitar ou, de acordo com o que foi dito, reduzir ao máximo a existência de um sistema de bombagem, pode-se optar por uma solução impermeável. Uma solução deste tipo, no entanto, obriga à construção de uma estrutura muito mais robusta do que aquela que seria necessário caso se optasse pelo rebaixamento do nível freático. Neste caso, uma análise rigorosa dos prós e contras de cada solução impõe-se, em particular no que toca à economia de cada solução, ponderando os maiores custos iniciais de construção afetos a uma solução impermeável com os maiores custos operacionais envolvidos numa situação com rebaixamento do nível freático durante o tempo de vida útil esperado para a obra.

Este último aspeto é o objeto principal desta tese.

2.4. SOLUÇÕES COMPARADAS NO ÂMBITO DESTE TRABALHO

2.4.1. SOLUÇÕES PERMEÁVEIS

A solução permanente adotada na obra real foi constituída por uma combinação de medidas de contenção e medidas de bombagem. No que toca à componente de contenção, a opção recaiu sobre a construção de paredes moldadas ao longo de todo o perímetro da escavação até uma profundidade suficiente para haver introdução das mesmas num estrato de solo com baixa permeabilidade. Após a sua construção foi executada uma camada de colunas de *jet-grout* abaixo da profundidade máxima prevista para a escavação. Esta camada teve como principal propósito o contraventamento das paredes moldadas na base da escavação, aproveitando-se da maior rigidez do *jet-grout* face ao solo. Embora o *jet-grout* tenha uma permeabilidade muito baixa, esse facto acabou por não constituir uma mais-valia uma vez que, caso esse valor de permeabilidade fosse mantido, a pressão instalada na sua base seria tal que levaria ao levantamento hidráulico do mesmo. Deste modo, a camada de *jet-grout* foi furada, sendo aumentada artificialmente a sua permeabilidade para um nível que não levasse à ocorrência de levantamento.

Combinada com a medida de contenção referida foi associada a bombagem da água que aflui à base da escavação. Entre a laje de fundo da construção e a camada de *jet-grout* foi instalado um lençol drenante constituído por um material de granulometria pouco extensa que permitisse uma mais fácil movimentação da água nessa zona em direção ao seu ponto de recolha, permitindo a sua posterior bombagem para o exterior do parque. A instalação do sistema de bombagem da água pode ser feita quer a partir do fundo da construção, no piso -4, quer a partir do piso -3 e -2.

A segunda solução considerada é uma variação da solução adotada, considerando uma solução em tudo idêntica à primeira, mas com a bombagem a ser executada a partir de outros pisos que não o inferior. Esta solução leva a menores caudais, uma vez que a diferença entre a cota do nível freático e a cota de extração da água é inferior, mas leva a maiores pressões instaladas na base, tanto maiores quanto menor for a diferença entre essas cotas.

2.4.2. SOLUÇÕES IMPERMEÁVEIS

A terceira e quarta soluções vão ser totalmente impermeáveis, sendo os esforços aplicados sobre a estrutura ainda maiores do que na solução anterior. A diferença entre as duas é que, enquanto numa a pressão exercida sobre a base da construção vai ser equilibrada através do aumento da espessura da laje de fundo, na outra esta vai ser equilibrada através de uma rede de ancoragens associada a uma laje mais fina.

3

MODELAÇÃO NUMÉRICA E DIMENSIONAMENTO

3.1. INTRODUÇÃO À MODELAÇÃO NUMÉRICA

Para iniciar a temática da modelação numérica é primeiro necessário entender o que é um modelo numérico: um modelo numérico consiste na simulação matemática de um processo físico real. O programa utilizado no desenvolvimento desta tese, o SEEP/W, é um modelo numérico capaz de simular matematicamente o processo físico real da percolação de água no solo.

A modelação numérica apresenta diversas vantagens face à modelação física. Algumas dessas vantagens são o facto da construção de um modelo numérico ser muito mais expedita do que um modelo físico; a possibilidade de analisar vários cenários diferentes alterando facilmente os parâmetros adotados, fazendo essa análise em qualquer secção; ou o facto de o efeito da gravidade ser facilmente tida em conta, ao contrário de modelos físicos à escala, onde muitas vezes este aspeto só é passível de ser introduzido com recurso à utilização de centrífugas. É no entanto necessário referir que a modelação numérica acarreta também limitações. Essas limitações prendem-se, por um lado, com a dificuldade na obtenção de modelos matemáticos aplicáveis aos vários fenómenos envolvidos ou, por outro, à impossibilidade de inclusão de alguns modelos devido a limitações do ponto de vista da capacidade de computação corrente existente atualmente. A título de exemplo, até à data ainda não foi possível descrever matematicamente uma relação constitutiva aplicada aos solos em problemas de percolação, devido à complexidade dos fenómenos e muitas variáveis envolvidas [8]. Continuam, por exemplo, a ser investigados modelos que permitam uma descrição completa da percolação em solos não saturados. Por outro lado, a consideração de algumas variáveis pontuais com modelos comportamentais já identificados, tais como a consideração do efeito da alteração da temperatura, de variações de volume ou de alterações químicas num modelo em estudo, levaria a um enorme aumento da complexidade do mesmo e, como tal, a uma muito maior exigência do ponto de vista da capacidade de cálculo envolvida. Se por um lado esta capacidade de cálculo pode não se encontrar disponível, por outro, estando essa capacidade disponível, este aumento de complexidade pode levar a um dispêndio de tempo com o cálculo acima do razoável para utilizações correntes.

3.2. MODELAÇÃO NUMÉRICA UTILIZANDO PROGRAMAS INFORMÁTICOS

A aquisição e utilização de programas informáticos para a análise de um problema de percolação não leva automaticamente a resultados válidos e úteis. A compreensão por parte do utilizador da informação introduzida no programa e a sua capacidade de avaliação dos resultados são o que fazem da modelação numérica uma ferramenta poderosa. O aspeto essencial que conduz a resultados válidos

prende-se exatamente com a compreensão e seleção da informação a introduzir no programa, a partir da adoção de um modelo adequado do problema.

A correta modelação de um problema assenta num correto planeamento. É necessário planejar e executar uma boa prospeção geológica que permita obter todos os dados necessários a uma correta caracterização dos solos envolvidos e que tenha em conta a precisão requerida para o projeto em causa. Além disto, antes de utilizar qualquer *software*, uma boa modelação deverá sempre ser precedida por uma previsão geral da solução que irá ser obtida.

Ao contrário do que poderia ser esperado, de um modo geral um modelo só tem a perder com a introdução de uma grande quantidade de informação. O modelo a utilizar deverá ser sempre uma aproximação, criado a partir de uma visão simplificada da realidade. Podem e devem ser introduzidas simplificações, as quais irão gerar uma solução que mais tarde será testada. No caso do cálculo do caudal percolado para uma escavação, por exemplo, a solução poderá ser avaliada através de um ensaio de enchimento *in situ*, adotando-se as correspondentes correções. As simplificações mais evidentes a ser introduzidas passam por uma simplificação da geometria do problema, pela utilização de valores de permeabilidade médios (tendo em conta a grande dificuldade na determinação deste parâmetro, o principal objetivo prende-se com a correta aproximação à sua ordem de grandeza) e, neste problema em particular, pela admissão da saturação completa dos solos.

3.3. MODELAÇÃO EM PROGRAMA DE ELEMENTOS FINITOS SEEP/W

3.3.1. INTRODUÇÃO

O programa SEEP/W é um de uma família de programas reunidos no programa-mãe GEOSTUDIO, criados pela GeoSlope International, Ltd. Reunidos no GEOSTUDIO estão oito programas geotécnicos que abrangem vários campos de análise, como a estabilidade de taludes (SLOPE/W) ou o transporte de contaminantes no solo (CTRAN/W). O SEEP/W é o programa dedicado à análise da percolação de água no solo.

3.3.1.1. *Steady-State vs Transient*

No programa há dois tipos fundamentais de análise: *steady-state e transient*.

Uma análise em *steady-state* é uma tipologia de análise na qual as condições iniciais do problema se mantêm imutáveis ao longo da mesma. No caso de uma análise de percolação estas características vão ser o nível freático e o caudal. São estabelecidas as condições de fronteira e a análise retorna o comportamento do modelo sob essas condições. Ou seja, não é tido em conta o fator tempo. No caso real da percolação de água por baixo de uma parede moldada esta hipótese só se verifica no caso de as condições a montante se manterem constantes, ou seja, caso haja constante reposição em igual quantidade da água que flui por baixo da parede, de modo a que o nível freático não se altere. Numa situação real são raros os casos em que isto acontece. Ainda assim, esta é uma aproximação aceitável ao problema, passível de ser admitida tendo em conta a simplificação que traz aos cálculos e, conseqüentemente, à rapidez com que o programa corre a cada modelação realizada.

As análises do tipo *transient* têm, como o nome indica, condições que são transitórias. Isto é, são estabelecidas condições iniciais e um intervalo de tempo, e o programa analisa a resposta do solo a essas condições ao longo desse intervalo. No caso real da percolação de água por baixo de uma parede moldada este tipo de análise seria útil se se quisesse determinar, por exemplo, quanto tempo levaria para que a água no interior da escavação atingisse uma determinada cota. Na abordagem que vai ser

feita ao caso em estudo, no entanto, não traz nenhuma mais-valia, uma vez que, havendo bombagem constante, as condições de jusante se vão manter constantes, só nos interessando saber qual é o caudal a bombear nessas condições.

3.3.1.2. Natureza espacial da análise

No topo das duas tipologias de análise referidas no ponto anterior, outras variações podem ser introduzidas. As mais importantes são referentes ao modo como a análise é feita em termos espaciais.

Em termos espaciais as modelações em SEEP/W podem ser essencialmente de três tipos: em plano horizontal (*plan view analysis*), axissimétricas e em duas dimensões (2D).

A primeira só é aplicável a aquíferos confinados e tem como principal finalidade permitir a análise da variação da superfície piezométrica resultante da extração ou injeção de fluido no aquífero, conseguida através do estabelecimento de uma malha de elementos finitos horizontal, ao invés da vertical utilizada nas outras modelações. [8]

As modelações axissimétricas são também, no fundo, modelações a duas dimensões. Têm, no entanto, a particularidade de permitir simular uma análise a três dimensões, conseguida à custa da adoção de um modelo simétrico em torno de um eixo vertical. O caso flagrante no qual este modelo é adotado é o da percolação de água para um poço de bombagem, mas a realidade da grande maioria dos problemas não se coaduna com esta estruturação cilíndrica das análises axissimétricas. Ainda assim, e assumindo o erro que essa transformação possa acarretar, há a possibilidade de transformar um problema não axissimétrico na realidade num modelo axissimétrico por aproximação das suas áreas, como será feito mais à frente.

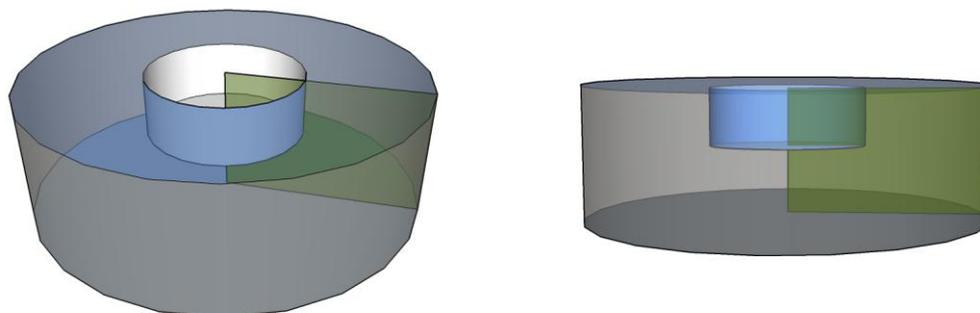


Figura 14 - Ilustração de uma secção-tipo axissimétrica

A tipologia pré-definida de análise no programa SEEP/W é a análise a duas dimensões de uma secção transversal do problema, tal como acontece num modelo axissimétrico, mas sem a consideração de um eixo de simetria vertical. A análise é feita para essa secção, podendo depois o caudal ser multiplicado pela distância perpendicular ao plano da secção na qual o escoamento ocorre, tal como o caudal num modelo com consideração de axissimetria é multiplicado pelo número de radianos ao longo do qual ocorre a simetria em torno do eixo central. O caso típico ao qual este modelo melhor assenta é o de uma escavação com um elevado rácio desenvolvimento/largura de escavação. Considerando a secção a analisar como sendo a de pequena largura, e multiplicando o caudal infiltrado nessa secção pelo grande desenvolvimento da escavação, será contabilizado a generalidade do caudal, uma vez que o

caudal a percolar pelos topos da escavação, não considerado nessa análise, irá ser muito pequeno face ao primeiro.

Embora, como foi referido, um modelo axissimétrico seja também um modelo analisado a duas dimensões, ao longo deste trabalho, para efeito de nomenclatura, os modelos foram classificados como axissimétricos quando contemplam simetria em relação a um eixo vertical, e 2D quando tratam da análise de uma secção transversal do problema sem a consideração desse eixo de simetria, como é o caso do exemplo presente na figura 15.

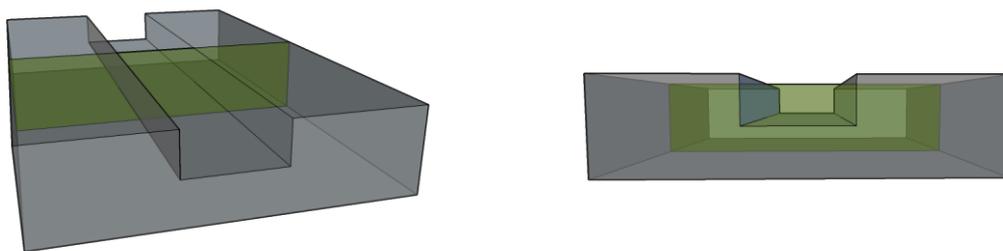


Figura 15 - Ilustração de uma secção-tipo 2D.

3.3.1.3. Condições de fronteira aplicáveis aos modelos

As condições de fronteira no contexto do programa SEEP/W são condições que definem a forma como as várias fronteiras do modelo, sejam elas entre materiais diferentes ou nos limites exteriores do modelo, se comportam, e quais são os valores que determinados parâmetros assumem nestas.

As condições de fronteira neste programa podem ser de cinco tipos: *Head*, *Total Flux*, *Unit Flux*, *Unit Gradient* e *Pressure Head*.

A condição de fronteira *Head* representa a carga hidráulica, sendo constituída pela soma da altura manométrica e a elevação num dado ponto, como é descrito na equação que se segue.

$$H = \frac{u}{\gamma_w} + y \quad (3.1)$$

A condição *Total Flux* é traduzida à letra para fluxo total. Assim, esta condição fronteira permite definir qual é o caudal total que vai passar numa determinada fronteira.

A condição *Unit Flux* permite definir, como o nome indica, qual o caudal a escoar por unidade de comprimento, por exemplo em m³/s/m.

A condição de fronteira *Unit Gradient* é uma condição que está relacionada com a definição de zonas nas quais o escoamento é livre, estando o caudal somente dependente da permeabilidade do solo nessa zona e independente das condições de pressão sentidas.

A condição de fronteira *Pressure Head* define qual a altura manométrica para uma dada fronteira.

Dos vários tipos de condições de fronteira indicados, só três foram utilizados na modelação do problema em estudo. De seguida vão ser tratadas com mais detalhe quais as opções e soluções de modelação adotadas na análise deste problema.

3.3.1.4. Modelos relativos aos materiais

Os modelos aplicados aos materiais podem ser de dois tipos: *Saturated/Unsaturated* e *Saturated only*. O primeiro é aplicado em casos nos quais o grau de saturação dos materiais varia em função das condições presentes no modelo. Nestes casos pode ser definida uma variação do grau de saturação a partir de uma função que estabelece a quantidade de água presente no solo em função da pressão intersticial nos seus poros.

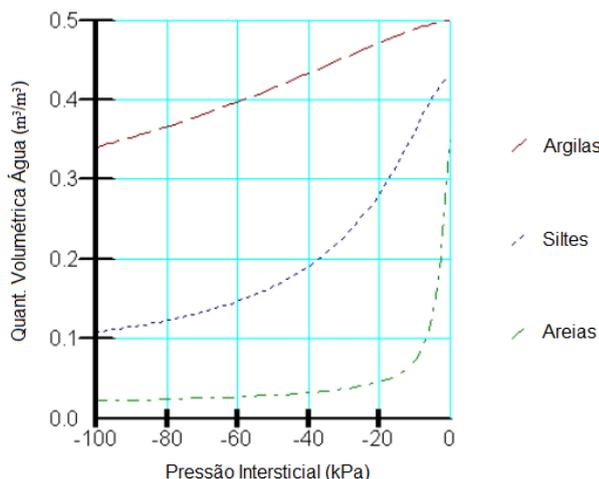


Figura 16- Funções-tipo da quantidade de água no solo para diferentes tipos de solos [8].

No modelo *Saturated/Unsaturated* é também possível estabelecer uma função que dite a variação de permeabilidade do material em função da pressão intersticial. Num solo não saturado a pressão intersticial pode tomar valores negativos (sucção). A contínua diminuição da pressão intersticial traduz-se no aumento da sucção nos poros. Este aumento leva à entrada de ar no solo. A formação de bolsas de ar leva à interrupção dos canais utilizados pela água que eram até então contínuos. Desse modo, a permeabilidade do solo vai diminuir com o aumento da sucção sentida nos poros.

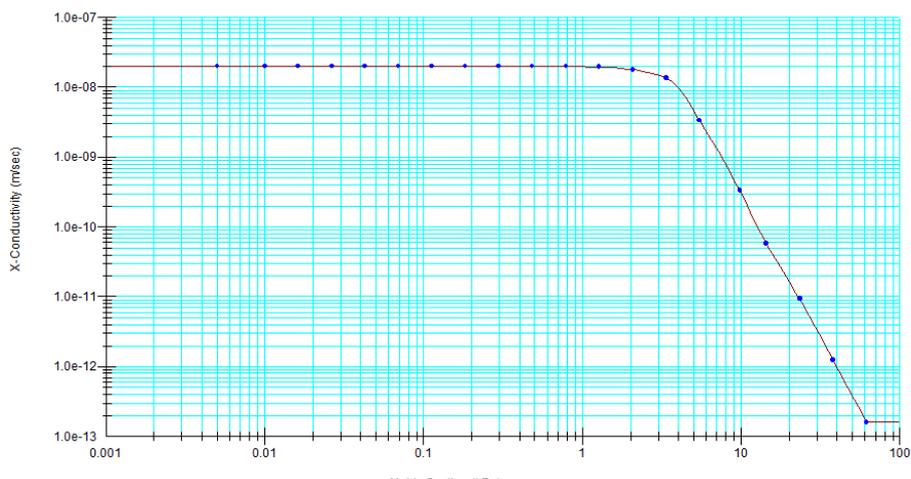


Figura 17 - Curva de variação da permeabilidade para um solo arenoso muito fino [8].

No modelo *Saturated only* as duas variações tidas em conta no modelo anterior deixam de ter sentido. Neste, a permeabilidade passa a ser assumida como tendo um valor constante, assim como a quantidade de água presente no solo.

3.3.2. MODELAÇÃO DO PROBLEMA EM ESTUDO

3.3.2.1. Opções base

Pelo que acima foi dito o tipo de análise base utilizado no problema em estudo foi do tipo *steady-state*. De facto, caso a solução utilizada seja a impermeabilização total, o problema passa a ser hidrostático, sendo o problema de fácil resolução sem o auxílio de um programa de elementos finitos; e caso a solução utilizada seja a da bombagem da água, entende-se que, sendo difícil prever uma lei de variação do nível freático que possibilite estabelecer os parâmetros necessários a uma análise do tipo *transient*, está-se do lado da segurança se for admitido que o caudal a bombear é o correspondente ao caudal resultante de uma condição tal que o nível freático a montante assuma um valor constante correspondente ao seu valor máximo.

A decisão entre a adoção de um modelo de análise 2D ou de um modelo de análise axissimétrico foi mais complicada: o valores finais dos resultados retirados do programa e conseqüentemente utilizados nos cálculos acabaram por ser uma ponderação entre os resultados de um modelo puramente 2D, um modelo puramente axissimétrico, e um modelo que conjugou os dois tipos anteriores.

Em qualquer um dos modelos as condições de fronteira (*boundary conditions*) assumidas foram sempre de três tipos: *Head*, *Pressure Head* e *Total Flux*.

Neste trabalho, a condição de fronteira *Head* foi utilizada nas fronteiras verticais laterais do problema de modo a representar o nível freático à cota 0, e é definida pela seguinte equação:

$$H = \frac{u}{\gamma_w} + y = 0 \quad (3.2)$$

A condição de fronteira *Pressure Head* foi utilizada numa condição fronteira de base já inserida no programa denominada *Zero Pressure* nas modelações nas quais a água é bombada a partir do fundo da escavação, de modo a representar a superfície da escavação na qual não há qualquer pressão aplicada na mesma. Foi também aplicada quando se quis definir a partir de que cota se encontrava instalada a bombagem no interior da escavação.

Nesta modelação, a condição de fronteira *Total Flux* foi utilizada com um valor de fluxo total nulo de modo a impor a impermeabilidade de certas fronteiras. Há que referir, no entanto, que a aplicação desta condição para considerar uma fronteira impermeável nas condições nas quais esta foi imposta se torna redundante, uma vez que o programa já assumiria estas fronteiras como sendo impermeáveis. Na opinião do autor, embora esta ação seja redundante permite uma mais fácil visualização e controlo do problema.

Para determinar qual o caudal que é percolado através da base da escavação (ou o caudal a ser retirado durante o período de utilização do parque de estacionamento) foi estabelecida uma secção em cada modelo, denominada de *flux section*, que permite obter a indicação de qual o caudal percolado na mesma por unidade de comprimento. Isto quer dizer que, nos modelos axissimétricos, esta secção é multiplicada pelo número de radianos envolvidos na rotação da secção, e nos modelos 2D é multiplicado pelo número de metros ao longo dos quais se verifica o escoamento na direção perpendicular à da secção em estudo.

No que toca aos vários modelos adotados, para explicar o porquê da adoção de três modelos distintos é necessário introduzir as simplificações adotadas na transição da realidade para o modelo de cálculo.

3.3.2.2. Hipóteses simplificativas relativamente à geometria em planta da escavação

Como foi dito anteriormente, o programa permite realizar, para o tipo de percolação em estudo, análises em condições de axissimetria e análises a duas dimensões numa dada secção.

No primeiro caso, a área em planta será sempre a área de um círculo; no segundo, a área em planta será a de um retângulo, multiplicando a largura da secção em estudo pelo comprimento que se quiser considerar da mesma.

Ora, a geometria em planta da escavação em estudo é irregular (Figura 1). Assim, no caso de se optar por uma modelação do tipo axissimétrica, a área total real, 2470 m^2 , terá de ser aproximadamente igualada à área de uma circunferência com raio a definir, de acordo com a fórmula da área de uma circunferência:

$$\pi \times r^2 = 2470 \text{ m}^2 \quad (3.3)$$

Daqui tirou-se um raio para a secção axissimétrica equivalente, que se assumiu igual a 28,0 m.

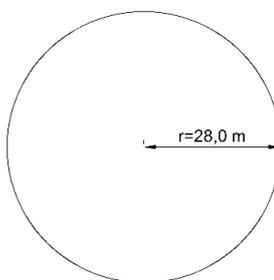


Figura 18 - Planta simplificada para o modelo axissimétrico.

Caso se optasse por uma modelação 2D, a solução passaria por simplificar a geometria real em planta transformando-a num retângulo, assumindo na modelação duas secções tipo que, no cálculo do caudal percolado, seriam multiplicadas pelos seus comprimentos de influência. Deste modo, fixou-se uma das dimensões reais do problema, 62,6 m, e tirou-se a outra dimensão em função desta e da área real, 2470 m^2 , criando um retângulo de área equivalente, de acordo com a expressão:

$$62,6 \times l = 2470 \text{ m}^2 \quad (3.4)$$

Daqui tirou-se a dimensão menor do retângulo a considerar no modelo 2D, igual a aproximadamente 39,5 m. Assim, o modelo 2D será a conjugação da modelação separada de duas secções: uma com largura igual a 62,6 m e comprimento de influência de 39,5 m; outra, com largura igual a 39,5 m e comprimento de influência igual a 62,6 m.

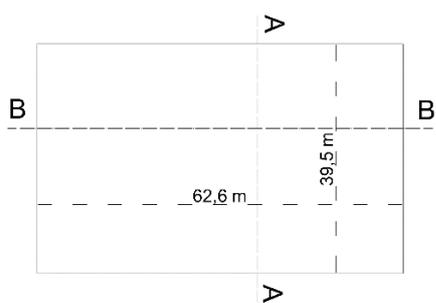


Figura 19 - Planta simplificada da escavação para o modelo 2D.

3.3.2.3. Hipóteses simplificativas relativamente às paredes moldadas

A profundidade das paredes moldadas contruídas é variável ao longo do perímetro da escavação. *In extremis*, numa modelação 2D, este facto poderia levar a que fossem modeladas n secções para as n profundidades diferentes, multiplicando, no caso do cálculo do caudal, cada resultado pelo seu comprimento de influência. Isto, além de levar a uma campanha muito mais exaustiva e dispendiosa de caracterização dos solos, vai contra o princípio da simplificação que se pretende do modelo. Assim, foram assumidas profundidades idênticas para as paredes moldadas de cada um dos quatro lados da escavação já com a geometria simplificada. Em linha com o que tinha sido feito pela equipa projetista aquando da sua própria modelação, assumiram-se os valores de -13,0 m e -16,0 m para as cotas das paredes para a secção com largura igual a 62,6 m, e os valores de -20,0 m e -13,0 m para as cotas das paredes da secção com largura igual a 39,5 m. Estes valores foram assumidos com vista a uma tentativa de aproximação da profundidade média das paredes moldadas na realidade à profundidade média das paredes nos quatro lados do modelo retangular simplificado.

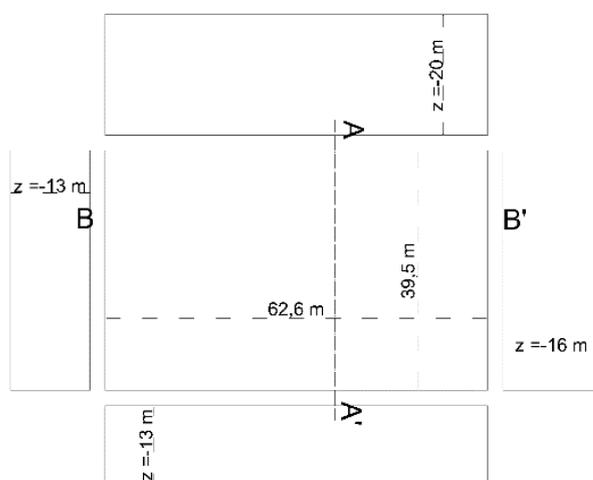


Figura 20 - Simplificações relativas à geometria do problema adotadas no modelo 2D

No caso de ser utilizado um modelo axissimétrico, este, sendo simétrico em torno de um eixo vertical, permite apenas a consideração de uma só profundidade para todas as paredes. Para este caso, foi calculada a profundidade média das paredes ao longo de todo o perímetro real, assumindo que este seria o melhor critério a utilizar do ponto de vista do equilíbrio entre a distância de percolação total que a água teria de percorrer na realidade e a distância de percolação no modelo. Deste cálculo resultou uma cota média igual a aproximadamente 15,4 m.

3.3.2.4. Hipóteses simplificativas relativamente à estratigrafia do modelo e à geologia do local

Também do ponto de vista da estratificação do solo, a não simplificação da mesma iria resultar num modelo que se revelaria extremamente complexo. Analogamente ao que foi assumido pela equipa projetista aquando da sua própria modelação, foram considerados essencialmente dois estratos: um estrato referente a um solo aluvionar e um solo do período Mio-Pliocénico e outro estrato referente a um solo do período Miocénico. Estando o local da construção tão próximo do rio Arade, foi considerado que os solos se encontram completamente saturados, e tendo esta modelação por objetivo primordial a determinação de um caudal percolado, o parâmetro mais relevante é o coeficiente de permeabilidade, k , dos mesmos.

Os ensaios Lefranc realizados com o intuito de determinar a permeabilidade dos solos revelaram valores para os solos aluvionar e mio-pliocénico entre:

$$6,95 \times 10^{-7} \text{ m/s} < k < 9,20 \times 10^{-5} \text{ m/s}, \quad (3.5)$$

e para o solo do período Miocénico valores entre:

$$8,03 \times 10^{-6} \text{ m/s} < k < 2,43 \times 10^{-4} \text{ m/s}. \quad (3.6)$$

Deste modo, e sendo o coeficiente de permeabilidade um dos parâmetros mais difíceis de determinar com exatidão, o principal objetivo da sua estimativa prende-se com a correta aproximação à sua ordem de grandeza. Assim, seria aceitável fazer a modelação com valores de k iguais a 1×10^{-6} m/s para o estrato dos solos aluvionar e Mio-Pliocénico e 1×10^{-5} m/s para o estrato de solo Miocénico. No entanto, a equipa projetista que realizou o projeto na altura teve a possibilidade de realizar um ensaio de enchimento que permitisse validar estes pressupostos, tendo chegado aos valores de $k=4 \times 10^{-6}$ m/s para o estrato de solos aluvionar e Mio-Pliocénico e de $k=1 \times 10^{-4}$ m/s para o estrato do solo Miocénico, valores esses que se decidiu adotar também na atual modelação.

Os perfis geológicos criados a partir dos ensaios de caracterização geológica e geotécnica do local atestam uma grande variação da profundidade dos vários estratos identificados de acordo com o local onde foram realizados os ensaios. Assim, e mais uma vez com o ideal da transposição de uma visão simplificação da realidade para o modelo em mente, assumiu-se que o principal aspeto a ter em conta na definição da profundidade dos estratos seria a necessidade de assumir que todas as paredes moldadas tinham penetrado no solo Miocénico, mais rígido, de modo a obterem o suporte necessário. É, aliás, esta a razão pela qual as paredes foram construídas até profundidades diferentes: a procura por um estrato mais rígido que confira o apoio necessário. Noutra circunstância o objetivo seria o encastramento num solo com baixa permeabilidade. Neste caso, porém, o facto de a permeabilidade aumentar com a profundidade leva a que isso não seja possível.

Pelo que foi dito, e tendo em conta que as paredes moldadas menos profundas assumidas na modelação atingem a cota -13,0 m, assumiu-se como pertinente a determinação de uma espessura de 14,60 m, da cota +2,60 m à cota -12,0 m, para o estrato composto pelos solos aluvionar e Mio-Pliocénico, iniciando-se o estrato do solo Miocénico a partir da cota -12,0 m até à cota -50,0 m, horizonte inferior das várias modelações efetuadas, excetuando a secção transversal com largura 62,6 m, na qual o estrato do Miocénico se estendeu até à cota -70,0 m.

Admitiu-se o nível freático à cota 0 m, em linha com o observado nos ensaios de caracterização geotécnica.

3.3.2.5. Modelos adotados

Tal como foi dito, no âmbito do presente trabalho a opção final no que toca ao tipo de modelo a adotar recaiu sobre a ponderação de três modelos distintos: um modelo 2D, um modelo Axissimétrico e um modelo misto, 2D e Axissimétrico.

As razões que levaram a esta opção prendem-se com os mecanismos envolvidos na percolação de água no solo e no modo como as duas tipologias de modelos os tratam.

O modelo 2D permite, como foi dito acima, simular duas secções, de 39,5 m e de 62,6 m, multiplicando-as pelo seu comprimento de influência e somando os dois valores de caudal calculados. Introduce-se aqui um erro algo grosseiro visto que na realidade os movimentos da água por baixo de cada uma das paredes moldadas entre secções não são independentes. Os canais por onde a água se

movimentação são potencialmente os mesmos e, como tal, é errado assumir que os dois fluxos vão poder circular livremente sem se limitarem um ao outro. Deste modo, a sua soma constituiria uma clara sobrestimação dos caudais envolvidos. Ao mesmo tempo, a volume em torno da escavação afeto aos cantos não é considerado.

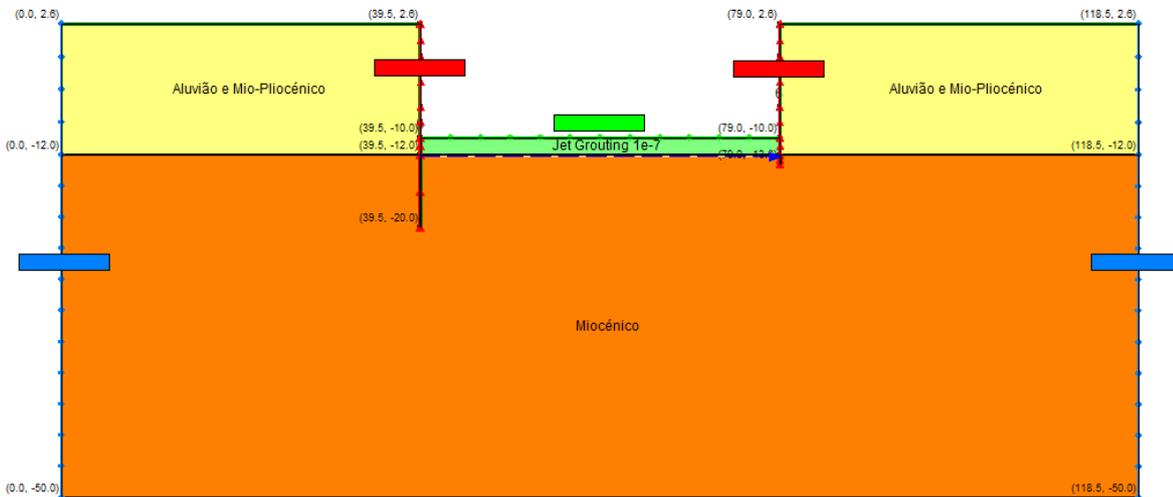


Figura 21 – Modelo 2D - secção com 39,50 m de largura e paredes moldadas às cotas -20,0 m e -13,0 m, com indicação das condições de fronteira aplicadas de acordo com o código de cores da figura 22.

Os retângulos coloridos na figura acima identificam quais as condições de fronteira instaladas nas linhas onde se encontram, de acordo com o código de cores da figura abaixo, adaptada do próprio programa. Tanto a figura 23 como a figura 24 têm as mesmas condições de fronteira aplicadas nos mesmos sítios.

Zero Pressure		Type: Press. Head (P)	<input checked="" type="radio"/> Constant	Action: 0 m
Nível Freático		Type: Head (H)	<input checked="" type="radio"/> Constant	Action: 0 m
Impermeável		Type: Total Flux (Q)	<input checked="" type="radio"/> Constant	Action: 0 m ³ /sec

Figura 22 - Índice do código de cores das condições de fronteira aplicado na figura 21.

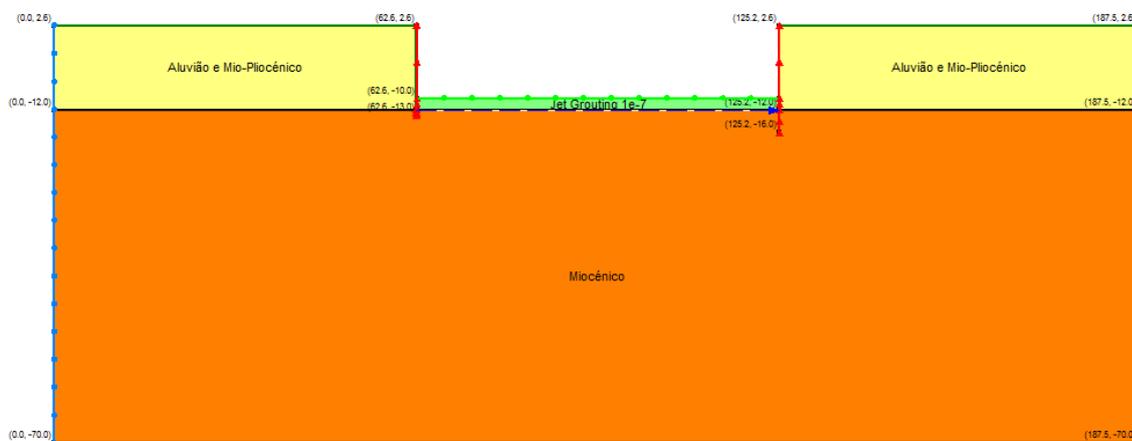


Figura 23 - Modelo 2D - secção com 62,60 m de largura e paredes moldadas às cotas -13,0 m e -16,0 m.

O modelo axissimétrico, definido de modo a que a área de escavação envolvida seja idêntica à área envolvida na escavação real, tem a mais-valia de permitir superar a questão da não consideração da sobreposição dos caminhos de percolação da água no solo. Tem, no entanto, o inconveniente de as paredes moldadas terem de ser assumidas a uma profundidade constante em torno de toda a escavação.

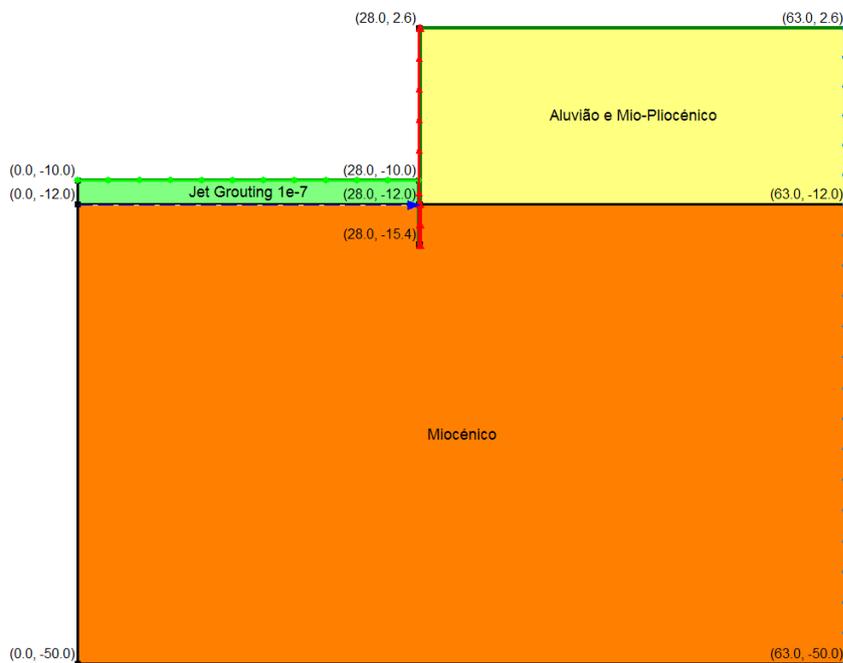


Figura 24 - Modelo Axissimétrico - secção com raio 28,0 m e paredes moldadas à profundidade 15,40 m.

Deste modo, e para tentar contornar as limitações inerentes a cada modelo, decidiu criar-se um terceiro, composto pelas duas tipologias de análise. Neste modelo misto o problema foi subdividido em três modelos distintos: um modelo 2D ao longo do seu comprimento de influência associado a dois modelos axissimétricos nos extremos desse modelo 2D, cada um com uma área em planta semicircular.

O ponto de partida para a elaboração deste modelo foi a manutenção da dimensão 39,5 m do modelo 2D inicial. Após isto, determinou-se que os topos passariam a ser constituídos por dois modelos axissimétricos correspondentes a duas semicircunferências com diâmetro igual a 39,5 m. A área de cada uma dessas semicircunferências é igual a aproximadamente 613 m². No modelo 2D com secção de largura 39,50 m, cada semicircunferência tem área correspondente a 15,5 m do seu desenvolvimento de 62,6 m. A cota das paredes moldadas a adotar nos topos axissimétricos foi ponderada entre a altura inicial que o modelo 2D assumia para cada topo e a cota das paredes moldadas ao longo dos 15,5 m “roubados” a cada lado do retângulo 2D, resultando num topo axissimétrico com paredes à cota -14,5 m e outro com paredes à cota -16,2 m.

Deste modo, o terceiro modelo resulta da combinação de um modelo 2D com largura igual a 39,5 m, com paredes às cotas -13,0 m e -20,0 m e desenvolvimento 31,6 m (igual aos 62,6 iniciais descontados dos 15,5 m de cada lado), com dois modelos axissimétricos nos topos, com paredes às cotas -14,5 m e -16,2 m e desenvolvimento π radianos.

Os tipos de solos, suas permeabilidades e estratigrafia adotados foram os referidos nos pontos anteriores.

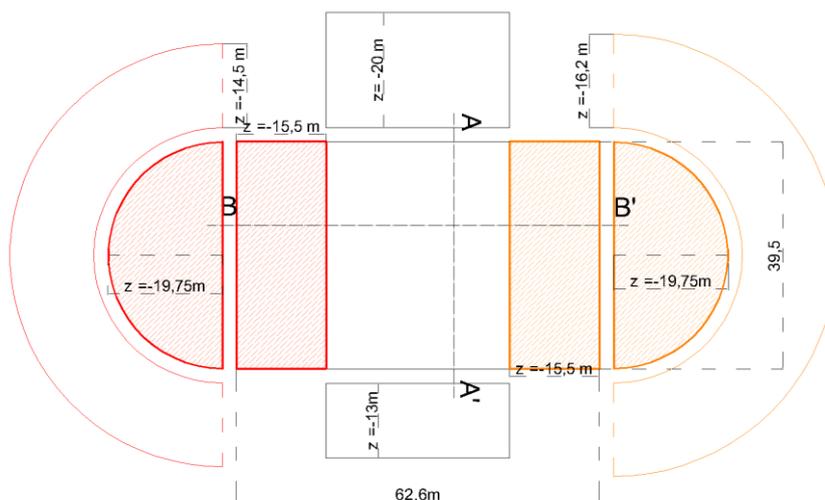


Figura 25 - Planta justificativa do 3º modelo: misto 2D e Axissimétrico.

O único aspeto que falta referir relativamente à modelação do problema são os parâmetros das colunas de *Jet-Grout*. Estas foram realizadas entre as cotas -10,0 m e -12,0 m. Inicialmente, e como forma de justificar o seu emprego, foi realizada uma modelação sem a presença destas, passando estas a ser contabilizadas no modelo seguinte. No que toca à sua permeabilidade, autores diferentes apontam para valores diferentes, entre 10^{-5} e 10^{-6} m/s [9] ou 10^{-7} e 10^{-9} m/s [4] [10]. Neste problema, como será visto adiante, a sua permeabilidade irá ter de ser aumentada artificialmente de modo a garantir a segurança em relação a fenómenos de rotura hidráulica. Deste modo, tomou-se para o coeficiente de permeabilidade do *Jet-Grout* um valor igual a 10^{-7} m/s, de acordo com os valores referidos na literatura, e com a salvaguarda de que este valor não será decisivo.

3.4. RESULTADOS E DIMENSIONAMENTO DE SOLUÇÕES

3.4.1. SEGURANÇA AO LEVANTAMENTO HIDRÁULICO

3.4.1.1. Final da escavação

A presença de água no solo vai exercer sobre a estrutura enterrada uma força semelhante à força de impulsão sofrida por qualquer objeto imerso num líquido. No caso da resultante dessa força superar o somatório das forças resistentes ao levantamento, pode dar-se uma rotura do fundo da escavação por levantamento hidráulico.

Analisando o faseamento construtivo da obra, o ponto mais crítico no qual pode haver ocorrência de levantamento hidráulico é o momento em que a escavação atinge o seu ponto máximo, sendo atingido o topo das colunas de *jet grout* presentes entre as cotas -10,0 m e -12,0 m. Deste modo, tem de ser assegurado que a pressão na base das colunas de *jet grout* não ultrapassa um certo valor. Esse valor é determinado, de acordo com o Eurocódigo 7, impondo um valor unitário ao fator de segurança, que é traduzido pela seguinte equação:

$$FS = \frac{0,9 \times F_{stb}}{F_{dst}} \quad (3.6)$$

Neste caso, a força estabilizante, F_{stb} , vai corresponder ao peso das colunas de jet, e a força desestabilizante, F_{dst} , à pressão aplicada na base das mesmas. Assim, estabelecendo um fator de segurança unitário, e sabendo que o coeficiente de segurança parcial 0,9 vai reduzir as forças estabilizantes, chega-se a um valor por si só inferior ao valor da pressão limite real que não deve ser ultrapassada na base do jet. A seguinte expressão representa o cálculo para este caso, numa análise em tensões totais:

$$1 = \frac{0,9 \times \gamma_{sat, jet} \times d_{jet}}{u} \quad (3.7)$$

Considerando o peso volúmico do *jet grout* igual a 20 kN/m³ e a sua espessura igual a 2,0 m, chegou-se a um valor máximo da pressão na sua base de 36 kPa.

A modelação em SEEP/W permite verificar que este nível de pressão só não é ultrapassado caso o *jet grout* tenha um coeficiente de permeabilidade igual ou superior a 5×10^{-5} m/s. Este nível de permeabilidade pode ser obtido furando aquela camada, em diversos pontos, obtendo uma nova permeabilidade equivalente ao longo da mesma.

3.4.1.2. Final da construção

No final da construção a pressão passível de ser aplicada no fundo do jet de modo a que não haja levantamento é muito superior à calculada anteriormente, uma vez que o peso de toda a estrutura corresponde a uma força estabilizante. Deste modo, foi calculado o peso aproximado da estrutura, possibilitando a obtenção do valor máximo de pressão que pode ser admitido. O peso foi determinado com base nos desenhos fornecidos pela GEG, estando estes e os detalhes do seu cálculo em anexo.

Mais uma vez calculou-se, para um valor unitário do fator de segurança, qual o valor máximo de pressão neutra a instalar, de acordo com a seguinte expressão:

$$1 = \frac{0,9 \times (\gamma_{sat, jet} \times d_{jet} + P_{Estrutura} / A_{Planta})}{u} \quad (3.8)$$

Daqui resultou um valor máximo de pressão igual a 100,5 kPa.

De um ponto de vista meramente teórico, este valor mais alto da pressão máxima admitida permitiria uma diminuição da permeabilidade do jet grout, levando ao estabelecimento de um caudal inferior a ser extraído durante a fase de utilização do parque, caso se optasse por uma solução construtiva permeável com bombagem. No entanto, em termos práticos, esta redução da permeabilidade não pode ser obtida convincentemente, passando a solução pela obturação dos furos inicialmente realizados para aumento da sua permeabilidade, solução essa que é arcaica e difícil de controlar. Assim, é aceite que o coeficiente de permeabilidade de 5×10^{-5} m/s vai ser definitivo.

3.4.2. SOLUÇÕES PERMEÁVEIS

3.4.2.1. Introdução

No caso de se optar por uma solução permeável com bombagem, o facto de essa bombagem poder ser realizada a partir dos vários pisos acarreta diferenças muito significativas. Quanto menor a diferença entre a cota do nível freático no exterior da construção e a cota à qual é feita a bombagem no interior da mesma, menor é a diferença de potencial hidráulico instalada. Deste modo, o caudal a extrair é tanto menor quanto menos profundo estiver o ponto de bombagem. Esta diminuição de caudal implica, no entanto, um *trade-off* em relação à pressão aplicada no fundo da construção. À medida que diminui a diferença entre as cotas, diminui a diferença de potencial e o caudal envolvido; aumenta, no entanto, a pressão aplicada na base. No limite, se o ponto de bombagem se encontrasse à mesma cota do nível freático, não se estabeleceria qualquer escoamento. Essa solução seria, no entanto, equiparada a uma solução impermeável, com o valor máximo da pressão, correspondente à situação hidrostática, aplicado no fundo da construção.

Há, portanto, que fazer uma ponderação entre o caudal a bombar e a robustez da laje de fundo, mesmo excluindo eventuais problemas de levantamento hidráulico.

As soluções permeáveis foram todas elas modeladas em SEEP/W. Mais uma vez, do ponto de vista teórico, cada solução admitiria valores de permeabilidade do *jet-grout* diferentes sem que houvesse levantamento. No entanto, pelo que foi dito anteriormente, assumiu-se que o valor permanecerá imutável, igual a $5 \times 10^{-5} \text{ m/s}$. Os resultados obtidos nas várias modelações indicam que, para este valor, em todos os casos seguintes é assegurada a segurança ao levantamento hidráulico.

3.4.2.2. Bombagem a partir dos pisos -4, -3 ou -2.

Entre as modelações feitas para cada piso foi apenas alterado o valor da condição fronteira imposta no fundo da escavação de modo a refletir a altura a partir do qual é feita a bombagem.

São a seguir apresentadas as soluções obtidas para cada modelo considerado. No entanto, pelo que foi dito no capítulo anterior relativamente aos vários modelos, optou-se por utilizar o valor gerado pelo modelo misto no dimensionamento das várias soluções.

No dimensionamento das soluções de bombagem a partir dos vários pisos tomou-se a opção de manter sempre a espessura da laje igual a 0,40 m. Foi também assumida uma malha de pilares com espaçamento aproximadamente igual a 8 m ao longo do lado com dimensão 39,5 m e a 7 m ao longo do lado com dimensão 62,6 m.

O dimensionamento das lajes de fundo foi realizado utilizando o método do regulamento britânico para lajes que funcionam nas duas direções.

A escolha das bombas foi realizada a partir do catálogo da Grundfos, marca de referência nesta área.

Quadro 1 - Valores de caudal diário, de pressão aplicada na base da construção e da quantidade de aço presente nas lajes de fundo para a bombagem a partir dos vários pisos.

	Piso -4	Piso-3	Piso -2
Q 2D [m ³ /dia]	8959	6141	3624
Q Axissimétrico [m ³ /dia]	8540	5765	3416
Q misto [m ³ /dia]	8240	5562	3296
Pressão na base [kPa]	40	65	86
Quantidade Aço [kg/m ²]	13,44	28,81	38,82

Quadro 2 - Bombas e correspondentes gastos energéticos resultantes do dimensionamento.

	Bomba utilizada	Elevação [m]	Energia [kWh/a]
Piso -4	Grundfos SP 300-1N G	12,6	218150
Piso -3	Grundfos SP 215-1-A	9,31	135770
Piso -2	Grundfos SP 125-1-A	6,61	70653

O caso em que a bombagem se realiza a partir do piso -4 é o mais gravoso, quer em termos do caudal a bombear, como da energia necessária para vencer a altura manométrica mais elevada. Apesar disso é aquele que, de acordo com o *trade-off* referido acima, impõe à partida uma laje menos reforçada.

O caso em que a bombagem é realizada a partir do piso -2 é aquele que envolve um menor caudal e menor energia necessária para a bombagem do mesmo. Implica no entanto uma laje de fundo mais reforçada.

3.4.3. SOLUÇÕES IMPERMEÁVEIS

Qualquer solução adotada no sentido de um alívio permanente da pressão na base do *jet-grout* e assim permitir o não levantamento do fundo de escavação estará sempre em linha com uma solução construtiva não estanque, com drenagem obrigatória. Alternativamente, e caso a solução se pretenda não drenada, este levantamento pode ser contrariado não com uma diminuição da pressão exercida no fundo das colunas de jet, à custa de um aumento no caudal a drenar, mas sim com um aumento da força estabilizante aplicada no fundo da escavação. Este aumento pode ser obtido de diversas formas. Neste trabalho vão ser estudadas duas hipóteses que vão de encontro a esta tipologia de soluções: a construção de uma laje de fundo em betão armado com espessura suficiente para instalar a massa desejada; e a instalação de ancoragens no fundo de escavação a amarrar uma laje mais fina.

Como já foi dito, quando a solução construtiva adotada é uma solução impermeável está-se perante uma situação hidrostática. Assim, a determinação da pressão aplicada na base da construção é simples, não sendo necessária a utilização de programas informáticos.

É importante referir que, caso seja adotada uma solução estanque, terá de ser mantido em funcionamento um sistema temporário de bombagem até que a estrutura apresente o peso e robustez necessários para equilibrar a força ascendente que sobre ela vai ser aplicada no momento em que desligarem esse sistema.

3.4.3.1. Laje espessa

O primeiro caso a abordar será o caso em que a pressão é equilibrada através do aumento do peso da laje de fundo. A combinação deste peso com o peso da estrutura terá de ser suficiente para impedir o levantamento da mesma. Há, no entanto, um aspeto que tem de ser tido em conta. A cota do piso -4 tem de ser mantida igual à cota inicialmente prevista. Deste modo, qualquer aumento da espessura da laje terá de ser realizado no sentido de aumentar a profundidade máxima da escavação, aumentando também a pressão. Assumindo o peso volúmico do betão armado igual a 25 kN/m³, o aumento da espessura da laje de fundo em 1,0 metros vai retornar uma ação estabilizante igual ao peso do betão submerso, sensivelmente 15 kN/m².

Sabendo isto, a determinação da espessura da laje é feita através da atribuição de um valor unitário ao fator de segurança ao levantamento, como na seguinte equação:

$$1 = \frac{0,9 \times \left(\gamma_{sat, jet} \times d_{jet} + \frac{P_{Est}}{A_{Planta}} + \gamma_{BA} \times d_{laje} \right)}{u} \quad (3.9)$$

Para que não ocorra levantamento, a laje necessita de ter uma espessura maior ou igual a 1,95 m.

O cálculo dos momentos envolvidos nesta solução foi realizado, mas revelou-se marginal. A simples dimensão da laje leva à necessidade de utilização de uma armadura mínima muito superior àquela que é necessária para resistir aos esforços envolvidos.

Esta solução é teoricamente possível e a sua consideração é feita na ACCV que se segue. Ainda assim, do ponto de vista prático esta solução é demasiado complexa para ser posta em prática face às outras soluções mais simples.

3.4.3.2. Malha de ancoragens

Uma alternativa à enorme laje calculada no ponto anterior é estabelecer uma rede de ancoragens na laje de fundo que permita amarrar a mesma ao solo, impedindo o seu levantamento.

No dimensionamento desta solução optou-se por manter a espessura da laje de fundo igual a 0,40 m, igual à adotada nas soluções impermeáveis.

$$1 = \frac{0,9 \times \left(\gamma_{sat, jet} \times d_{jet} + \frac{P_{Est} + F_{anc}}{A_{Planta}} \right)}{u} \quad (3.10)$$

A resultante das forças de ancoragens vai ter de ser igual ou superior a 53181 kN. Utilizando ancoragens com 5 cordões de aço de alta resistência Y1860 e diâmetro 0,6'', e sabendo que as mesmas são definitivas (mais gravoso do ponto de vista da segurança), são necessárias 49 ancoragens para impedir o levantamento.

4

ANÁLISE CUSTO CICLO DE VIDA**4.1. INTRODUÇÃO**

A Análise Custo Ciclo de Vida (ACCV), em inglês *Life Cycle Cost Analysis (LCCA)*, é um processo pelo qual é realizada uma avaliação completa dos custos envolvidos num determinado projeto durante um período estipulado. Esta análise é realizada considerando que todos os custos resultantes da sua aquisição, operação, manutenção e eventual dispensa são relevantes.

A metodologia ACCV tornou-se popular nos E.U.A na década de 60, quando o Departamento de Defesa se apercebeu do erro que era cometido quando se faziam escolhas com base somente com vista à diminuição do investimento inicial [11]. Em muitos projetos, a opção por uma solução que comporta um investimento inicial mais baixo pode levar a que os custos futuros envolvidos no projeto sejam muito superiores. Esses casos podem ser evitados realizando ACCVs, evitando que o enfoque recaia só sobre o custo inicial da solução, passando a recair também sobre a totalidade dos custos envolvidos ao longo de todo o período de análise adotado para o projeto. Um dos manuais mais completos no que se refere à metodologia envolvida neste tipo de análises foi lançado e é periodicamente re-editado pelo Departamento do Comércio norte-americano, e intitula-se *Life-cycle costing manual for the federal energy management program* [12]. Os conceitos e a metodologia geral introduzidos no presente capítulo baseiam-se essencialmente neste e noutro manual, denominado *Pump Life Cycle Costs* [13] e editado pelo Departamento da Energia norte-americano.

Esta metodologia de análise é particularmente adequada como ferramenta de apoio à decisão no que toca a soluções construtivas em edifícios, assentando na premissa de que, para um dado edifício e função, soluções diferentes, com custos diferentes, são adequadas para atingir os objetivos pretendidos. Assim faz-se, para cada solução que se pretende comparar, um balanço entre o investimento inicial e os custos a longo prazo envolvidos na detenção, exploração, manutenção e eventual desativação do edifício. Esta análise é tanto mais importante quanto maior for o peso dos custos de exploração e manutenção do edifício face aos custos totais envolvidos ao longo de toda a sua vida útil prevista. Em casos nos quais há elevados consumos de água e energia durante a fase de exploração, por exemplo, uma ponderação das soluções passíveis de ser adotadas utilizando esta metodologia de análise pode levar a poupanças significativas.

Embora esta metodologia seja muito útil na comparação de soluções construtivas, o âmbito destas análises não se esgota aqui. A metodologia ACCV pode ser muito útil no seio de uma empresa ou organização, como ferramenta de apoio à decisão no caso em que um orçamento insuficiente leve a que tenha de ser feita uma escolha em relação ao investimento em determinados projetos em detrimento de outros. Ou, por exemplo, no desenvolvimento de um carro pelo seu fabricante, carro

esse que poderá ser alvo de uma análise futura, por parte do potencial comprador, na hora da escolha entre esse ou outro qualquer.

A realização de uma ACCV é importante, mas também ela acarreta custos. Uma ACCV pode variar muito em termos do detalhe envolvido. Mais detalhe implica, à partida, maiores custos. Como tal, o nível de detalhe com que é feita a análise tem de ser ponderado com o custo estimado para o projeto e com os eventuais ganhos que tal análise possa trazer.

Outro aspeto importante de uma ACCV é a fase do projeto na qual esta é realizada. As decisões tomadas numa fase inicial relativamente ao desenho da solução construtiva são aquelas que mais podem influenciar os custos futuros associados a esse projeto [12]. De modo análogo, qualquer decisão tomada antes da realização da ACCV representa uma hipótese falhada do ponto de vista da possibilidade de opção por soluções alternativas com potencial para poupanças futuras. Assim, quanto mais cedo for aplicada uma ACCV, maior potencial para poupanças esta acarreta.

De seguida é apresentada a metodologia aplicada numa análise custo ciclo de vida.

4.2. METODOLOGIA

4.2.1. PREPARAÇÃO DA ANÁLISE

4.2.1.1. Definição do projeto e objetivos

Para que uma ACCV se revele uma ferramenta útil, alguns passos têm de ser cumpridos antes da análise propriamente dita. Em primeiro lugar tem de ser definido o projeto em causa e claramente estabelecidos os objetivos da análise, verificando a sua coadunação com esta tipologia de análise. Esta pode retornar as variações de custos totais entre duas alternativas e apresentar explicitamente a que terá um menor custo, mas pode também comparar, por exemplo, o custo da realização de um dado projeto com os custos que a não realização do mesmo pode acarretar. Caso se quisesse comparar, por exemplo, o conforto prestado por cada solução ao seu utilizador, esta tipologia de análise não seria adequada. Nesse caso, a ACCV poderia somente retribuir os custos totais em euros afetos a cada solução, podendo estes ser posteriormente incorporados e avaliados numa outra tipologia de análise que atribuísse pesos diferentes aos vários aspetos a avaliar fazendo de seguida uma ponderação entre eles.

4.2.1.2. Definição das soluções a comparar

O passo seguinte na preparação da análise prende-se com o estabelecimento das soluções a comparar, com a definição do intervalo temporal a considerar nessa comparação, e com a agregação de toda a informação necessária relativa aos custos envolvidos em cada solução. Na seleção de soluções alternativas para uma análise económica, tem sentido escolher soluções cujas características técnicas impliquem um potencial para que haja consequências económicas ou alterações nos consumos de água ou energia significativos. Dado que os custos energéticos crescem por norma mais rapidamente do que os outros custos, tem-se a ganhar com o estabelecimento de alternativas que permitam poupar nos custos futuros em troca de um maior investimento inicial. [12]

4.2.1.3. Organização dos custos

Os custos devem ser organizados por categorias, desde o custo de investigação e desenvolvimento aos custos de uma eventual reciclagem ou disposição.

É nesta fase e na anterior que se pode estabelecer o grau de detalhe da análise, definindo quais as variações a comparar entre as soluções e qual o nível de detalhe da informação dos custos associados.

Num projeto de construção típico, a distribuição mais usual dos custos é a seguinte:

- Custos Iniciais:
 - Custos de investigação, desenvolvimento e projeto;
 - Custos de aquisição (de terrenos, equipamentos ou outros);
 - Custos de construção;
- Custo de Operação e Manutenção (O&M):
 - Custos energéticos;
 - Custos de água;
 - Custos de mão-de-obra;
 - Custos de manutenção;
 - Custos de reparação;
 - Custos de substituição de equipamentos;
- Custos de desativação:
 - Custos de demolição;
 - Custos de reconversão;
 - Valores residuais de equipamentos (Fluxo monetário com sinal oposto aos anteriores).

4.2.1.4. Estabelecimento do período de estudo e data de início de utilização

Para levar a cabo uma análise deste género é necessário definir qual é o período a ser considerado para a mesma. Num projeto de construção a norma é considerar que o período de estudo é o período que vai desde o início da fase de projeto até ao fim da vida útil esperada da construção. A data de início de utilização é normalmente coincidente com o final da construção e início da exploração do edifício.

4.2.1.5. Definição dos parâmetros da análise – o valor temporal do dinheiro

Um dos aspetos mais importantes de uma ACCV é o facto de esta ter em conta que o valor do dinheiro se altera ao longo do tempo. Há dois principais motivos pelos quais esta variação se dá.

Uma das razões subjacentes a esta variação é a ocorrência de inflação. As razões que regem este fenómeno são complexas, não reunindo consenso em alguns casos [14]. No âmbito deste trabalho, no entanto, não interessa aprofundar muito este tema. É importante entender que, à medida o tempo passa, o valor dos produtos varia. Normalmente, essa variação corresponde a um aumento generalizado dos preços, e que a este aumento é dado o nome de inflação. Por oposição, se o valor dos produtos tiver uma diminuição generalizada, a essa diminuição é dado o nome de deflação. Assim, a inflação representa uma perda de poder de compra para uma dada unidade monetária – um euro daqui a um ano irá valer menos do que um euro hoje. Por oposição, numa situação de deflação, um euro daqui a um ano irá valer mais do que um euro hoje.

Posto isto, é fácil entender que numa situação de inflação compensa a um investidor aplicar o seu dinheiro visto que, parado, este está a sofrer uma desvalorização. Um período de deflação leva a uma situação oposta, sendo esse um dos principais problemas dos períodos deflacionários: não compensa

investir o dinheiro, visto que ele irá valer mais amanhã. Isto leva normalmente a ciclos de desinvestimento e consequente recessão económica.

A inflação é expressa como uma taxa de variação percentual dos preços para um dado período.

Em 2014 a taxa de inflação foi negativa (representativa de uma situação de deflação) e igual a -0.28%. [15]. Esta situação está em parte associada ao decréscimo do consumo e aumento da insegurança sentida pela população no seguimento da crise económica vivida. O objetivo do Banco Central Europeu – o principal responsável a nível europeu pelo controlo e regularização da inflação – é o da estabilização desta taxa a nível europeu nos 2%.

Na ACCV aqui realizada, assumindo que os custos envolvidos variam de acordo com a inflação, não é necessário a consideração desta no cálculo. Se os valores de custos conhecidos, como por exemplo o preço de uma bomba elevatória, são os custos presentes, a consideração da inflação no cálculo do seu valor futuro seria de novo descontada quando este fosse reportado ao seu valor atual.

Em produtos que tenham uma variação de preço distinta da inflação, como é o caso da eletricidade, passa a ser importante considerar essa variação. A variação do preço da eletricidade em Portugal foi durante muito tempo estabelecida pela Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos. A definição da taxa de variação da mesma estava de alguma forma relacionada mais com decisões políticas do que fundamentos económicos. Com o fim do mercado regulado e a entrada no mercado energético liberalizado, a taxa de variação da mesma deixa de ser estabelecida pela ERSE passado a funcionar a lei do mercado habitual. As previsões para o futuro são de uma continuação da subida dos preços durante as próximas duas décadas na ordem dos 30%. Deste modo, assumiu-se para a mesma uma taxa de variação real de 1,5% ao ano.

Além da inflação, interessa referir outro aspeto com grande relevância. O dinheiro pode ser investido e daí serem tirados dividendos. Assim, quando dada a escolha entre receber 100€ hoje, ou 100€ daqui a um ano, a escolha lógica seria receber o dinheiro hoje, sob o ponto de vista de que se o investisse, daqui a um ano teria não 100€, mas $100 \times (1 + j)^t$, sendo j a taxa de juro associada ao investimento feito e t o número de anos volvidos desde o investimento – neste caso, 1.

Do ponto de vista meramente financeiro, a construção do parque subterrâneo envolve aquilo a que é chamado um custo de oportunidade. Ou seja, ao gastar o dinheiro no parque, descarta-se a possibilidade de obter uma certa rentabilidade do mesmo caso este fosse investido, quer num depósito bancário com uma taxa de juro associada, ou num outro qualquer produto económico, com maior ou menor rentabilidade associada a maior ou menor risco. Assim, é simples entender que o investimento num projeto com risco associado, mesmo que diminuto, só tem sentido caso o retorno do mesmo seja superior ao retorno obtido num investimento de duração idêntica e risco idêntico ou superior associado. Assim, o investidor vai exigir uma taxa de retorno do seu dinheiro, em grande parte dependente do risco associado à possibilidade de não obter o seu retorno. No caso em estudo, no entanto, é considerado que o risco associado ao projeto é nulo. Nestes casos, é corrente assumir que a taxa exigida pelo investidor é a chamada taxa de juro sem risco.

A taxa de juro sem risco é a taxa obtida a partir de um investimento com risco nulo associado. Normalmente esta é estabelecida em função de Obrigações do Tesouro (OT) dos países em causa ou outros ativos financeiros estatais, que se têm como apresentando risco nulo. Apesar disto, a instabilidade sentida nos últimos anos nos mercados financeiros tem conferido alguma volatilidade a estes ativos financeiros. O sentimento de insegurança sentido em relação à possibilidade de ocorrência de um *default* português fez com que os juros associados às OTs portuguesas disparasse, atingindo valores elevados. Estes valores e o motivo associado à sua génese – o sentimento de que há, de facto,

risco envolvido nestas obrigações – levam a que a utilização do valor atual dos juros associados às OTs portuguesas para a taxa de juro sem risco seja desadequada.

O exemplo da recente emissão de dívida pública alemã a seis meses com juros negativos é também exemplificativo do comportamento pouco usual dos mercados financeiros. Embora seja verdade que as emissões de dívida com maturidades superior se mantêm em terreno positivo, também estas atingiram valores muito baixos em relação aos valores observados nos anos anteriores.

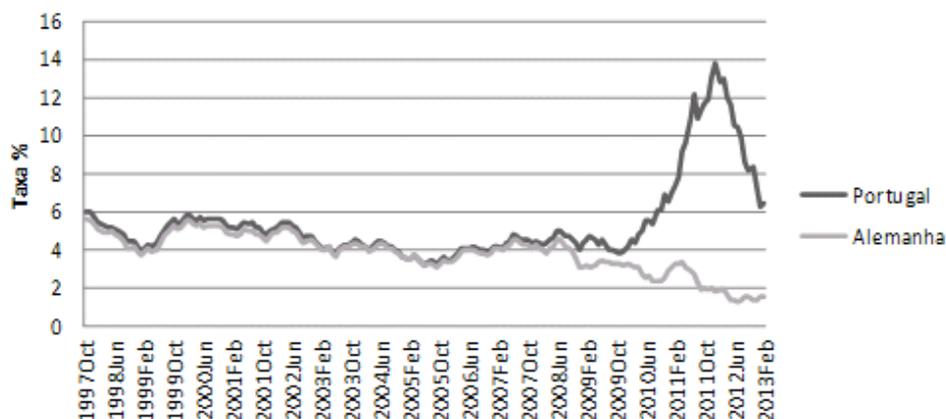


Figura 26 - Taxas de juro associadas às OTs portuguesas e às bunds alemãs, ambas com maturidade 10 anos. (Fonte: ANACOM via Banco Central Europeu [16])

Assim, o método aconselhado na determinação da taxa de juro sem risco deixa de passar pela consideração de um só país na análise, passando a ser consideradas as emissões de dívida de vários países, de modo a reduzir a instabilidade associada a um país em particular. A Autoridade Nacional de Comunicações (ANACOM) aconselha no seu site [16], com base em indicações do Eurostat, a consideração da média ponderada pelo respetivo PIB dos juros das OTs com maturidade 10 anos de todos os países da zona euro.



Figura 27 - Média dos yields a 10 anos de todos os países da zona euro.

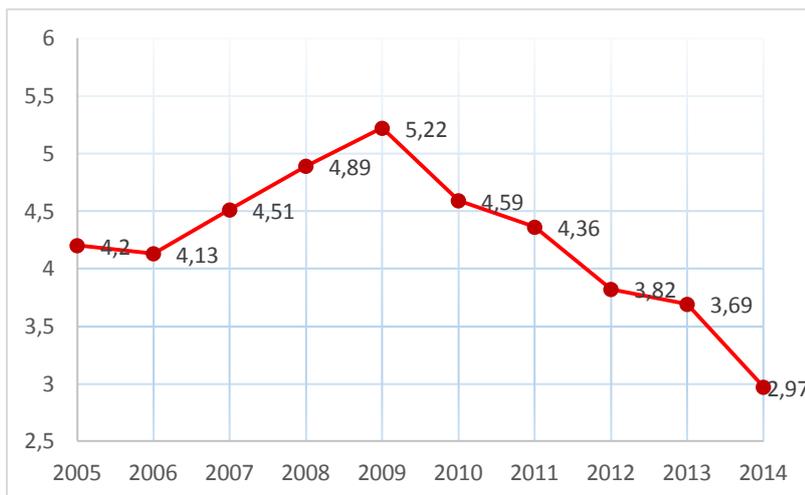


Figura 28 - Média dos yields a 10 anos dos países da zona euro com rating AAA.

Da observação dos gráficos anteriores é possível entender que os juros exigidos aos países com rating inferior a AAA são mais elevados. A média das médias dos yields a 10 anos de todos os países da zona euro entre os anos 2005 e 2014 é de 4,756%, enquanto que a mesma média para os países da zona euro com rating AAA retorna o valor de 4,238%.

No caso em estudo, sendo o tempo de vida útil esperado da obra igual a 50 anos, ponderou-se a utilização na análise de uma taxa de juro sem risco que refletisse um investimento durante um tempo mais alargado do que os 10 anos de maturidade aconselhados. Deste modo, foram analisadas as médias dos juros exigidos para as emissões de dívida pública a 30 anos para todos os países da zona euro e para os países da zona euro com rating AAA.

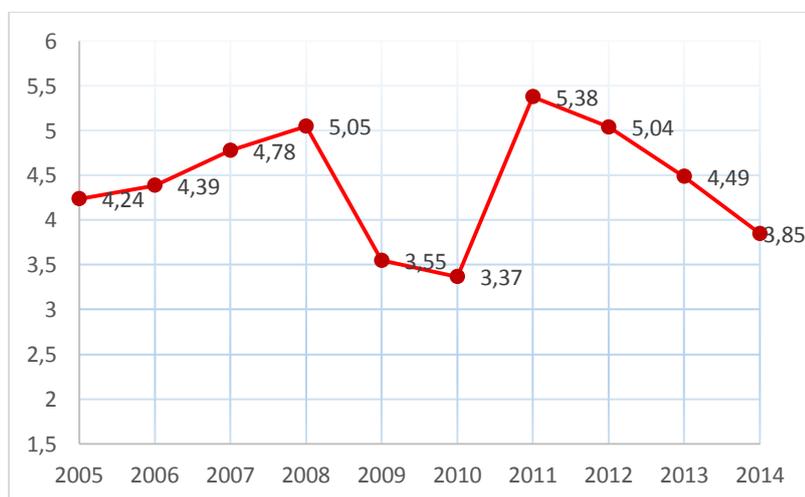


Figura 29 - Média dos yields a 30 anos de todos os países da zona euro.



Figura 30 - Média dos yields a 30 anos dos países da zona euro com rating AAA.

É fácil observar a grande variação que também estes tiveram nos últimos anos. Além deste aspeto, em discussão com pessoas que trabalham no setor financeiro, tornou-se evidente que o modo de abordagem ao financiamento da obra em causa assentaria sempre na renegociação da dívida ao longo dos 50 anos considerados como sendo o período de vida útil da obra. O período de renegociação mais usual é a cada 10 anos. Deste modo, torna-se mais pertinente a consideração da média dos valores dos yields a 10 anos para valor de taxa de juro sem risco, passando a ser estes os valores de referência utilizados nesta análise. Assim, sendo o valor da média das médias dos vários anos dos yields a 10 anos para todos os países da zona euro igual a 4,756%, e a média das médias dos vários anos dos yields a 10 anos para os países da zona euro com *rating* AAA igual a 4,238%, optou-se por considerar na análise base um valor para a taxa de juro sem risco igual a 4,5%.

Pelo que foi dito até agora é fácil entender que o ponto mais sensível de uma ACCV é exatamente a definição dos parâmetros envolvidos nos cálculos, exatamente por ser necessário prever o comportamento futuro dos mercados financeiros, que não raras vezes têm comportamentos atípicos e impossíveis de prever.

Neste ponto, é interessante introduzir o conceito de taxa de juro real e a sua relação com a taxa de inflação. Suponha-se um investimento de 1000 € num certificado do tesouro português que retorna 1100€ ao final de um ano. A obtenção de retorno é certa, mas o Estado não pode garantir que esse dinheiro vá comprar o mesmo que comprava um ano antes. Se o preço dos serviços e bens aumentar mais do que 10% (ou seja, uma taxa de inflação superior a 10%), o poder de compra desses 1100€ será inferior ao dos 1000€ um ano antes [17]. Analogamente, no caso de ser contraído um empréstimo a uma taxa de juro nominal fixa para a construção de um edifício, a ocorrência de inflação vai levar a que a taxa de juro real a pagar pelo devedor seja inferior a essa taxa nominal. No caso da taxa de juro nominal fixa ser de 5% e a taxa de inflação se situar durante um certo período nos 3%, a taxa de juro real que o devedor vai pagar durante esse período é de aproximadamente 2%.

A fórmula exata de cálculo da taxa de juro ajustada à inflação (*Inflation Adjusted Return*) é a seguinte:

$$IAR = \frac{(1+j)}{(1+i)} - 1 \quad (4.1)$$

Assim, utilizando a equação anterior, assumindo para este trabalho uma taxa de inflação igual a 2% e uma taxa de juro nominal igual a 4,5%, a taxa de juro ajustada à inflação, ou taxa de atualização, aplicada no cálculo é aproximadamente igual a 2,45%.

Caso o valor da taxa de inflação fosse idêntico ao valor da taxa de juro recebida pelo investidor, a taxa de juro ajustada à inflação seria aproximadamente igual a zero. Isto significaria que, nesse ponto, o juro recebido pelo investidor permitiria somente recuperar o valor da inflação, permitindo que o seu dinheiro não desvalorizasse como aconteceria caso estivesse parado.

Por tudo o que foi referido até agora, quando se realiza uma ACCV é essencial reportar todos os custos (passados, presentes e futuros) a um dado ponto no tempo, de modo a permitir uma comparação real entre soluções diferentes que impliquem gastos em alturas diferentes. A este ponto no tempo ao qual são referidos todos os custos chama-se **data base**.

Numa ACCV que se queira simples, como vai acontecer neste trabalho, pode ser aceite que a data base seja coincidente com a data de início de utilização e que todos os custos passados relativos ao desenvolvimento do projeto e construção ocorrem na data base.

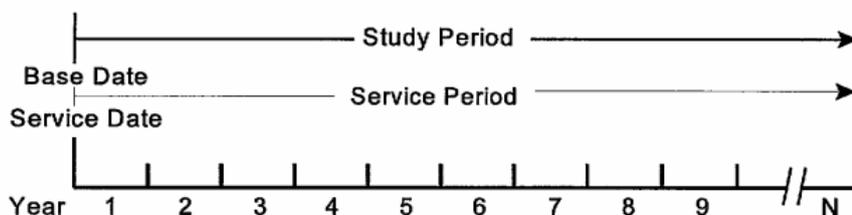


Figura 31 - Diagrama ilustrativo da coincidência entre a data base (base date) e a data do início da utilização (service date). (Fonte: Life cycle costing manual, NIST Handbook 135 [12])

4.2.2. PASSOS PARA A REALIZAÇÃO DA ACCV

A realização de uma ACCV assenta nos seguintes tarefas:

- Associar cada custo à sua data de ocorrência;
- Estimar o valor monetário de cada custo em anos futuros;
- Reportar todos os custos ao ano base da análise;
- Calcular o Custo Ciclo de Vida somando os valores calculados no ponto anterior;
- Analisar os resultados.

Uma vez que se considerou que a data base da análise é coincidente com a data de início de exploração, a única ação necessária de no que toca à referência de valores à data base vai incidir sobre valores futuros. Esses valores vão ser pontuais, como é o caso do custo associado à substituição das bombas, ou anuais, como é o caso do gasto anual de energia. As fórmulas utilizadas e a sua utilidade são indicadas a seguir.

- Valor Atual de um custo singular futuro:

$$VA = \frac{C}{(1+r)^t} \quad (4.2)$$

- Valor Atual de uma anuidade:

$$VA = C \left[\frac{1}{r} - \frac{1}{(1+r)^t} \right] \quad (4.3)$$

- Valor Atual de uma anuidade com uma taxa de variação de preço diferente da inflação:

$$VA = C \times \frac{(1+e)}{(r-e)} \times \left[1 - \left(\frac{1+e}{1+r} \right)^t \right] \quad (4.4)$$

4.3. ACCV EM SISTEMAS DE BOMBAGEM

4.3.1. NOTA INTRODUTÓRIA

A metodologia da ACCV é uma ferramenta de gestão que permite minimizar o desperdício e maximizar a eficiência em muitos tipos de sistema. Os sistemas de bombagem não são exceção. Os sistemas de bombagem representam quase 20 % de toda a energia elétrica consumida a nível mundial. Este tipo de sistema está presente em muitos aspetos do nosso dia-a-dia, desde o seu uso no abastecimento doméstico de água até à sua utilização em sistemas de tratamento e abastecimento de águas municipais, passando pela indústria agrícola, por fábricas de processamento alimentares, pela indústria petroquímica ou pela indústria farmacêutica [13].

Um melhor conhecimento de todos os componentes que direta ou indiretamente influenciam os custos associados aos sistemas de bombagem pode representar uma oportunidade para diminuir significativamente os custos energéticos, operacionais e de manutenção, trazendo não só claros benefícios económicos, mas também benefícios ambientais. Relativamente a este último ponto, cada vez mais organizações se começam a consciencializar dos impactes ambientais por si gerados e olham para a eficiência energética como uma forma de redução das emissões e preservação dos recursos naturais.

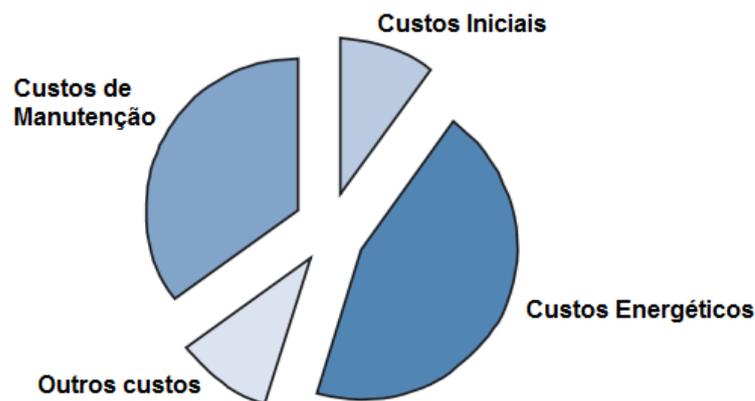


Figura 32 - Custos típicos durante o ciclo de vida de uma bomba industrial de dimensão média. (Adaptado de US Dep of Energy – Pump Life Cycle Costs [13])

Embora os componentes utilizados nos sistemas de bombagem sejam muitas vezes comprados individualmente, só se tira proveito dos mesmos quando estes são utilizados integrados, incorporando um sistema. A energia e materiais utilizados num sistema dependem do desenho da bomba, do

desenho da instalação, e da forma como o sistema é operado, sendo estes aspetos interdependentes. De modo a garantir que os custos de manutenção e o consumo energético se mantêm baixos, e que a eficiência e durabilidade dos equipamentos se mantêm elevada durante todo o período de funcionamento do sistema, todos os componentes incorporados no mesmo devem ser cuidadosamente escolhidos permitindo uma boa integração e tirar o máximo proveito dos mesmos. Esta escolha deve ter em conta o facto de que o preço inicial de compra dos equipamentos se pode vir a revelar muito baixo quando comparado com o custo de ciclo de vida total no caso de bombas com grande tempo de funcionamento durante a sua vida útil. Embora por vezes as características requeridas para um dado sistema suplantem em termos de importância a consideração dos custos energéticos, a procura por uma solução ótima não deixa de ser possível.

A determinação do custo do ciclo de vida de uma bomba implica, analogamente ao que atrás foi referido, seguir uma metodologia que permita identificar e quantificar todos os componentes dos custos, desde a sua compra ao seu desativação, passado pelos custos de instalação, operação e manutenção. Também de modo igual ao que já foi atrás dito, a aplicação da metodologia da ACCV como ferramenta de apoio à decisão na escolha entre dois sistemas de bombagem diferentes demonstrará qual dos dois será mais eficiente de acordo com a abrangência considerada nos dados introduzidos.

Numa altura em que os mercados, quer nacionais, quer globais, continuam a aumentar o nível de competitividade, a procura de poupanças possíveis por parte das empresas é cada vez maior. Os sistemas de bombagem têm, neste contexto, ganho um enfoque cada vez maior, visto que representam grandes poupanças em potencial. Os maiores potenciais de poupança encontram-se não nos novos sistemas a instalar, mas sim nos sistemas já em funcionamento. Isto assenta em duas razões fundamentais. A primeira razão prende-se pura e simplesmente com os números envolvidos em cada lado dessa equação: há pelo menos 20 vezes mais bombas instaladas e em funcionamento do que o número total de bombas que é instalado a cada ano [13]. A segunda razão é referente ao facto de que uma grande parte dos sistemas instalados não se encontra atualmente a funcionar no seu ponto de maior eficiência. Isto deve-se em grande parte das vezes ao facto de os pressupostos iniciais aquando da compra e instalação destes sistemas se terem alterado e as bombas e sistemas de controlo não terem sido otimizados de acordo com os novos pressupostos. Existem estudos que apontam percentagens de poupanças possíveis incríveis, na ordem dos 30% a 50%, que poderiam ser obtidas a partir de alterações nos equipamentos existentes ou sistemas de controlo destes [13].

4.3.2. PARÂMETROS DA ACCV EM SISTEMAS DE BOMBAGEM

Como já foi dito, uma análise do custo do ciclo de vida só é útil se forem comparadas várias soluções. Para a maioria dos projetos analisados os custos relacionados com a manutenção ou o consumo energético vão dominar os custos do ciclo de vida. Assim, é importante determinar com precisão o custo atual da energia, a variação anual esperada desta durante o tempo de vida estimado do sistema e os custos envolvidos nos materiais e na mão-de-obra que o sistema vai necessitar ao longo desse tempo de vida. O processo matemático envolvido na metodologia da ACCV é preciso, mas os resultados obtidos só podem ser tão precisos quanto a informação introduzida no modelo. Também é muitas vezes necessário considerar os custos envolvidos numa eventual paragem do sistema, que podem ser muito significativos no setor industrial quando representam uma potencial perda de produção durante o tempo de paragem. Como foi referido acima, numa análise mais completa, os custos de desativação e ambientais também devem ser considerados.

Os sistemas de bombagem têm um tempo de vida útil médio de 15 a 20 anos [13]. Os custos envolvidos nos mesmos vão ocorrer em diferentes alturas durante esse tempo de vida útil. Assim, mais uma vez, torna-se fundamental reportar todos os dados relativos a custos a um só ano, de modo a possibilitar uma correta análise das diferentes soluções.

Os custos a analisar numa análise integral e completa do custo do ciclo de vida de uma bomba estão representados na seguinte equação [13]:

$$ACCV = C_{inv.inicial} + C_{inst.} + C_{energ.} + C_{oper.} + C_{manut.} + C_{parag.} + C_{amb.} + C_{descom.}$$

(4.4)

Os custos indicados na equação acima são, pela mesma ordem, os seguintes:

- Custos de investimento iniciais

O engenheiro responsável pelo dimensionamento do sistema de bombagem tem de ter em conta vários aspetos quando escolhe os componentes a adquirir e instalar.

Quanto mais pequeno o diâmetro dos vários componentes, mais barato será o seu custo de aquisição e mais barata será a sua instalação. No entanto, a opção por diâmetros mais pequenos pode requerer a instalação de uma bomba mais potente, resultando em maiores custos iniciais na aquisição da bomba e maiores custos envolvidos na sua operação.

Também a qualidade dos equipamentos a considerar é importante. Uma bomba com um preço de aquisição mais elevado pode ser construída com materiais de melhor qualidade e estar preparada para suportar um maior desgaste, levando a uma poupança futura face a uma bomba de pior qualidade que apresente um preço inicial mais baixo.

Além destes, outros fatores devem ser tidos em conta para uma correta escolha. A necessidade de equipamentos auxiliares em alguns sistemas pode levar a um aumento dos custos. Também o facto de um sistema trazer peças suplentes aquando da sua aquisição pode trazer poupanças futuras significativas. O facto de uma marca específica considerar treinar pessoas afetas à organização que adquire o sistema de modo a estes poderem fazer inspeções simples de rotina também pode permitir grandes poupanças em termos de manutenção e em última instância impedir que uma avaria simples se agrave devido à deteção antecipada da mesma.

- Custos de instalação e arranque do sistema

Os custos de instalação e arranque do sistema contemplam custos variados, desde o transporte da bomba à ligação de todos os circuitos elétricos, sistemas, tubagens, instrumentação e até à necessária avaliação de desempenho da bomba de modo a verificar a sua conformidade com as características requeridas ao fornecedor. No caso de ser necessário, podem ser contemplados custos de fundações ou reforço estrutural específicos para a instalação do sistema. A instalação pode ser realizada pelo fornecedor, pelo empreiteiro ou por pessoal afeto à empresa que adquire o sistema de bombagem, dependendo essa decisão da complexidade da mesma, das ferramentas necessárias e do know-how de cada interveniente. Uma instalação completa inclui o treino do pessoal necessário à operação do sistema e transferência dessa responsabilidade para os mesmos.

- Custos energéticos

O consumo energético é normalmente um dos maiores custos envolvidos numa análise ciclo de vida, chegando muitas vezes a dominá-la, em particular em casos nos quais as bombas trabalham mais de 2000 horas por ano. O gasto energético é estimado com base no caudal bombado pelo sistema. Em casos em que a bombagem é constante essa análise é mais simples, tornando-se mais complicada em casos nos quais esse caudal varia, passando a ter de ser delineado o padrão de bombagem em função do tempo. A potência necessária à bombagem pode ser calculada através da seguinte fórmula:

$$P = \frac{Q \times H \times g}{366 \times \eta_b \times \eta_m} \quad (4.5)$$

O engenheiro responsável pelo dimensionamento do sistema precisa de obter dados relativamente à performance de cada sistema a comparar, para um dado caudal e altura manométrica. É preciso ter em conta que a instalação de determinados componentes no sistema pode reduzir a eficiência do mesmo, aumentando o seu consumo energético. Além disto, tem de ser tido em conta o facto de alguns sistemas não verem o seu consumo variar linearmente com o caudal, como é o exemplo dos sistemas equipados com motores elétricos de velocidade variável, que podem consumir diferentes níveis de energia em função da velocidade à qual estão a operar.

O cálculo destes custos tem de ser feito considerando o tempo de consumo da bomba e a potência despendida em cada intervalo de consumo. Multiplicando estes valores obtém-se o valor total de energia utilizado. A partir deste, e multiplicando o mesmo pelo preço de mercado da eletricidade, sabe-se o gasto monetário relativo a esse período. No caso de haver períodos energéticos taxados a valores diferentes estes devem ser considerados no cálculo, fazendo a correspondência entre cada período de funcionamento e o correspondente período de taxação.

Além dos custos de energia diretamente afetos à bombagem, também os restantes consumos afetos a serviços auxiliares têm de ser incluídos. Estes serviços podem ser, por exemplo, um circuito de arrefecimento do motor a água, em relação ao qual tem de ser calculado o custo da água e o custo associado à bombagem da água nesse circuito.

- Custos de operação

Os custos de operação são custos de mão-de-obra relacionados com a operação de um sistema de bombagem. Estes têm uma grande variabilidade dependendo da função do sistema e da complexidade do mesmo. Um sistema de bombagem industrial cujo mau funcionamento possa trazer consequências nefastas pode requerer uma revisão diária para assegurar que não apresenta nenhum indício desse mau funcionamento e que os parâmetros de funcionamento estão de acordo com o previsto. Num sistema deste género, a observação regular permite que os operadores estejam atentos a alterações nos padrões de funcionamento como sejam alterações no nível ou tipo de vibrações, de temperatura, do nível de ruído, dos níveis de pressão, dos níveis de consumo energético ou nos caudais bombados. Já a avaria de um sistema de bombagem para abastecimento

de águas doméstico pode trazer inconvenientes, mas não justifica uma tão grande aposta na observação contínua, bastando uma revisão a cada x anos.

- Custos de manutenção e reparação

Conseguir obter de uma bomba o tempo de vida útil previsto requer revisões regulares e eficientes. Por norma, o fabricante irá estabelecer qual é a frequência e a extensão destas manutenções de rotina. O custo deste serviço de manutenção irá variar de acordo com a altura em que ocorrem e a frequência com que ocorrem as intervenções, assim como em função do preço das peças e materiais necessários. As opções tomadas na fase de projeto poderão ter aqui uma grande influência. A qualidade dos materiais escolhidos e as opções tomadas em relação aos vários componentes podem levar a maiores ou menores tempos de vida dos mesmos, e a maiores ou menores custos de substituição e reparação.

O programa de manutenção pode resultar de fazer um balanço entre a realização de mais intervenções mas a uma menor escala ou menos intervenções mas mais aprofundadas. Não raras vezes uma intervenção requer que o sistema seja desligado e por vezes transportado ao fabricante. Em casos de instalações industriais nos quais não há uma redundância do sistema instalado que permita a compensação da saída de funcionamento de uma bomba pela entrada em serviço de outra, pode-se dar o caso de haver uma perda de produção. Os custos envolvidos nestas paragens podem ser minimizados fazendo corresponder manutenções importantes às bombas com períodos de paragem da produção já previstos anteriormente da fábrica.

A obtenção dos custos totais afetos a operações de manutenção é obtido multiplicando os custos estimados dos vários tipos de manutenções pelo número total de manutenções de cada tipo que se prevê que sejam necessários.

Embora avarias espontâneas sejam difíceis de prever com precisão, elas podem ser estimadas com base em análises estatísticas que permitem o cálculo do tempo médio entre falhas (*Mean Time Between Failures* – MTBF) [13]. O MTBF pode ser estimado para os vários componentes e depois ser combinado dando origem ao valor esperado para o equipamento completo. Por norma, o fabricante calcula e fornece estes valores para os itens cuja falência é crítica. Os valores podem ser calculados estatisticamente ou com base na experiência acumulada para os tipos de bombas, matérias e funções em causa. O mais certo é que a variação entre as utilizações dadas a uma determinada bomba e as práticas correntes de cada utilizador vão afetar profundamente o MTBF. Deste modo, sempre que esta esteja disponível, é preferível utilizar informação baseada em registos reais para o tipo de aplicação em causa do que informação cedida pelo fornecedor com fundamento estatístico. O cálculo do custo afeto a estas avarias pode ser obtido de modo idêntico à obtenção do custo afeto às manutenções previstas, mapeando as falhas prováveis de acordo com o seu tempo de ocorrência e custo de reparação.

- Custos de paragem e perda de produção

Mais uma vez, estes custos podem revelar-se particularmente importantes em sistemas de bombagem que não contemplem redundância no funcionamento e que sejam utilizadas em contextos industriais cujo funcionamento seja indispensável à manutenção da capacidade produtiva. Nesses casos, o custo envolvido pode rivalizar com os custos energéticos e de manutenção e reparação. Assim, e sabendo que a ocorrência de falências imprevistas é muito difícil de evitar, em casos nos quais o custo associado a uma paragem de produção seja demasiado

elevado, a instalação de uma bomba suplente em paralelo deve ser considerada de modo a conferir redundância ao sistema de bombagem e evitar essas perdas económicas elevadas. Assim, o custo de investimento irá ser superior, mas os custos causados por avarias inesperadas seriam somente referentes à reparação da avaria.

- Custos ambientais

Os custos ambientais resultantes da bombagem estão relacionados principalmente com o descarte de componentes usados e contaminação causada pelo líquido bombado. Esta contaminação vai estar intimamente ligada à natureza do líquido a bombear. Determinadas escolhas podem permitir uma significativa redução da contaminação, mas normalmente mediante um investimento elevado. Os custos ambientais podem estar ligados por exemplo ao descarte de lubrificantes usados ou partes usadas contaminadas, ou à fuga de líquido do sistema, caso este tenha um potencial contaminante.

- Custos de descomissionamento

Na grande maioria dos casos, a tipologia dos sistemas de bombagem tem pouca influência nos custos envolvidos no seu descomissionamento. Isto é fundamentalmente verdade para líquidos não contaminantes, mas não deixa de o ser para outro tipo de líquidos. O descarte de líquidos tóxicos, radioativos ou perigosos de outros tipos têm em geral leis que definem o modo como são o seu tratamento é realizado, sendo estas basicamente idênticas para as várias tipologias de sistemas de bombagem. Estes custos têm também em conta a reabilitação do ambiente local. Quanto mais cara for a sua reabilitação, maior vai ser a sensibilidade do custo do ciclo de vida do equipamento à sua vida útil.

É elemento mais importante na minimização do custo do ciclo de vida de um sistema de bombagem é o seu correto dimensionamento. Este correto dimensionamento tem de ter em conta a interação entre a bomba e o resto do sistema de bombagem e a determinação do seu ponto de funcionamento. As características do sistema de tubagens tem de ser calculado de modo a determinar a performance da bomba requerida. Como já foi referido, vários custos de instalação e operação são afetados pelo diâmetro escolhido para as tubagens. O diâmetro escolhido afeta a potência necessária por parte da bomba e as perdas de carga no sistema. Assim, a sua escolha deve ter em conta os seguintes aspetos:

- Economia da instalação;
- Garantia da velocidade de escoamento mínima de modo a, por exemplo, evitar a ocorrência de sedimentação;
- O diâmetro mínimo requerido para aplicação em causa, por exemplo no caso de haver transporte de sólidos;
- Garantia que a velocidade máxima definida para o escoamento não é ultrapassada com vista à minimização da erosão dos componentes.

A redução do diâmetro das tubagens vai levar a que os custos envolvidos na aquisição e instalação das tubagens e outros componentes sejam menores, fazendo por outro lado aumentar a capacidade elevatória requerida da bomba de modo a compensar o aumento da perda de carga resultante dessa diminuição. Deste modo, os gastos relativos à aquisição e instalação da bomba vão ser maiores, aumentando também o seu consumo energético.

4.4. ACCV DAS VÁRIAS SOLUÇÕES

4.4.1. OPÇÕES ADOTADAS

Tal como foi indicado acima, nesta modelação, por simplificação, assumiu-se a data base coincidente com a data de início de utilização e que todos os custos associados ao desenvolvimento do projeto e construção ocorrem nesse mesmo ano.

Os custos dos ensaios de prospeção foram obtidos cruzando os ensaios referidos na memória descritiva do projeto original com os valores correntes praticados para os mesmos.

O custo de projeto foi, à falta de dados concretos, estimado utilizando as fórmulas de cálculo de honorários em obras públicas em função do custo de construção das mesmas, presentes no Anexo II da portaria de 7 de fevereiro de 1972, publicada no Diário do Governo, 2ª série, nº35, de 11 de fevereiro de 1972, entretanto descontinuadas na Portaria nº702-H/2008 de 29 de julho de 2008 [18]. A fórmula utilizada foi para uma obra de categoria III, com valor inferior a 6.000.000€:

$$P = 9 - 1.5 \log\left(\frac{C}{60}\right) + \frac{13.5}{\log\left(\frac{C}{60}\right)} + 0.000005 \cdot \frac{C}{60} \quad (4.6)$$

Os custos de construção foram estimados de várias maneiras. Em alguns casos foi usado o programa CYPE, noutros foram utilizados dados reais relativos à construção cedidos pela empresa projetista. Foram ainda utilizados valores de construção aproximados obtidos por extrapolação de outras obras semelhantes e por aconselhamento de pessoas da área da Engenharia Civil. Os custos das lajes de fundo para cada solução foram obtidos através de medições concretas de cada uma das soluções e contabilizados à parte do preço geral de construção.

No que se refere aos custos de operação, manutenção e reparação houve essencialmente uma divisão entre aqueles que se prendem com a utilização dos sistemas de bombagem e os restantes. Isto deve-se ao facto de não ter sido possível obter dados reais relativos aos custos de operação, manutenção e reparação (OMR), quer através da Câmara Municipal de Portimão, quer junto da empresa que atualmente explora o parque em causa, e de ser difícil estimar estes dados com precisão. Por isto, decidiu utilizar-se como referência um custo de OMR de 0,20€ diários por lugar de estacionamento referido num relatório de contas da EMEL – Empresa Municipal de Mobilidade e Estacionamento de Lisboa S.A. [19] e calculado a partir da média dos custos operacionais reais de vários parques em Lisboa. Este valor entra em conta com os contratos com pessoal, os gastos com água e eletricidade gerais e os gastos com manutenção e limpeza. Sendo o relatório de contas referente ao ano 2004, atualizou-se o valor de acordo com a inflação para um valor atual de 0,24€ diários por lugar. Estes parques têm, no entanto, uma diferença fundamental face ao parque em estudo: não são subterrâneos. Este facto pode levar a um menor consumo energético com iluminação e ventilação, por exemplo, do que no parque subterrâneo em estudo. Considerou-se, ainda assim, que seria um indicador global de custo pertinente para estimar estes custos no presente trabalho. Um custo que não é considerado nestes 0,20€/dia/lugar é o custo associado à bombagem contínua da água.

O custo energético associado à bombagem nas soluções que preveem bombagem foi considerado tendo em conta uma tarifa tri-horária com um preço de 0,30€/kWh nos horários de ponta, 0,15€/kWh em cheias e 0,10€/kWh em vazio. Estes preços foram considerados indicativos dos preços correntes praticados atualmente, de acordo com o mais recente relatório da ERSE [20].

No que toca aos sistemas elevatórios propriamente ditos, foram considerados somente equipamentos da Grundfos. Determinou-se que a bombagem seria efetuada em contínuo, uma vez que os caudais a bombear são elevados e que um reservatório para acumular esse caudal, mesmo durante um período de uma ou duas horas, iria requerer uma solução robusta bastante volumosa. Considerou-se que a bombagem é feita utilizando uma só bomba, mas havendo sempre outra bomba de reserva para o caso de se dar uma avaria ou ser necessário desligar a bomba em utilização para manutenção. Assumiu-se um tempo de vida útil para as bombas de 15 anos. Esta solução irá à partida resultar na instalação de uma bomba no ano 45 que será pouco utilizada. Para esta bomba considerou-se um valor residual igual a metade do seu valor inicial.

4.4.2. RESULTADOS DAS ACCV

Apresentam-se de seguida algumas tabelas e gráficos que ilustram os resultados obtidos a partir da análise realizada.

A cada solução foi atribuída uma letra de A a E de modo a permitir uma mais fácil organização dos dados. O quadro 3 estabelece a correspondência entre essas letras e as várias soluções.

Quadro 3 - Índice das várias soluções analisadas.

Solução	Descrição
A	Solução com bombagem a partir do piso -4
B	Solução com bombagem a partir do piso -3
C	Solução com bombagem a partir do piso -2
D	Solução com laje de fundo espessa
E	Solução com malha de ancoragens

No quadro 4 encontram-se resumidos os valores obtidos relativamente às várias soluções analisadas. Além dos custos totais envolvidos, optou-se por dividir os custos em dois grandes grupos: os custos de investimento, e os custos operacionais. Esta divisão permite estabelecer com clareza as diferenças fundamentais entre as abordagens tomadas por cada tipologia de soluções (permeáveis vs. impermeáveis). Em anexo encontram-se estas divisões representadas com mais detalhe.

Quadro 4 - Valores atuais dos custos iniciais e operacionais ao longo de todo o ciclo de vida do parque.

Solução	Custos Investimento	Custos Operacionais	Custo Total
A	4.736.648,98 €	2.705.983,69 €	7.442.632,67 €
B	4.743.365,91 €	1.950.341,38 €	6.693.707,29 €
C	4.759.375,29 €	1.434.379,81 €	6.193.755,10 €
D	5.072.660,83 €	700.583,47 €	5.773.244,29 €
E	4.815.846,64 €	700.583,47 €	5.516.430,11 €

Os gráficos apresentados nas figuras 33 e 34 ilustram os dados presentes nas tabelas anteriores. O gráfico da figura 34 apresenta-se em milhões de euros.

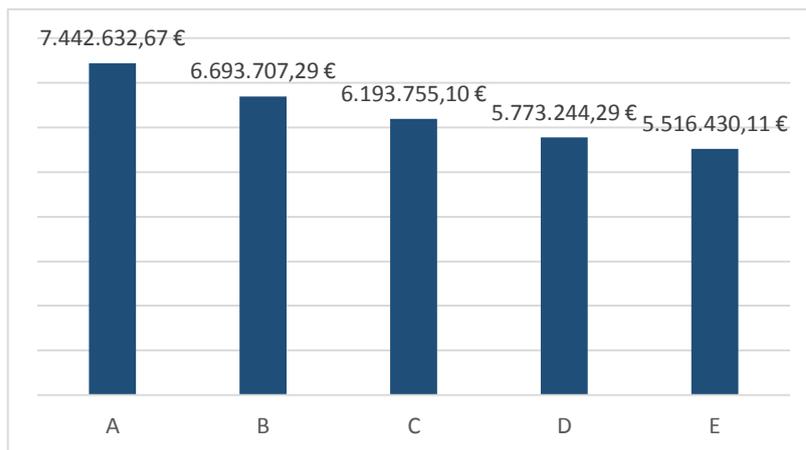


Figura 33 - Custos do Ciclo de Vida das várias soluções analisadas.

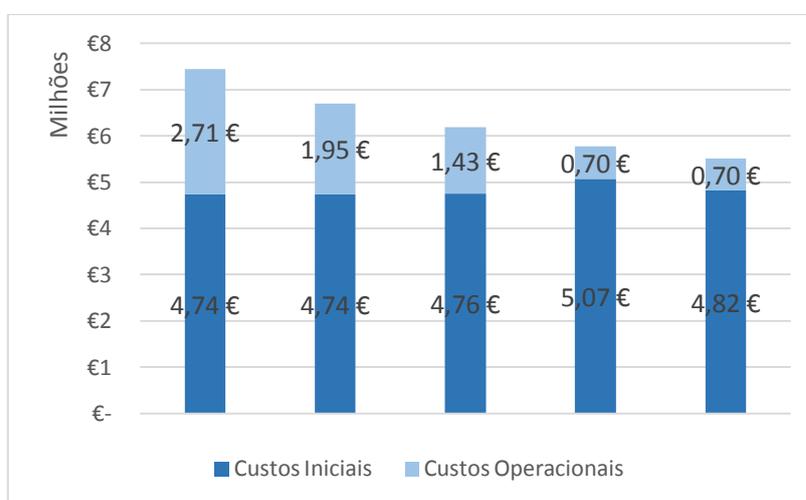


Figura 34 - Custos Iniciais vs. Custos Operacionais das várias soluções analisadas.

4.4.3. ANÁLISES DE SENSIBILIDADE

Uma análise ACCV deve incluir sempre uma análise de sensibilidade aos parâmetros e dados envolvidos na mesma. No caso em estudo, os principais parâmetros envolvidos são a inflação, a taxa de juro sem risco e a evolução do preço da energia.

A taxa de juro sem risco permite estabelecer o conceito do valor temporário do dinheiro, mas numa obra com financiamento público imediato como a obra em causa a consideração de uma grande variação da mesma não tem grande sentido. Deste modo, não foi feita uma análise de sensibilidade para a variação da mesma.

Uma variação da taxa de inflação terá impacto em todos os custos futuros, enquanto que a variação do preço da energia só terá impacto no custos associados à mesma. No entanto, o facto de os custos energéticos nas soluções que consideram bombagem serem muito elevados poderá levar a que a variação do preço da energia origine maiores variações no custo do ciclo de vida dessas soluções do que a variação da taxa de inflação. Deste modo, foram realizadas duas análises de sensibilidade: a primeira considerando a variação de dois pontos percentuais da taxa de inflação, e a segunda levando a cabo uma variação idêntica para a taxa de variação do preço da energia.

Um fator que pode implicar grandes variações nos custos das soluções é a derrapagem nos custos da obra. Como é sabido, em Portugal a ocorrência de derrapagens orçamentais no setor da construção é frequente. A obra em estudo não foi exceção. O projeto inicial tinha falhas e não permitiu a sua conclusão. Após uma modificação ao projeto original realizada por uma nova empresa, foi possível concluir a obra, mas não sem uma derrapagem nos prazos e no orçamento, embora minimizada pelo menor custo da nova solução projetada. Embora seja possível a ocorrência destas derrapagens, a sua contabilização na análise é muito difícil. Além disto, a derrapagem pode ocorrer para qualquer uma das soluções, o que no final leva a que os valores variem de modo aproximadamente idêntico, alterando somente a relação custos iniciais vs. custos operacionais. Deste modo, optou-se por não considerar este potencial fator nas análises de sensibilidade.

Assim, realizaram-se duas análises de sensibilidade em relação à taxa de inflação, considerando que esta passa de 2% para 4% e de 2% para 0%, e duas análises de sensibilidade em relação à taxa de variação do preço de energia, considerando que esta passa de 2,5% para 4,5% e de 2,5% para 0,5%.

4.4.3.1. Sensibilidade à variação da taxa de inflação

Na análise de sensibilidade à variação da taxa de inflação foi necessário definir novas taxas de atualização de acordo com a equação 4.1. Assim, quando se considera uma taxa de inflação igual a 0%, a taxa de atualização considerando uma taxa de juro sem risco igual a 4,5% passa a ser igual a esses 4,5%. Quando se considera uma taxa de inflação igual a 4%, a taxa de atualização considerando essa mesma taxa de juro sem risco passa a ser igual a 0,48%. As figuras 35, 36 e 37 mostram os valores dos custos de investimento, operacionais e totais (de ciclo de vida) para todas as soluções estudadas, resultantes da análise considerando taxas de inflação igual a 0%, 2% e 4%.

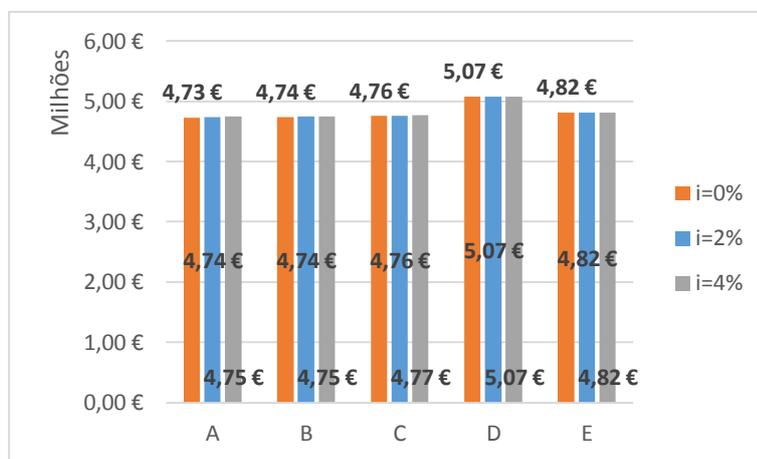


Figura 35 - Custos de Investimento, em milhões de euros, para as várias soluções, considerando valores para a taxa de inflação iguais a 0%, 2% e 4%.

A partir da figura 35 é fácil observar que uma eventual variação da taxa de inflação para valores diferentes do previsto não teria muita influência nos custos de investimento das várias soluções. Isto deve-se ao facto de que a taxa de inflação só tem influência quando se reportam gastos futuros ao seu valor atual, sendo que os únicos gastos futuros contabilizados nos custos de investimento são a substituição das bombas no ano 15, 30 e 45, pouco relevantes no cômputo geral destes gastos.

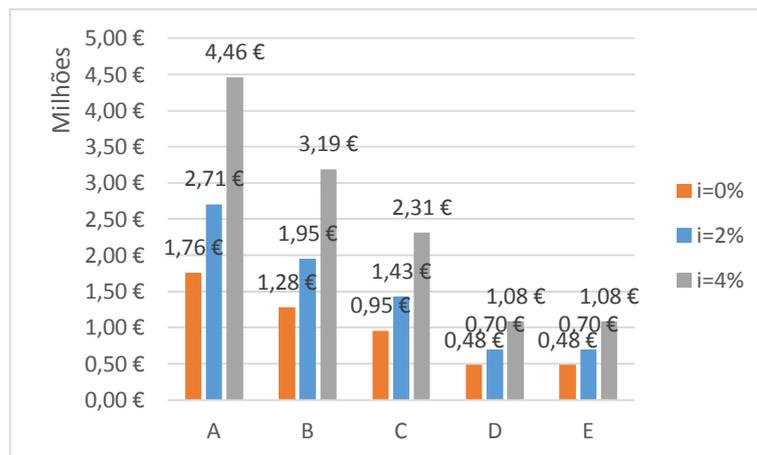


Figura 36 - Custos Operacionais, em milhões de euros, para as várias soluções, considerando valores para a taxa de inflação iguais a 0%, 2% e 4%.

Já nos custos operacionais, sendo estes na sua grande maioria custos futuros, a alteração da taxa de inflação para valores diferentes dos previstos irá gerar grandes diferenças nos valores atuais dos custos, como é observável na figura 36. Note-se que a variação dos preços não é diretamente proporcional à variação da taxa de inflação. Analisando a solução A, por exemplo, um aumento da taxa de inflação de 2% para 4% levou a um aumento de aproximadamente 65% do valor atual dos custos operacionais, enquanto que um decréscimo da mesma taxa de 2% para 0% levou a uma diminuição do valor atual dos custos de 35%. Isto deve-se ao efeito acumulativo que a taxa vai ter nos custos de ano para ano.

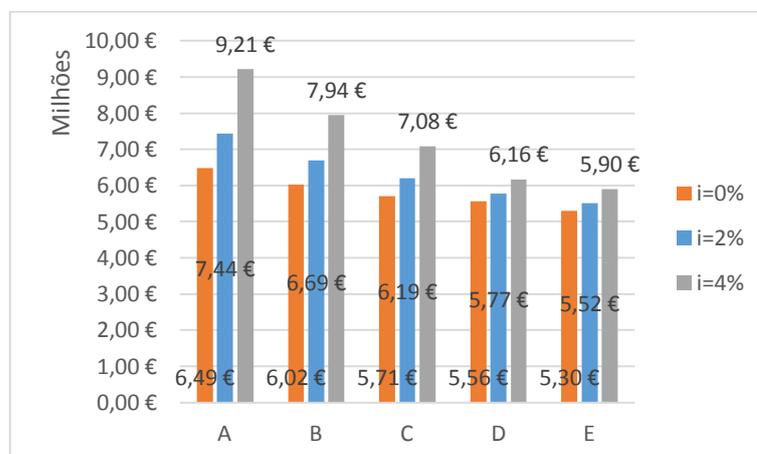


Figura 37 - Custos do Ciclo de Vida, em milhões de euros, para as várias soluções, considerando valores para a taxa de inflação iguais a 0%, 2% e 4%.

Analisando o Custo do Ciclo de Vida (custos totais atuais) de cada solução ilustrados na figura 37, observa-se que a alteração da taxa de inflação para valores diferentes do previsto não irá alterar o ordenamento das soluções em função dos seus custos. Isto é, a solução mais dispendiosa irá manter-se a mesma, o mesmo acontecendo à solução menos dispendiosa.

Assim, as conclusões da análise no que toca à escolha de uma solução com base no critério do preço mais baixo manter-se-ão inalteradas face à variação imprevista dos valores da taxa de inflação, sendo este critério imune àquela.

4.4.3.2. Sensibilidade à alteração da taxa de variação do preço da eletricidade

Como foi dito atrás, a análise de sensibilidade à variação do preço da eletricidade a uma taxa diferente da prevista foi realizada assumindo valores para esta iguais a 0,5% e 4,5% além dos 2,5% considerados na ACCV inicial.

Uma vez que os custos de investimento não contemplam diretamente nenhum custo relacionado com um gasto energético específico, não há qualquer alteração face à alteração da taxa de variação do preço da eletricidade.

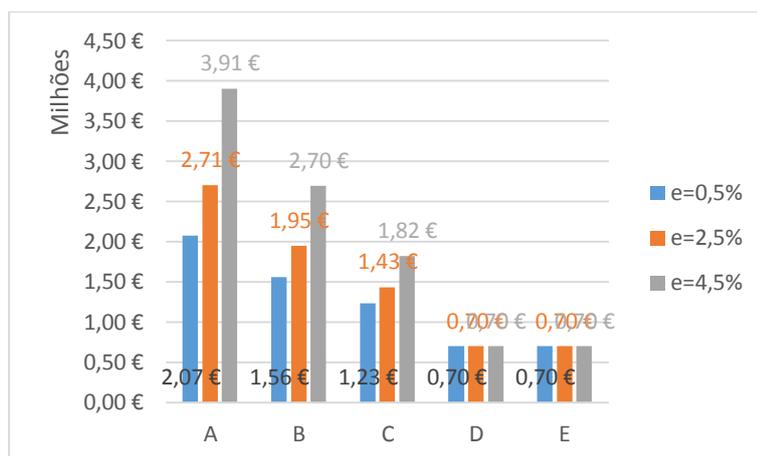


Figura 38 - Custos Operacionais, em milhões de euros, para as várias soluções, considerando valores para a taxa de variação do preço da eletricidade iguais a 0,5%, 2,5% e 4,5%.

No caso dos custos operacionais, representados na figura 38, a variação é grande para as soluções A, B e C – todas permeáveis e com consideração de bombagem. As soluções D e E, impermeáveis, são imunes a este aumento. Este último aspeto revela uma falha na análise realizada: os custos energéticos normais que decorrem da normal exploração do parque, como sejam os custos associados à ventilação e iluminação do mesmo, foram incluídos por simplificação num custo geral de manutenção por lugar de estacionamento, não sendo diretamente influenciados como deveriam ter sido pela variação do valor desta taxa. Ainda assim, o mesmo ocorre para todas as soluções, nas quais os gastos energéticos específicos são relativos somente às bombas elevatórias. Deste modo, esta imprecisão não irá alterar o ordenamento geral das soluções em função do seu preço, uma vez que afeta todas de modo igual.

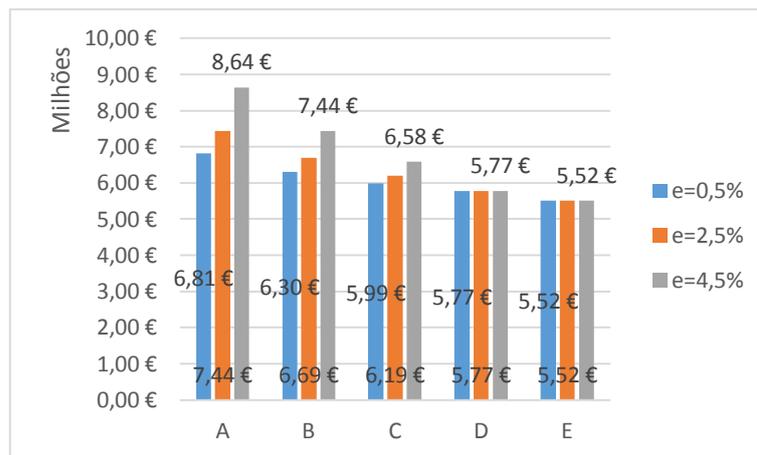


Figura 39 - Custos do Ciclo de Vida, em milhões de euros, para as várias soluções, considerando valores para a taxa de variação do preço da eletricidade iguais a 0,5%, 2,5% e 4,5%.

Como é possível analisar na figura 39, tal como aconteceu na análise de sensibilidade anterior relativa à variação do valor da taxa de inflação, a alteração da taxa de variação do preço da eletricidade não resulta numa alteração do ordenamento das soluções por custo de ciclo de vida. Deste modo, o resultado da análise não será afetado pela variação desta taxa dentro dos intervalos estabelecidos. Deixa-se, no entanto, uma ressalva: no caso hipotético de, contra todas as previsões, o preço da eletricidade baixar ao longo dos próximos anos, a ordem de preferência das soluções poderia ser alterada. Esta variação não foi tida em conta nesta análise de sensibilidade devido ao facto da probabilidade da sua ocorrência ser praticamente nula.

5

CONCLUSÕES

5.1. CONCLUSÕES GERAIS

A principal conclusão a retirar deste trabalho é a de que, embora a solução adotada no projeto real tenha sido uma solução com consideração de capacidade de bombagem instalada, uma solução impermeável com uma malha de ancoragens que impedisse o levantamento da estrutura, embora comportando um maior custo inicial, compensaria caso a análise fosse feita para o ciclo de vida completo do parque de estacionamento. Do ponto de vista da Câmara Municipal de Portimão, no entanto, este facto poderia não ser decisivo, uma vez que, tendo o parque sido posteriormente concessionado, os custos muito significativos resultantes da exploração do parque durante toda a sua vida útil, terão sido provavelmente incluídos no contrato de concessão e imputados à empresa responsável pela concessão.

De entre as soluções estudadas com consideração de bombagem a partir dos pisos -4, -3 e -2, a solução mais económica no longo prazo é a solução que considera que a bombagem se realiza a partir do piso -2. Isto vem estabelecer que a necessidade de construir uma laje de fundo mais robusta e a diferença de custos envolvida nesta compensa, em prol da diminuição significativa do caudal a bombear e da altura manométrica a vencer, com enormes reduções da quantidade de energia consumida.

A realização deste trabalho permitiu um conhecimento aprofundado daquilo que representa uma análise do custo ciclo de vida. A sua utilização como ferramenta de apoio à decisão em obras de engenharia civil com custos consideráveis e mais do que uma solução construtiva possível é extremamente importante, podendo muitas vezes permitir a poupança de quantias avultadas. Repare-se na diferença de aproximadamente 2 milhões de euros entre os custos do ciclo de vida da solução mais barata e mais cara.

Fica, no entanto, a impressão de que a metodologia da análise do custo ciclo de vida pode apresentar fragilidades, nomeadamente no que toca à grande sensibilidade desta face aos parâmetros adotados neste e à dependência destes em relação ao ciclo económico positivo ou negativo que se viva. Uma análise do custo do ciclo de vida da obra estudada neste trabalho realizada utilizando os parâmetros económicos atuais retornaria valores muito diferentes dos valores obtidos na análise aqui presente. A taxa de juro sem risco associada a um dado investimento, por exemplo, depende diretamente do estado atual da economia. Um produto que se idealiza sem risco, como é o caso das obrigações do tesouro, vê a sua taxa de juro aumentar exatamente quando se começa a temer o seu incumprimento. Ao mesmo tempo, na generalidade dos países da zona euro, as taxas de juro associadas às obrigações do tesouro encontram-se em mínimos históricos.

Assim, uma boa ponderação dos valores a adotar para os vários parâmetros económicos é essencial.

Nos 50 anos de vida útil deste projeto vão ser ultrapassados vários ciclos económicos diferentes e, como tal, esta análise pode ver a precisão da sua previsão muito diminuída entretanto. A determinação com maior precisão dos custos envolvidos numa determinada solução poderia requerer modelos e ferramentas económicas mais robustos. Como ferramenta de apoio à decisão, no entanto, comparando diversas soluções e sujeitando todas aos mesmos critérios, esta tipologia de análise é válida e extremamente útil.

5.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

A modelação deste problema no programa de elementos finitos 2D SEEP/W envolveu muito trabalho. Muito desse trabalho poderia ter sido evitado caso tivesse sido utilizado à partida um *software* de modelação 3D. Futuramente, seria útil a validação dos dados obtidos na modelação em SEEP/W 2D através de uma modelação 3D.

Nas soluções nas quais é considerada a instalação de capacidade de bombagem, os gastos energéticos são muito pesados. Assim, acrescentaria valor a consideração da possibilidade de incorporar um sistema de produção energética ao projeto. A cobertura do parque, à cota +2,60 m, constitui uma praça que se crê não ter utilização específica. Uma das soluções passaria, por exemplo, pela instalação de painéis fotovoltaicos nessa zona. Embora do ponto de vista arquitetónico o alcance de uma solução que não constitua poluição visual seja desafiante, esta solução não deveria deixar de ser considerada tendo em conta a potencial poupança que pode acarretar.

No dimensionamento das bombas a utilizar neste projeto foram consideradas bombas de caudal constante. A variação do nível freático pode no entanto levar a que haja uma variação do caudal infiltrado, podendo ser necessária a instalação de um depósito de regularização ou, em alternativa, bombas de caudal variável, que permitam que uma variação da sua frequência de funcionamento e assim um ajuste aos caudais a bombar em cada momento.

Finalmente, a sustentabilidade não se esgota no aspeto económico do projeto. O setor da construção é responsável por 40% do consumo mundial de energia, 30% do consumo de matérias-primas, 25% da produção de resíduos sólidos, 25% do consumo de água e 33% de todas as emissões de gases de estufa [21]. O conceito de Análise Ciclo de Vida (ACV) abrange não só os custos económicos mas também os custos ambientais envolvidos, fazendo uma análise do tipo *cradle-to-grave* [22], traduzido para português como berço-ao-túmulo. Esta considera não só o custo monetário envolvido no fabrico de 1m³ de betão, como também a energia, as emissões de gases, matérias-primas e custos de reciclagem associados ao mesmo, começando por exemplo na extração das matérias-primas para a produção do cimento. É uma metodologia extremamente abrangente cuja aplicação no setor da construção ainda não tem uma prevalência significativa. Considerando que o betão é o material de construção que tem a maior quantidade de energia incorporada de todos os materiais, seria interessante aplicar esta metodologia à construção aqui presente reconhecendo, no entanto, que seria uma tarefa muitíssimo exigente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Terzaghi, K. *Erdbaumechanik*. Franz Deuticke, Wien, 1925.
- [2] Matos Fernandes, M. *Mecânica dos Solos – Conceitos e Princípios Fundamentais – Volume 1*. FEUP Edições, Porto, 2006.
- [3] Website da empresa Groundwater Engineering Pte Ltd, <http://www.groundwaterinternational.com/>
- [4] Cashman, P. M., Preene, M. *Groundwater Lowering in Construction*, Boca Raton, FL., 2012.
- [5] Preene, M., Roberts, T. O. L., Powrie, W *Groundwater control - design and practice - CIRIA report C515*, 2000
- [6] Xanthakos, P. P., Abramson, L. W., Bruce, D. A. *Ground Control and Improvement*. John Wiley and Sons, Nova Iorque, 1994.
- [7] US Department of Defense, *Dewatering and groundwater control – Unified Facilities Criteria*, 2004
- [8] Geo-Slope International, *Seepage Modeling with SEEP/W*, Geo-Slope International, Canada, 2012
- [9] Burke, G., Yoshida, H. *jet grouting*. In *Ground Improvement*, Third Edition, 208-256, CRC Press, Boca Raton, FL., 2012.
- [10] Croce, P., Flora, A., Modoni, G., *Jet Grouting – Technology, Design and Control*. CRC Press, Boca Raton, FL., 2014.
- [11] Eisenberger, I., Loren, G., *Life Cycle Costing: Practical Considerations*. DSN Progress Report, 1977.
- [12] Fuller, S. K., Petersen, S. R., *Life Cycle Costing Manual for the Federal Energy Management Program*, NIST Handbook 135, 1995.
- [13] United States Department of Energy, Hydraulic Institute, Europump. *Pump Life Cycle Costs*, 2011
- [14] Website <http://www.economicshelp.org>, acedido Junho de 2015
- [15] Website do Instituto Nacional de Estatística, <http://www.ine.pt>, acedido em Junho de 2015
- [16] Website da Autoridade Nacional de Comunicações, <http://www.anacom.pt>, acedido em Junho de 2015
- [17] Brealey, R. A., Myers, S. C., Allen, F. *Principles of corporate finance*. McGraw-Hill, Nova Iorque, 2011.
- [18] Portaria nº702-H/2008 de 29 de Julho de 2008, DR
- [19] Empresa Municipal de Transportes e Mobilidade de Lisboa, *Relatório anual de contas*, 2004.
- [20] Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos, *Preços de referência no mercado liberalizado de energia e gás natural em Portugal continental*, 17 de Julho de 2015.
- [21] United Nations Environment Programme, *Common carbon metric for measuring energy use and reporting greenhouse emissions from building operations*, 2006.

- [22] ISO 14040:2006 – environmental management – life cycle assessment – principles and framework. Genebra; 2006.
- [23] United States Services Administration, <http://www.gsa.gov>, acedido em Junho de 2015
- [24] Website do Banco de Portugal, <http://www.bportugal.pt>, acedido em Junho de 2015
- [25] Website da Agência de Gestão da Tesouraria e da Dívida Pública, www.igcp.pt, acedido em Junho de 2015
- [26] Website do Eurostat, <http://ec.europa.eu/eurostat>, acedido em Junho de 2015
- [27] EN1992-1-1: Eurocódigo 2 – Projeto de Estruturas de Betão
- [28] EN1992-1-7: Eurocódigo 7 – Projeto Geotécnico

ANEXOS

ANEXO 1 – VERIFICAÇÃO DA SEGURANÇA AO LEVANTAMENTO HIDRÁULICO DO ROLHÃO DE JET GROUTING

A.4 Coeficientes parciais para a verificação de estados limites de levantamento global (UPL)

(1)P Na verificação de um estado limite de levantamento global (UPL) devem ser aplicados os seguintes coeficientes parciais para as acções (γ_F):

- $\gamma_{G,dst}$ para as acções permanentes desfavoráveis (desestabilizantes);
- $\gamma_{G,stb}$ para as acções permanentes favoráveis (estabilizantes);
- $\gamma_{Q,dst}$ para as acções variáveis desfavoráveis (desestabilizantes).

NOTA: Os valores a atribuir a $\gamma_{G,dst}$, $\gamma_{G,stb}$ e $\gamma_{Q,dst}$ para utilização num dado país poderão ser encontrados no respectivo Anexo Nacional da presente Norma. Os valores recomendados são fornecidos no Quadro A.15.

Quadro A.15 – Coeficientes parciais para as acções (γ_F)

Acção	Símbolo	Valor
Permanente		
Desfavorável ^a	$\gamma_{G,dst}$	1,0
Favorável ^b	$\gamma_{G,stb}$	0,9
Variável		
Desfavorável ^a	$\gamma_{Q,dst}$	1,5
^a Desestabilizante		
^b Estabilizante		

A fase mais crítica no que toca à segurança à rotura do fundo por levantamento hidráulico vai ser a fase em que é atingida a cota máxima da escavação. A partir do momento em que comece a construção da superestrutura o fator de segurança vai aumentar continuamente à medida que mais peso é aplicado no fundo, contrariando a pressão elevatória ali aplicada.

	FS_1	Parâmetros adotados
Análise em tensões totais	$0,9 \times \gamma_{sat, jet} \times d_{jet}$	γ_w (kN/m ³) 10
Análise em tensões efetivas	$FS_2 = \frac{0,9 \times \gamma'_{jet} \times d_{jet}}{u - \gamma_w \times d_{jet}}$	
$1,0 = \frac{0,9 \times \gamma_{sat, jet} \times d_{jet}}{u}$	γ_{jet} jet grouting (kN/m ³)	20
	γ'_{jet} jet grouting (kN/m ³)	10
	k jet grouting (m/s)	1,00E-07
$1,0 = \frac{0,9 \times \gamma'_{jet} \times d_{jet}}{u - 0,9\gamma_w \times d_{jet}}$	k aluvionar (m/s)	4,00E-06
	$\leftrightarrow u$ k miocénico (m/s)	0,0001
	u, base (kPa)	117
	d, jet (m)	2

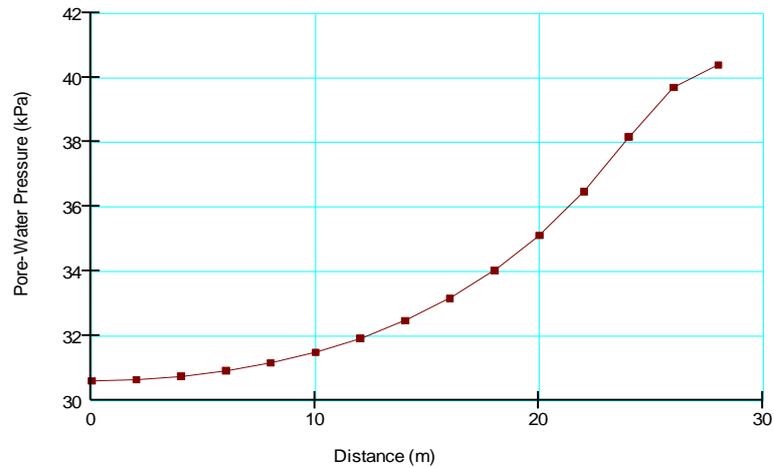
Tem de ser reduzida aumentada a permeabilidade do jet de modo a que os 36 kPa não sejam ultrapassados no final da escavação. Uma modelação em SEEP/W determinou que isto só é possível com um $k_{jet} = 5e-5$ m/s. Assumiu-se para o jet um $k_{jet} = 1e-5$ m/s.

ANEXO 2 – RESULTADOS DA MODELAÇÃO EM SEEP/W COM $\kappa=1E-5$ M/S

A2.1 MODELO AXISSIMÉTRICO

Modelo Axissimétrico			
Q (m ³ /s/rad)	Desenv. (rad)	QTOTAL (m ³ /s)	QTOTAL (m ³ /dia)
0,01574	6,28	0,09885	8540,4

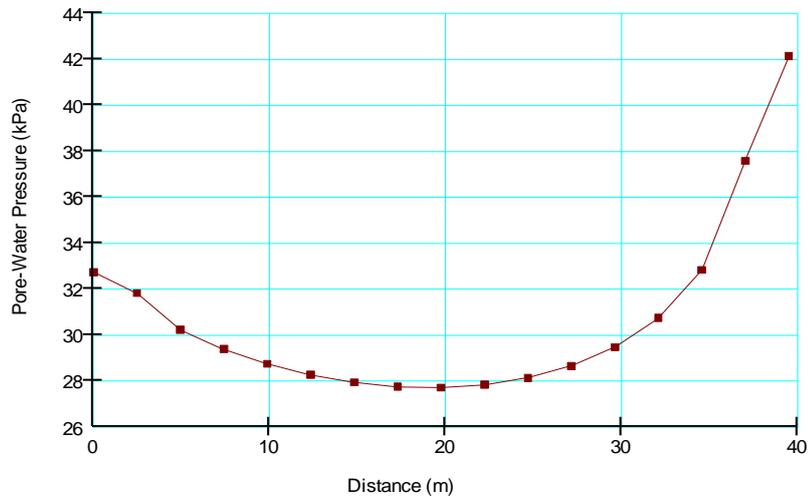
Axissimétrica - pressão na base do jet



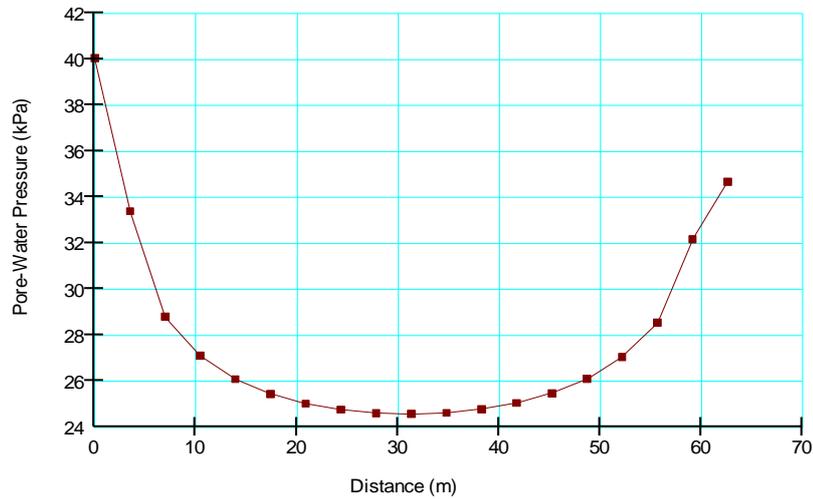
A2.2 MODELO 2D

Modelo 2D				
	Q (m ³ /s/m)	Desenv. (m)	QTOTAL (m ³ /s)	QTOTAL (m ³ /dia)
Secção A-A'	9,83E-04	62,6	6,15E-02	5315,83
Secção B-B'	1,07E-03	39,5	4,22E-02	3643,16
		TOTAL	1,31E-03	8958,99

2D - secção A-A' - pressão na base do jet



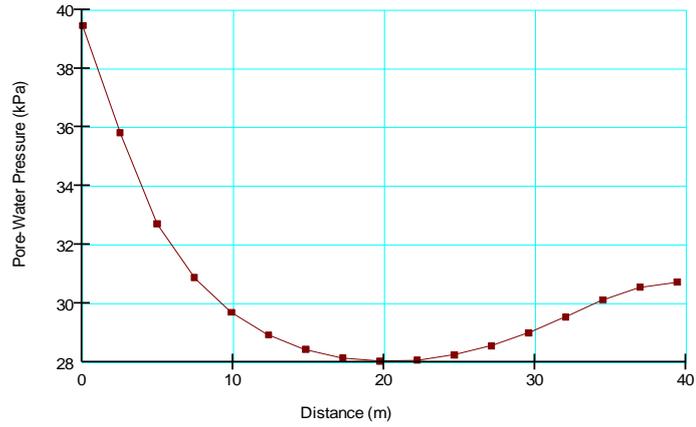
2D - secção B-B' - pressão na base do jet



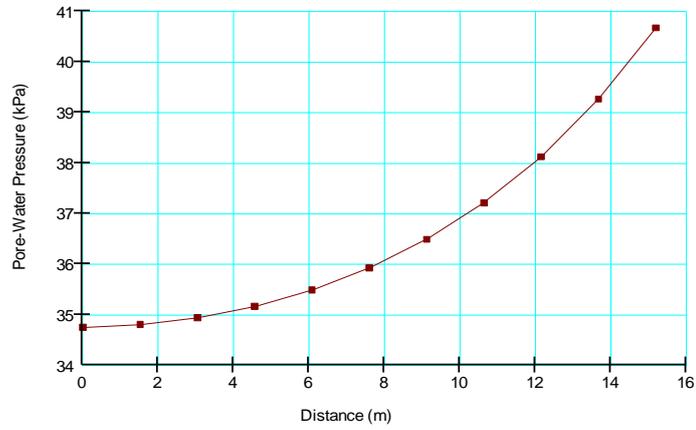
A2.3 MODELO MISTO

Modelo Misto				
	Q (m ³ /s/m,rad)	Desenv. (m,rad)	QTOTAL (m ³ /s)	QTOTAL (m ³ /dia)
2D	1,06E-03	31,6	3,34E-02	2884,23
Axissi. 14,5	1,02E-02	3,14	3,21E-02	2773,78
Axissi. 16,2	9,51E-03	3,14	2,99E-02	2581,85
TOTAL			9,54E-02	8239,85

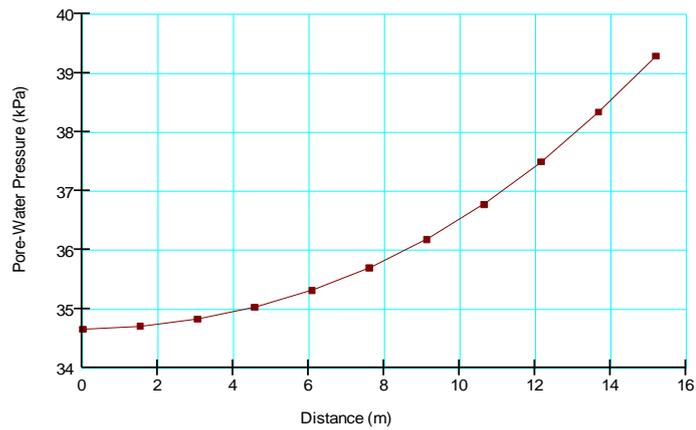
2D+Axis - 2D - pressão na base do Jet



2D+Axis - Axis 14,5m - pressão na base do jet



2D+Axis - Axis 16.2 m - pressão na base do jet



ANEXO 3 – RESULTADOS DA MODELAÇÃO EM SEEP/W COM $k=1E-5$ M/S CONSIDERANDO A BOMBAGEM A PARTIR DOS VÁRIOS PISOS

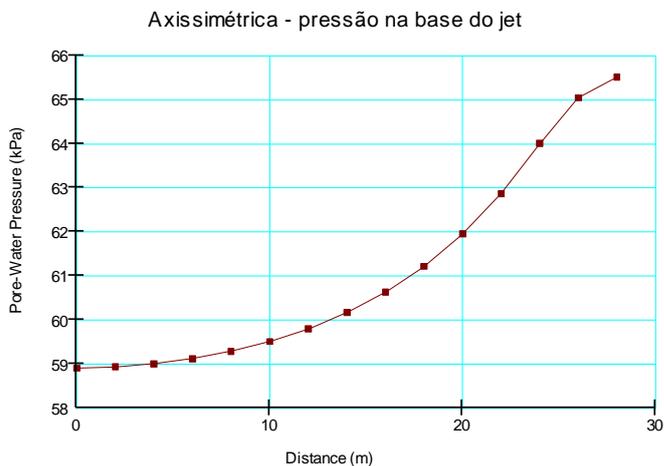
A3.1 BOMBAGEM A PARTIR DO PISO -4

Considerou-se, por simplificação, que o caudal a bombear a partir deste piso (piso de fundo) seria aproximadamente idêntico ao caudal a bombear a partir do fundo da escavação, cujos resultados foram apresentados no anexo 2.

A3.2 BOMBAGEM A PARTIR DO PISO -3

A3.2.1 MODELO AXISSIMÉTRICO

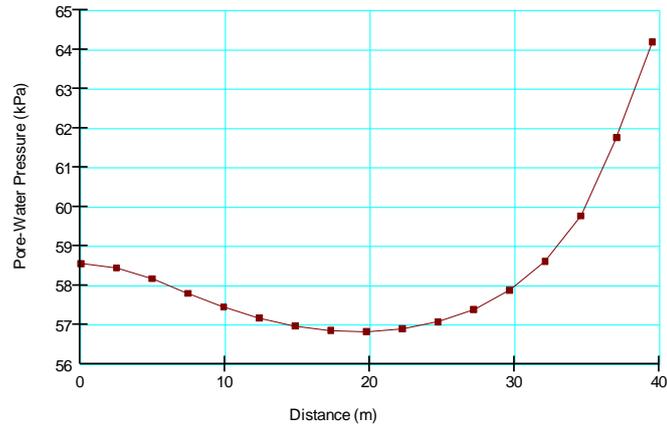
Axissimétrico				
	Q (m ³ /s/rad)	Desenv. (rad)	Q _{TOTAL} (m ³ /s)	Q _{TOTAL} (m ³ /dia)
Axissim.	0,010625	6,28	0,066725	5765,04



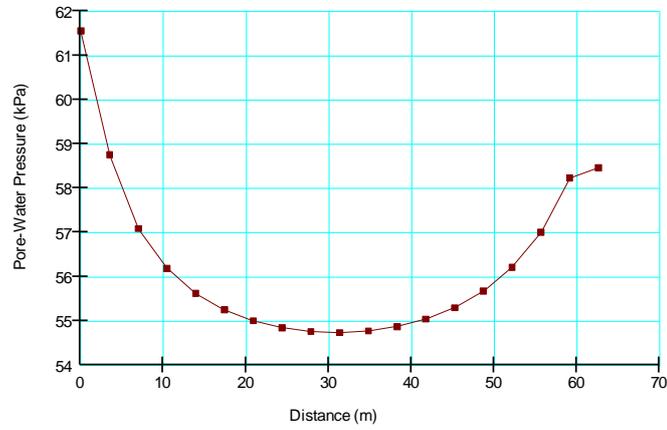
A3.2.2 MODELO 2D

2D				
	Q (m ³ /s/m)	Desenv. (m)	Q _{TOTAL} (m ³ /s)	Q _{TOTAL} (m ³ /dia)
Secção A-A'	6,73E-04	62,6	4,21E-02	3637,96
Secção B-B'	7,33E-04	39,5	2,90E-02	2502,64
TOTAL			1,31E-03	6140,60

2D - secção A-A' - pressão na base do jet

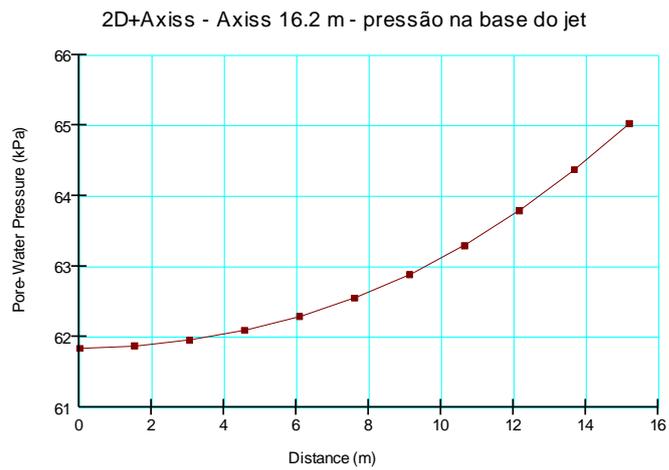
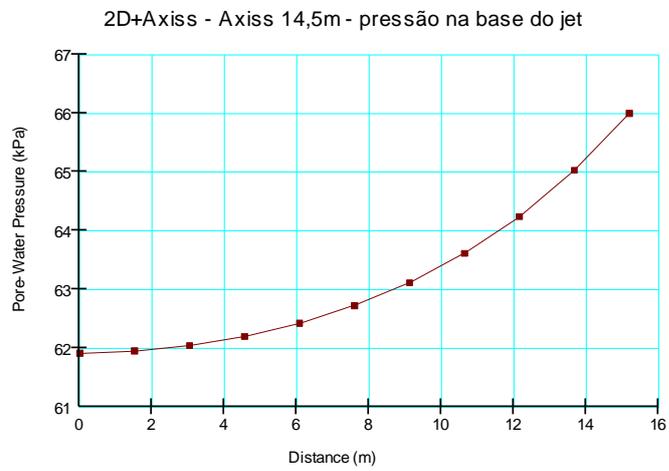
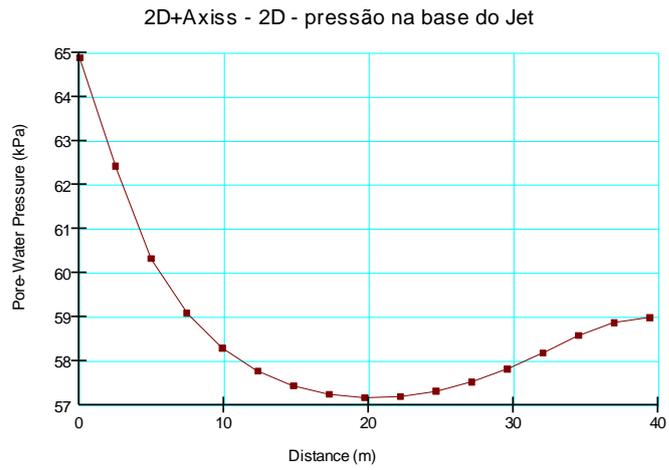


2D - secção B-B' - pressão na base do jet



A3.2.3 MODELO MISTO

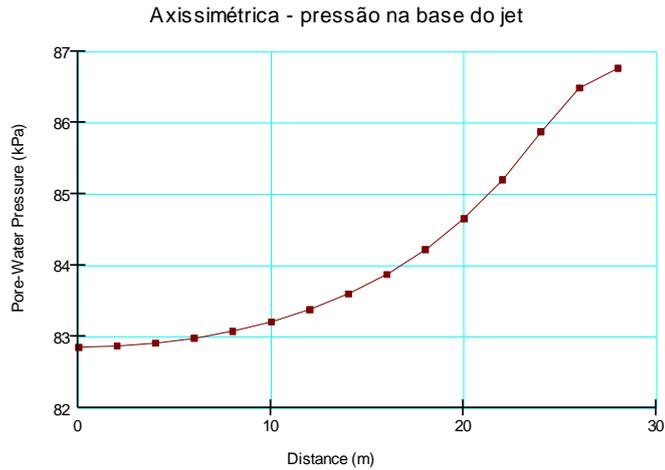
Misto				
	Q (m ³ /s/m,rad)	Desenv. (m,rad)	Q _{TOTAL} (m ³ /s)	Q _{TOTAL} (m ³ /dia)
2D	7,13E-04	31,6	2,25E-02	1946,88
Axissi. 14,5	6,90E-03	3,14	2,17E-02	1872,24
Axissi. 16,2	6,42E-03	3,14	2,02E-02	1742,74
TOTAL			6,44E-02	5561,86



A3.3 BOMBAGEM A PARTIR DO PISO -2

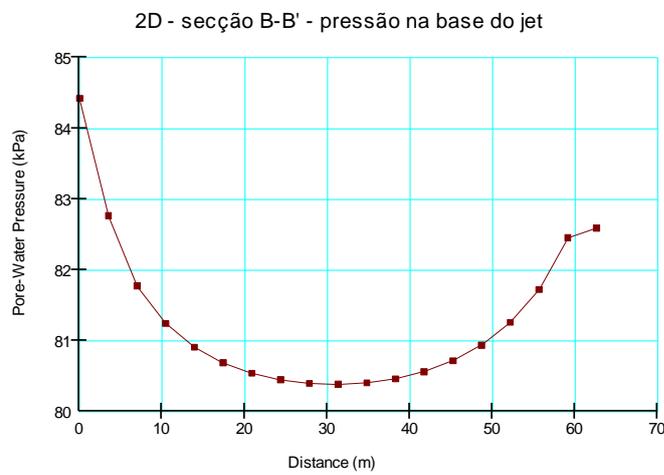
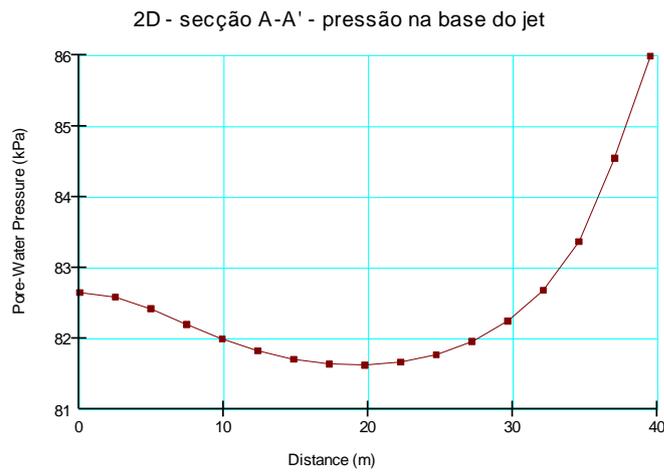
A3.3.1 MODELO AXISSIMÉTRICO

Axissimétrico				
	Q (m ³ /s/rad)	Desenv. (rad)	Q _{TOTAL} (m ³ /s)	Q _{TOTAL} (m ³ /dia)
Axissim.	0,006296	6,28	0,039539	3416,159



A3.3.2 MODELO 2D

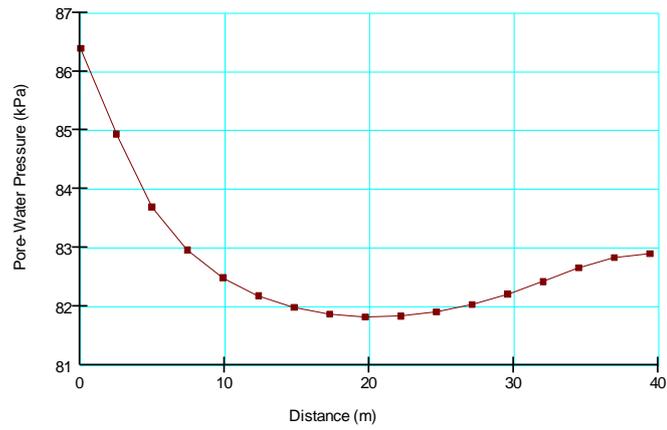
2D				
	Q (m ³ /s/m)	Desenv. (m)	Q _{TOTAL} (m ³ /s)	Q _{TOTAL} (m ³ /dia)
Secção A-A'	3,96E-04	62,6	2,48E-02	2141,23
Secção B-B'	4,35E-04	39,5	1,72E-02	1483,03
TOTAL			1,31E-03	3624,26



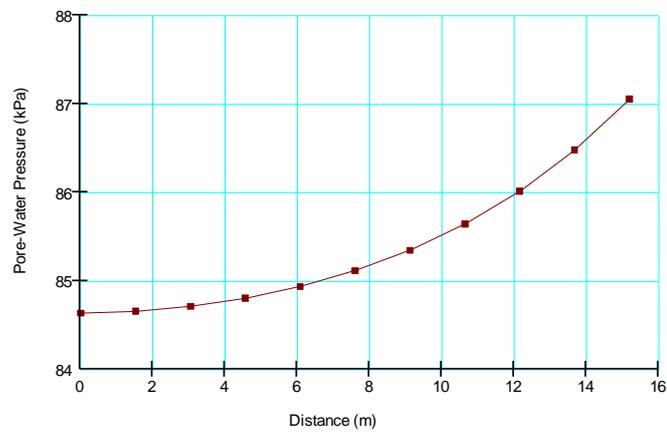
A3.3.3 MODELO MISTO

Misto				
	Q (m ³ /s/m,rad)	Desenv. (m,rad)	Q _{TOTAL} (m ³ /s)	Q _{TOTAL} (m ³ /dia)
2D	4,23E-04	31,6	1,34E-02	1153,72
Axissi. 14,5	4,09E-03	3,14	1,28E-02	1109,48
Axissi. 16,2	3,80E-03	3,14	1,20E-02	1032,72
	TOTAL		3,81E-02	3295,93

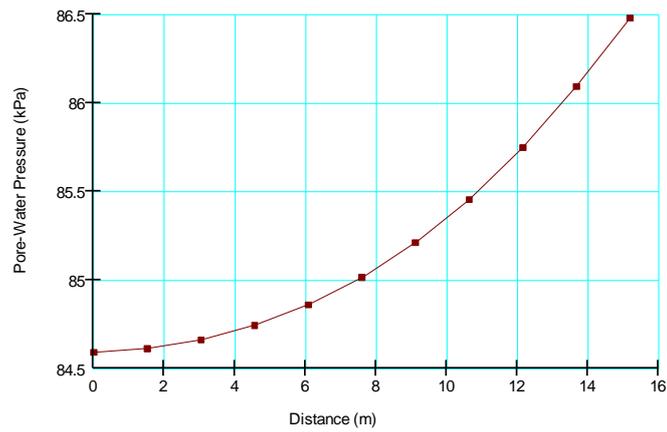
2D+Axis - 2D - pressão na base do Jet



2D+Axis - Axis 14,5m - pressão na base do jet



2D+Axis - Axis 16.2 m - pressão na base do jet



ANEXO 4 – CÁLCULO DO PESO DA ESTRUTURA

O peso da estrutura vai contribuir para a segurança da mesma em relação ao levantamento hidráulico, sendo necessário o seu cálculo.

Peso aproximado da estrutura					
	Área (m ²)	Espessura Altura (m)	Número	Volume (m ³)	Peso (kN)
Lajes	2470	0,4	4		
		0,6	1		
Pilares	Piso -1	0,09	2,25	21	7094,397 177359,9
	Piso -2	0,1225	2,4	21	
	Piso -3	0,16	2,4	21	
	Piso -4	0,2025	2,4	21	
Paredes Moldadas	3626	0,45	1		

Considerou-se que a estrutura está solidarizada com as paredes moldadas, integrantes estruturais da solução final, contabilizando estas no cálculo do peso da estrutura. Optou-se pela não contabilização do atrito lateral entre o solo e estas.

ANEXO 5 – ESCOLHA DAS BOMBAS ELEVATÓRIAS E DIMENSIONAMENTO DAS LAJES DE FUNDO PARA AS SOLUÇÕES COM BOMBAGEM

A5.1 BOMBAS ELEVATÓRIAS

Caudal a bombear em função do piso				
	Q _{TOTAL} (m ³ /s)	Q _{TOTAL} (m ³ /h)	Q _{TOTAL} (m ³ /dia)	Elevação (m)
Bombagem a partir do piso -4	0,095	343,3	8239,9	12,6
Bombagem a partir do piso -3	0,064	231,7	5561,9	9,3
Bombagem a partir do piso -2	0,038	137,3	3295,9	6,6

	Designação da Bomba	Q _{TOTAL} [m ³ /h]	Elevação [m]	Energia [kWh/a]	Energia Específica [kWh/m ³]	Custos Energéticos [€/a]	Custo Bomba + Instalação [€]	Custo Manutenção [€/a]
Piso -4	Grundfos SP 300-1N G	347	12,6	218150	0,0725	33631,66	16217,29	5676
Piso -3	Grundfos SP 215-1-A	242	9,31	135770	0,0669	20931,01	8720,35	1744
Piso -2	Grundfos SP 125-1-A	157	6,61	70653	0,0604	10892,41	7370,48	1474

A5.2 DIMENSIONAMENTO DAS LAJES DE FUNDO

Conhecendo o peso da estrutura e a altura e o peso específico do jet grouting, chega-se a um valor de u na base do jet que assegura segurança igual a aproximadamente 100 kPa. Pelo que foi visto no anexo 3, este valor não é atingido quando a extração é feita a partir de qualquer um dos pisos. Ainda assim, a pressão aplicada na base da laje vai ser diferente nos 3 casos, seguindo-se o dimensionamento das lajes de fundo para os casos em que a bombagem é realizada a partir do piso -4, -3 e -2.

Lajes de fundo maciças 2D		
e [m]		0,4
pp [kN/m ²]		10
d [m]		0,35
C25/30	fcd (MPa)	16,7
A500	f _{yd} (MPa)	434,8

Método do regulamento britânico			
l _y [m]	8	l _y /l _x	1,142857
l _x [m]	7		
As,min [m ² /m]	0,00053		

β_{sx}	M-	0,04
	M+	0,03

β_{sy}	M-	0,032
	M+	0,024

$$M_{sx} = \beta_{sx} \times S_d$$

$$M_{sy} = \beta_{sy} \times S_d$$

Piso -4									
u [kPa]	40	M _{sx-} [kN.m]	79,4	μ	0,03888	ω	0,04	As _{x-} [m ² /m]	0,000537
P _{sd} [kN/m ²]	40,5	M _{sx+} [kN.m]	59,5	μ	0,02916	ω	0,03	As _{x+} [m ² /m]	0,000403
Quant. Aço [kg/m ²]	13,224	M _{sy-} [kN.m]	63,5	μ	0,031104	ω	0,032	As _{y-} [m ² /m]	0,000429
Qt. Betão [m ³ /m ²]	0,4	M _{sy+} [kN.m]	47,6	μ	0,023328	ω	0,023	As _{y+} [m ² /m]	0,000313
Custo [€/m ²]	108,681								
Custo Total [€]	268443								

Rebaixamento Permanente do Nível da Água em Escavações

Piso -3									
u [kPa]	65	Msx- [kN.m]	145,5	μ	0,07128	ω	0,088	Asx- [m ² /m]	0,001181
Psd [kN/m ²]	74,25	Msx+ [kN.m]	109,1	μ	0,05346	ω	0,065	Asx+ [m ² /m]	0,000872
Quant. Aço [kg/m ²]	28,8121	Msy- [kN.m]	116,4	μ	0,057024	ω	0,069	Asy- [m ² /m]	0,000926
Qt. Betão [m ³ /m ²]	0,4	Msy+ [kN.m]	87,3	μ	0,042768	ω	0,051	Asy+ [m ² /m]	0,000684
Custo [€/m ²]	121,619								
Custo Total [€]	300399								

Piso -2									
u [kPa]	86	Msx- [kN.m]	201,1	μ	0,098496	ω	0,118	Asx- [m ² /m]	0,001583
Psd [kN/m ²]	102,6	Msx+ [kN.m]	150,8	μ	0,073872	ω	0,087	Asx+ [m ² /m]	0,001167
Quant. Aço [kg/m ²]	38,8383	Msy- [kN.m]	160,9	μ	0,078797	ω	0,094	Asy- [m ² /m]	0,001261
Qt. Betão [m ³ /m ²]	0,4	Msy+ [kN.m]	120,7	μ	0,059098	ω	0,069	Asy+ [m ² /m]	0,000926
Custo [€/m ²]	129,941								
Custo Total [€]	320953								

ANEXO 6 – DIMENSIONAMENTO DAS LAJES DE FUNDO E DA MALHA DE ANCORAGENS PARA AS SOLUÇÕES IMPERMEÁVEIS

A6.1– DIMENSIONAMENTO DA LAJE DE FUNDO ESPESSA

$$1 \quad 0,9 \times (\gamma_{sat, jet} \times d_{jet} + \frac{P_{Est}}{A_{Planta}} + \gamma_{BA} \times d_{laje})$$

$d_{laje} = 1,95 \text{ m}$

Laje de fundo maciça 2D		
e [m]		1,95
pp [kN/m ²]		48,75
d [m]		1,9
C25/30	fcd (MPa)	16,7
A500	fyd (MPa)	434,8

Método do regulamento britânico			
ly [m]	8	ly/lx	1,14
lx [m]	7		
As,min [m ² /m]		0,0029	

β _{sx}	M-	0,04
	M+	0,03

β _{sy}	M-	0,032
	M+	0,024

$$M_{sx} = \beta_{sx} \times S_d$$

$$M_{sy} = \beta_{sy} \times S_d$$

u [kPa]	115,5
Psd [kN/m ²]	90,1125

Msx- [kN.m]	176,6	μ	0,002935521	ω	0	Asx- [m ² /m]	0
Msx+ [kN.m]	132,5	μ	0,002201641	ω	0	Asx+ [m ² /m]	0

Quant. Aço [kg/m ²]	0,00585
Qt. Betão [m ³ /m ²]	1,95

Msy- [kN.m]	141,3	μ	0,002348417	ω	0	Asy- [m ² /m]	0
Msy+ [kN.m]	106,0	μ	0,001761312	ω	0	Asy+ [m ² /m]	0

Custo [€/m ²]	266,8231
Custo Total [€]	659053,1

$$\mu = \frac{M_{rd}}$$

$$\omega = \frac{A}{f_{yd}}$$

A6.2– DIMENSIONAMENTO DA LAJE DE FUNDO COM MALHA DE ANCORAGENS

Peso Estrutura [kN]	177352
Área em Planta [m²]	2470
Pressão na base [kPa]	120

1

$$0,9 \times \left(\gamma_{jet,sat} \times d_{jet} + \frac{P_{Est} + F_{anc}}{A_{Planta}} \right)$$

F_{anc} (kN)	53181,3
----------------	---------

Ancoragens Y1860/1640 5φ0,6"	
ftk (MPa)	1860
ft0,1k (MPa)	1640
φ (mm)	15,2
A (mm²)	907,3
Ptk (kN)	1687,6
Pa (kN)	1096,9 (=0,65Ptk)
Nº ancoragens	49,0

Custo associado à solução		
Ancoragens	Custo [€/m]	106,61
	Ltotal	490
	Custo [€]	52239
Laje	Custo [€]	350000
Custo total [€]		402239

Por simplificação, assumiu-se que a espessura desta laje é igual a 0,40 m. Assumiu-se para a laje um preço de 350.000€, em linha com os preços calculados anteriormente, mas superior visto que a quantidade de armadura presente nesta também é maior.

ANEXO 7 – DETERMINAÇÃO DOS CUSTOS ENVOLVIDOS NAS VÁRIAS SOLUÇÕES**A7.1 CUSTOS COMUNS ÀS VÁRIAS SOLUÇÕES****A7.1.1 ENSAIOS DE PROSPEÇÃO**

Ensaio de prospeção realizados			
Empresa Executora	Sigla	Profundidade (m)	Mudanças de Posição
Sopecate, 2002	SC1	25,5	5
Sopecate, 2002	SC2	30	
Sopecate, 2002	SC3	25,5	
Sopecate, 2002	SC4	30	
Sopecate, 2002	SC5	30,5	
Sopecate, 2002	SC6	31,5	
Geoma, 2000	S1	13,5	3
Geoma, 2000	S2	13,5	
Geoma, 2000	S3	12	
Geoma, 2000	S4	15,5	
Sopecate, Jan/Fev01	S1	13,5	2
Sopecate, Jan/Fev01	S2	15	
Sopecate, Jan/Fev01	S3	26	
Sopecate, Fev/Mar01	A	18,5	9
Sopecate, Fev/Mar01	B	23,5	
Sopecate, Fev/Mar01	C	20	
Sopecate, Fev/Mar01	D	22	
Sopecate, Fev/Mar01	E	17	
Sopecate, Fev/Mar01	F	18	
Sopecate, Fev/Mar01	G	23,5	
Sopecate, Fev/Mar01	H	20	
Sopecate, Fev/Mar01	I	16	
Sopecate, Fev/Mar01	J	19	
Tecnosol, 2004	S1E	15,5	2
Tecnosol, 2005	S2E	13,5	
Tecnosol, 2006	S3E	15,5	
TOTAL		524	21

Custos ensaios Prospeção	C. unitário	Quantidade	Total
Mobilização equipamentos	1.500,00 €	4	6.000,00 €
Mudança posição equipamentos	75,00 €	21	1.575,00 €
Furação em solo ou rocha branda (por m)	40,00 €	524	20.960,00 €
Ensaio SPT (por ensaio)	25,00 €	23	575,00 €
Ensaio Lefranc (por ensaio)	100,00 €	11	1.100,00 €
Ensaio Pressiométrico (por ensaio)	300,00 €	3	900,00 €
			<u>31.110,00 €</u>

A7.1.2 CUSTOS ASSOCIADOS À CONSTRUÇÃO

Custo Paredes Moldadas	
Mobilização Equipamento	30.000,00 €
Escavação e Execução Painéis (por m2)	120,00 €
Área total de painéis executados (m2)	3626
Custo Total (€)	<u>465.120,00 €</u>

Custo Ancoragens					
Ancoragens	L (m)	Quantidade	L _{Total} (m)	Custo (por m)	Custo Total
1º nível (5x0,6")	23	68	1564	82,50 €	
2º nível (φ50)	18	68	1224	75,00 €	319.705,00 €
3º nível (φ50)	13	97	1261	75,00 €	
Mobilização de Equipamento (€)					<u>4.300,00 €</u>

Custo Escavação	
Escavação com rebaixamento NF (por m3)	6,00 €
Área da Escavação em planta (m2)	2470
Volume Escavado (m3)	31492,5
Custo Total	<u>188.955,00 €</u>

Jet Grouting	
Mobilização Equipamento	7.680,00 €
Preço ϕ 1200 (por m)	67,80 €
Preço ϕ 1600 (por m)	87,20 €

nº colunas	ϕ (mm)	Espess. (m)	Ltotal (m)	Custo Jet
23	1200	2		
26	1200	3,8	216,8	
18	1200	4		
777	1600	2		239.856 €
285	1600	3		
13	1600	3	2494	
8	1600	4		
7	1600	2		

Custo Edificação	
Custo Parque (€/m ²)	300
Área construída (m ²)	9880
Preço (€)	2964000

A7.1.3 CUSTOS DE MANUTENÇÃO

Custo Manutenção	
nº lugares	335
Custo (€/dia/lugar)	0,24
Custo (€/dia)	80,4
Custo (€/ano)	29346

O preço de manutenção foi extrapolado a partir de valores presentes em relatórios anuais de contas da Emel, E.M.S.A..

A7.1.4 CUSTO DE PROJETO

Custo Projeto			
Tabelas de honorários em desuso - categoria III			
$p=9-1,5 \times \log(C/60)+13,5 \times [1/\log(C/60)]+0,000005 \times C/60$			
p [%]	4,87	Custo	204.861,90 €

Custo Total Construção
4.208.745,84 €

ANEXO 8 – ANÁLISE CUSTO CICLO DE VIDA

Dados	r	2,45%	Solução com bombagem a partir do piso -4
	e	2,5%	
	t	50	

Custos de Investimento	Quantia	Ano de ocorrência	Fórmula Cálculo	Valor Atual
Projeto	204.861,90 €	0	N. A.	204.861,90 €
Construção	4.208.745,84 €	0	N. A.	4.208.745,84 €
Aquisição e Instalação de Bombas Elevatórias	16.217,00 €	0	SPW; 0; 2,45%	16.217,00 €
		0	SPW; 0; 2,45%	16.217,00 €
		15	SPW; 15; 2,45%	11.279,53 €
		30	SPW; 30; 2,45%	7.845,34 €
		45	SPW; 45; 2,45%	5.456,73 €
Custo Laje de Fundo	268.443,01 €	0	N. A.	268.443,01 €
Valor residual	- 8.108,50 €	50	SPW; 50; 2,45%	- 2.417,37 €

Custos Operacionais	Quantia	Ano de ocorrência	Fórmula Cálculo	Valor Atual
Operação, Manutenção e Reparação	29.346,00 €	Anual	UPW;50;2,45%	840.700,16 €
Eletricidade, bombas	33.631,66 €	Anual	UPWmod;50;2,45%;2,5%	1.702.678,26 €
Custo de manutenção das bombas	5.676,00 €	Anual	UPW;50;2,45%	162.605,26 €
Custo de demolição			Não contabilizado	

Total	7.442.632,67 €
--------------	-----------------------

Dados	r	2,45%	Solução com bombagem a partir do piso -3
	e	2,5%	
	t	50	

Custos de Investimento	Quantia	Ano de ocorrência	Fórmula Cálculo	Valor Atual
Projeto	204.861,90 €	0	N. A.	204.861,90 €
Construção	4.208.745,84 €	0	N. A.	4.208.745,84 €
Aquisição e Instalação de Bombas Elevatórias	8.720,35 €	0	SPW; 0; 2,45%	8.720,35 €
		0	SPW; 0; 2,45%	8.720,35 €
		15	SPW; 15; 2,45%	6.065,33 €
		30	SPW; 30; 2,45%	4.218,66 €
		45	SPW; 45; 2,45%	2.934,24 €
Custo Laje de Fundo	300.399,12 €	0	N. A.	300.399,12 €
Valor residual	- 4.360,18 €	50	SPW; 50; 2,45%	- 1.299,89 €

Custos Operacionais	Quantia	Ano de ocorrência	Fórmula Cálculo	Valor Atual
Operação, Manutenção e Reparação	29.346,00 €	Anual	UPW;50;2,45%	840.700,16 €
Eletricidade, bombas	20.931,01 €	Anual	UPWmod;50;2,45%;2,5%	1.059.679,35 €
Custo de manutenção das bombas	1.744,00 €	Anual	UPW;50;2,45%	49.961,87 €
Custo de demolição			Não contabilizado	

Total	6.693.707,29 €
--------------	-----------------------

Dados	r	2,45%	Solução com bombagem a partir do piso -2
	e	2,5%	
	t	50	

Custos de Investimento	Quantia	Ano de ocorrência	Fórmula Cálculo	Valor Atual
Projeto	204.861,90 €	0	N. A.	204.861,90 €
Construção	4.208.745,84 €	0	N. A.	4.208.745,84 €
Aquisição e Instalação de Bombas Elevatórias	7.370,48 €	0	N. A.	7.370,48 €
		0	N. A.	7.370,48 €
		15	SPW; 15; 2,45%	5.126,45 €
		30	SPW; 30; 2,45%	3.565,64 €
		45	SPW; 45; 2,45%	2.480,03 €
Custo Laje de Fundo	320.953,15 €	0	N. A.	320.953,15 €
Valor residual	- 3.685,24 €	50	SPW; 50; 2,45%	- 1.098,67 €

Custos Operacionais	Quantia	Ano de ocorrência	Fórmula Cálculo	Valor Atual
Operação, Manutenção e Reparação	29.346,00 €	Anual	UPW;50;2,45%	840.700,16 €
Eletricidade, bombagem	10.892,41 €	Anual	UPWmod;50;2,45%;2,5%	551.452,70 €
Custo de manutenção das bombas	1.474,00 €	Anual	UPW;50;2,45%	42.226,95 €
Custo de demolição			Não contabilizado	

			Total	6.193.755,10 €
Dados	r	2,45%	Solução com laje de fundo espessa	
	e	2,5%		
	t	50		

Custos de Investimento	Quantia	Ano de ocorrência	Fórmula Cálculo	Valor Atual
Projeto	204.861,90 €	0	N. A.	204.861,90 €
Construção	4.208.745,84 €	0	N. A.	4.208.745,84 €
Construção da Laje de fundo	659.053,08 €	0	N. A.	659.053,08 €
Valor residual	Não contabilizado			

Custos Operacionais	Quantia	Ano de ocorrência	Fórmula Cálculo	Valor Atual
Operação, Manutenção e Reparação	24.455,00 €	Anual	UPW;50;2,45%	700.583,47 €
Custo de demolição	Não contabilizado			

Total	5.773.244,29 €
--------------	-----------------------

Dados	r	2,45%	Solução com malha de ancoragens
	e	2,5%	
	t	50	

Custos de Investimento	Quantia	Ano de ocorrência	Fórmula Cálculo	Valor Atual
Projeto	204.861,90 €	0	N. A.	204.861,90 €
Construção	4.208.745,84 €	0	N. A.	4.208.745,84 €
Custos associados unicamente à solução	402.238,90 €	0	N. A.	402.238,90 €
Valor residual	Não contabilizado			

Custos Operacionais	Quantia	Ano de ocorrência	Fórmula Cálculo	Valor Atual
Operação, Manutenção e Reparação	24.455,00 €	Anual	UPW;50;2,45%	700.583,47 €
Custo de demolição	Não contabilizado			

Total	5.516.430,11 €
-------	----------------

ANEXO 9 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE À ALTERAÇÃO DA TAXA DE VARIAÇÃO DO PREÇO DA ELETRICIDADE DE 2,5% PARA 4,5%

Dados	r	2,45%	Solução com bombagem a partir do piso -4
	e	4,5%	
	t	50	

Custos de Investimento	Quantia	Ano de ocorrência	Fórmula Cálculo	Valor Atual
Projeto	204.861,90 €	0	N. A.	204.861,90 €
Construção	4.208.745,84 €	0	N. A.	4.208.745,84 €
Aquisição e Instalação de Bombas Elevatórias	16.217,00 €	0	SPW; 0; 2,45%	16.217,00 €
		0	SPW; 0; 2,45%	16.217,00 €
		15	SPW; 15; 2,45%	11.279,53 €
		30	SPW; 30; 2,45%	7.845,34 €
		45	SPW; 45; 2,45%	5.456,73 €
Custo Laje de Fundo	268.443,01 €	0	N. A.	268.443,01 €
Valor residual	- 8.108,50 €	50	SPW; 50; 2,45%	- 2.417,37 €

Custos Operacionais	Quantia	Ano de ocorrência	Fórmula Cálculo	Valor Atual
Operação, Manutenção e Reparação	29.346,00 €	Anual	UPW;50;2,45%	840.700,16 €
Eletricidade, bombas	33.631,66 €	Anual	UPWmod;50;2,45%;2,5%	2.902.257,41 €
Custo de manutenção das bombas	5.676,00 €	Anual	UPW;50;2,45%	162.605,26 €
Custo de demolição			Não contabilizado	

Total	8.642.211,82 €
--------------	-----------------------

Dados	r	2,45%	Solução com bombagem a partir do piso -3
	e	4,5%	
	t	50	

Custos de Investimento	Quantia	Ano de ocorrência	Fórmula Cálculo	Valor Atual
Projeto	204.861,90 €	0	N. A.	204.861,90 €
Construção	4.208.745,84 €	0	N. A.	4.208.745,84 €
Aquisição e Instalação de Bombas Elevatórias	8.720,35 €	0	SPW; 0; 2,45%	8.720,35 €
		0	SPW; 0; 2,45%	8.720,35 €
		15	SPW; 15; 2,45%	6.065,33 €
		30	SPW; 30; 2,45%	4.218,66 €
		45	SPW; 45; 2,45%	2.934,24 €
Custo Laje de Fundo	300.399,12 €	0	N. A.	300.399,12 €
Valor residual	- 4.360,18 €	50	SPW; 50; 2,45%	- 1.299,89 €

Custos Operacionais	Quantia	Ano de ocorrência	Fórmula Cálculo	Valor Atual
Operação, Manutenção e Reparação	29.346,00 €	Anual	UPW;50;2,45%	840.700,16 €
Eletricidade, bombas	20.931,01 €	Anual	UPWmod;50;2,45%;2,5%	1.806.249,79 €
Custo de manutenção das bombas	1.744,00 €	Anual	UPW;50;2,45%	49.961,87 €
Custo de demolição			Não contabilizado	

Total 7.440.277,73 €

Dados	r	2,45%
	e	4,5%
	t	50

Solução com bombagem a partir do piso -2

Custos de Investimento	Quantia	Ano de ocorrência	Fórmula Cálculo	Valor Atual
Projeto	204.861,90 €	0	N. A.	204.861,90 €
Construção	4.208.745,84 €	0	N. A.	4.208.745,84 €
Aquisição e Instalação de Bombas Elevatórias	7.370,48 €	0	N. A.	7.370,48 €
		0	N. A.	7.370,48 €
		15	SPW; 15; 2,45%	5.126,45 €
		30	SPW; 30; 2,45%	3.565,64 €
		45	SPW; 45; 2,45%	2.480,03 €
Custo Laje de Fundo	320.953,15 €	0	N. A.	320.953,15 €
Valor residual	- 3.685,24 €	50	SPW; 50; 2,45%	- 1.098,67 €

Custos Operacionais	Quantia	Ano de ocorrência	Fórmula Cálculo	Valor Atual
Operação, Manutenção e Reparação	29.346,00 €	Anual	UPW;50;2,45%	840.700,16 €
Eletricidade, bombagem	10.892,41 €	Anual	UPWmod;50;2,45%;2,5%	939.964,83 €
Custo de manutenção das bombas	1.474,00 €	Anual	UPW;50;2,45%	42.226,95 €
Custo de demolição			Não contabilizado	

Total 6.582.267,23 €

Dados	r	2,45%	Solução com laje de fundo espessa
	e	4,5%	
	t	50	

Custos de Investimento	Quantia	Ano de ocorrência	Fórmula Cálculo	Valor Atual
Projeto	204.861,90 €	0	N. A.	204.861,90 €
Construção	4.208.745,84 €	0	N. A.	4.208.745,84 €
Construção da Laje de fundo	659.053,08 €	0	N. A.	659.053,08 €
Valor residual	Não contabilizado			

Custos Operacionais	Quantia	Ano de ocorrência	Fórmula Cálculo	Valor Atual
Operação, Manutenção e Reparação	24.455,00 €	Anual	UPW;50;2,45%	700.583,47 €
Custo de demolição	Não contabilizado			

Total 5.773.244,29 €

Dados	r	2,45%	Solução com malha de ancoragens
	e	4,5%	
	t	50	

Custos de Investimento	Quantia	Ano de ocorrência	Fórmula Cálculo	Valor Atual
Projeto	204.861,90 €	0	N. A.	204.861,90 €
Construção	4.208.745,84 €	0	N. A.	4.208.745,84 €
Custos associados unicamente à solução	402.238,90 €	0	N. A.	402.238,90 €
Valor residual	Não contabilizado			

Custos Operacionais	Quantia	Ano de ocorrência	Fórmula Cálculo	Valor Atual
Operação, Manutenção e Reparação	24.455,00 €	Anual	UPW;50;2,45%	700.583,47 €
Custo de demolição	Não contabilizado			

Total	5.516.430,11 €
-------	----------------

ANEXO 10 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE À ALTERAÇÃO DA TAXA DE VARIAÇÃO DO PREÇO DA ELETRICIDADE DE 2,5% PARA 0,5%

Dados	r	2,45%	Solução com bombagem a partir do piso -4
	e	0,5%	
	t	50	

Custos de Investimento	Quantia	Ano de ocorrência	Fórmula Cálculo	Valor Atual
Projeto	204.861,90 €	0	N. A.	204.861,90 €
Construção	4.208.745,84 €	0	N. A.	4.208.745,84 €
Aquisição e Instalação de Bombas Elevatórias	16.217,00 €	0	SPW; 0; 2,45%	16.217,00 €
		0	SPW; 0; 2,45%	16.217,00 €
		15	SPW; 15; 2,45%	11.279,53 €
		30	SPW; 30; 2,45%	7.845,34 €
		45	SPW; 45; 2,45%	5.456,73 €
Custo Laje de Fundo	268.443,01 €	0	N. A.	268.443,01 €
Valor residual	- 8.108,50 €	50	SPW; 50; 2,45%	- 2.417,37 €

Custos Operacionais	Quantia	Ano de ocorrência	Fórmula Cálculo	Valor Atual
Operação, Manutenção e Reparação	29.346,00 €	Anual	UPW;50;2,45%	840.700,16 €
Eletricidade, bombas	33.631,66 €	Anual	UPWmod;50;2,45%;2,5%	1.070.215,35 €
Custo de manutenção das bombas	5.676,00 €	Anual	UPW;50;2,45%	162.605,26 €
Custo de demolição			Não contabilizado	

Total	6.810.169,76 €
--------------	-----------------------

Dados	r	2,45%	Solução com bombagem a partir do piso -3
	e	0,5%	
	t	50	

Custos de Investimento	Quantia	Ano de ocorrência	Fórmula Cálculo	Valor Atual
Projeto	204.861,90 €	0	N. A.	204.861,90 €
Construção	4.208.745,84 €	0	N. A.	4.208.745,84 €
Aquisição e Instalação de Bombas Elevatórias	8.720,35 €	0	SPW; 0; 2,45%	8.720,35 €
		0	SPW; 0; 2,45%	8.720,35 €
		15	SPW; 15; 2,45%	6.065,33 €
		30	SPW; 30; 2,45%	4.218,66 €
		45	SPW; 45; 2,45%	2.934,24 €
Custo Laje de Fundo	300.399,12 €	0	N. A.	300.399,12 €
Valor residual	- 4.360,18 €	50	SPW; 50; 2,45%	- 1.299,89 €

Custos Operacionais	Quantia	Ano de ocorrência	Fórmula Cálculo	Valor Atual
Operação, Manutenção e Reparação	29.346,00 €	Anual	UPW;50;2,45%	840.700,16 €
Eletricidade, bombas	20.931,01 €	Anual	UPWmod;50;2,45%;2,5%	666.059,54 €
Custo de manutenção das bombas	1.744,00 €	Anual	UPW;50;2,45%	49.961,87 €
Custo de demolição			Não contabilizado	

Total	6.300.087,48 €
--------------	-----------------------

Dados	r	2,45%	Solução com bombagem a partir do piso -2
	e	0,5%	
	t	50	

Custos de Investimento	Quantia	Ano de ocorrência	Fórmula Cálculo	Valor Atual
Projeto	204.861,90 €	0	N. A.	204.861,90 €
Construção	4.208.745,84 €	0	N. A.	4.208.745,84 €
Aquisição e Instalação de Bombas Elevatórias	7.370,48 €	0	N. A.	7.370,48 €
		0	N. A.	7.370,48 €
		15	SPW; 15; 2,45%	5.126,45 €
		30	SPW; 30; 2,45%	3.565,64 €
		45	SPW; 45; 2,45%	2.480,03 €
Custo Laje de Fundo	320.953,15 €	0	N. A.	320.953,15 €
Valor residual	- 3.685,24 €	50	SPW; 50; 2,45%	- 1.098,67 €

Custos Operacionais	Quantia	Ano de ocorrência	Fórmula Cálculo	Valor Atual
Operação, Manutenção e Reparação	29.346,00 €	Anual	UPW;50;2,45%	840.700,16 €
Eletricidade, bombagem	10.892,41 €	Anual	UPWmod;50;2,45%;2,5%	346.614,60 €
Custo de manutenção das bombas	1.474,00 €	Anual	UPW;50;2,45%	42.226,95 €
Custo de demolição			Não contabilizado	

Total	5.988.917,00 €
--------------	-----------------------

Dados	r	2,45%	Solução com laje de fundo espessa
	e	0,5%	
	t	50	

Custos de Investimento	Quantia	Ano de ocorrência	Fórmula Cálculo	Valor Atual
Projeto	204.861,90 €	0	N. A.	204.861,90 €
Construção	4.208.745,84 €	0	N. A.	4.208.745,84 €
Construção da Laje de fundo	659.053,08 €	0	N. A.	659.053,08 €
Valor residual	Não contabilizado			

Custos Operacionais	Quantia	Ano de ocorrência	Fórmula Cálculo	Valor Atual
Operação, Manutenção e Reparação	24.455,00 €	Anual	UPW;50;2,45%	700.583,47 €
Custo de demolição	Não contabilizado			

Total	5.773.244,29 €
-------	----------------

Dados	r	2,45%	Solução com malha de ancoragens
	e	0,5%	
	t	50	

Custos de Investimento	Quantia	Ano de ocorrência	Fórmula Cálculo	Valor Atual
Projeto	204.861,90 €	0	N. A.	204.861,90 €
Construção	4.208.745,84 €	0	N. A.	4.208.745,84 €
Custos associados unicamente à solução	402.238,90 €	0	N. A.	402.238,90 €
Valor residual	Não contabilizado			

Custos Operacionais	Quantia	Ano de ocorrência	Fórmula Cálculo	Valor Atual
Operação, Manutenção e Reparação	24.455,00 €	Anual	UPW;50;2,45%	700.583,47 €
Custo de demolição	Não contabilizado			

Total	5.516.430,11 €
-------	----------------

ANEXO 11 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE À ALTERAÇÃO DA TAXA DE INFLAÇÃO DE 2,0% PARA 0,0%

Dados	r	4,5%	Solução com bombagem a partir do piso -4
	e	2,5%	
	t	50	

Custos de Investimento	Quantia	Ano de ocorrência	Fórmula Cálculo	Valor Atual
Projeto	204.861,90 €	0	N. A.	204.861,90 €
Construção	4.208.745,84 €	0	N. A.	4.208.745,84 €
Aquisição e Instalação de Bombas Elevatórias	16.217,00 €	0	SPW; 0; 2,45%	16.217,00 €
		0	SPW; 0; 2,45%	16.217,00 €
		15	SPW; 15; 2,45%	8.379,66 €
		30	SPW; 30; 2,45%	4.329,94 €
		45	SPW; 45; 2,45%	2.237,37 €
Custo Laje de Fundo	268.443,01 €	0	N. A.	268.443,01 €
Valor residual	- 8.108,50 €	50	SPW; 50; 2,45%	- 897,69 €

Custos Operacionais	Quantia	Ano de ocorrência	Fórmula Cálculo	Valor Atual
Operação, Manutenção e Reparação	29.346,00 €	Anual	UPW;50;2,45%	579.935,88 €
Eletricidade, bombas	33.631,66 €	Anual	UPWmod;50;2,45%;2,5%	1.067.747,81 €
Custo de manutenção das bombas	5.676,00 €	Anual	UPW;50;2,45%	112.169,16 €
Custo de demolição			Não contabilizado	

Total	6.488.386,88 €
--------------	-----------------------

Dados	r	4,5%	Solução com bombagem a partir do piso -3
	e	2,5%	
	t	50	

Custos de Investimento	Quantia	Ano de ocorrência	Fórmula Cálculo	Valor Atual
Projeto	204.861,90 €	0	N. A.	204.861,90 €
Construção	4.208.745,84 €	0	N. A.	4.208.745,84 €
Aquisição e Instalação de Bombas Elevatórias	8.720,35 €	0	SPW; 0; 2,45%	8.720,35 €
		0	SPW; 0; 2,45%	8.720,35 €
		15	SPW; 15; 2,45%	4.505,98 €
		30	SPW; 30; 2,45%	2.328,33 €
		45	SPW; 45; 2,45%	1.203,10 €
Custo Laje de Fundo	300.399,12 €	0	N. A.	300.399,12 €
Valor residual	- 4.360,18 €	50	SPW; 50; 2,45%	- 482,71 €

Custos Operacionais	Quantia	Ano de ocorrência	Fórmula Cálculo	Valor Atual
Operação, Manutenção e Reparação	29.346,00 €	Anual	UPW;50;2,45%	579.935,88 €
Eletricidade, bombas	20.931,01 €	Anual	UPWmod;50;2,45%;2,5%	664.523,85 €
Custo de manutenção das bombas	1.744,00 €	Anual	UPW;50;2,45%	34.464,94 €
Custo de demolição			Não contabilizado	

Total 6.017.926,93 €

Dados	r	4,5%	Solução com bombagem a partir do piso -2
	e	2,5%	
	t	50	

Custos de Investimento	Quantia	Ano de ocorrência	Fórmula Cálculo	Valor Atual
Projeto	204.861,90 €	0	N. A.	204.861,90 €
Construção	4.208.745,84 €	0	N. A.	4.208.745,84 €
Aquisição e Instalação de Bombas Elevatórias	7.370,48 €	0	N. A.	7.370,48 €
		0	N. A.	7.370,48 €
		15	SPW; 15; 2,45%	3.808,48 €
		30	SPW; 30; 2,45%	1.967,92 €
		45	SPW; 45; 2,45%	1.016,86 €
Custo Laje de Fundo	320.953,15 €	0	N. A.	320.953,15 €
Valor residual	- 3.685,24 €	50	SPW; 50; 2,45%	- 407,99 €

Custos Operacionais	Quantia	Ano de ocorrência	Fórmula Cálculo	Valor Atual
Operação, Manutenção e Reparação	29.346,00 €	Anual	UPW;50;2,45%	579.935,88 €
Eletricidade, bombagem	10.892,41 €	Anual	UPWmod;50;2,45%;2,5%	345.815,43 €
Custo de manutenção das bombas	1.474,00 €	Anual	UPW;50;2,45%	29.129,20 €
Custo de demolição			Não contabilizado	

Total 5.710.567,63 €

Dados	r	4,5%	Solução com laje de fundo espessa
	e	2,5%	
	t	50	

Custos de Investimento	Quantia	Ano de ocorrência	Fórmula Cálculo	Valor Atual
Projeto	204.861,90 €	0	N. A.	204.861,90 €
Construção	4.208.745,84 €	0	N. A.	4.208.745,84 €
Construção da Laje de fundo	659.053,08 €	0	N. A.	659.053,08 €
Valor residual	Não contabilizado			

Custos Operacionais	Quantia	Ano de ocorrência	Fórmula Cálculo	Valor Atual
Operação, Manutenção e Reparação	24.455,00 €	Anual	UPW;50;2,45%	483.279,90 €
Custo de demolição	Não contabilizado			

Total 5.555.940,73 €

Dados	r	4,5%	Solução com malha de ancoragens
	e	2,5%	
	t	50	

Custos de Investimento	Quantia	Ano de ocorrência	Fórmula Cálculo	Valor Atual
Projeto	204.861,90 €	0	N. A.	204.861,90 €
Construção	4.208.745,84 €	0	N. A.	4.208.745,84 €
Custos associados unicamente à solução	402.238,90 €	0	N. A.	402.238,90 €
Valor residual	Não contabilizado			

Custos Operacionais	Quantia	Ano de ocorrência	Fórmula Cálculo	Valor Atual
Operação, Manutenção e Reparação	24.455,00 €	Anual	UPW;50;2,45%	483.279,90 €
Custo de demolição	Não contabilizado			

Total	5.299.126,54 €
--------------	-----------------------

ANEXO 12 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE À ALTERAÇÃO DA TAXA DE INFLAÇÃO DE 2,0% PARA 4,0%

Dados	r	0,48%	Solução com bombagem a partir do piso -4
	e	2,5%	
	t	50	

Custos de Investimento	Quantia	Ano de ocorrência	Fórmula Cálculo	Valor Atual
Projeto	204.861,90 €	0	N. A.	204.861,90 €
Construção	4.208.745,84 €	0	N. A.	4.208.745,84 €
Aquisição e Instalação de Bombas Elevatórias	16.217,00 €	0	SPW; 0; 2,45%	16.217,00 €
		0	SPW; 0; 2,45%	16.217,00 €
		15	SPW; 15; 2,45%	15.093,02 €
		30	SPW; 30; 2,45%	14.046,94 €
		45	SPW; 45; 2,45%	13.073,36 €
Custo Laje de Fundo	268.443,01 €	0	N. A.	268.443,01 €
Valor residual	- 8.108,50 €	50	SPW; 50; 2,45%	- 6.382,04 €

Custos Operacionais	Quantia	Ano de ocorrência	Fórmula Cálculo	Valor Atual
Operação, Manutenção e Reparação	29.346,00 €	Anual	UPW;50;2,45%	1.301.741,83 €
Eletricidade, bombas	33.631,66 €	Anual	UPWmod;50;2,45%;2,5%	2.910.154,64 €
Custo de manutenção das bombas	5.676,00 €	Anual	UPW;50;2,45%	251.778,32 €
Custo de demolição			Não contabilizado	

Total	9.213.990,83 €
--------------	-----------------------

Dados	r	0,48%	Solução com bombagem a partir do piso -3
	e	2,5%	
	t	50	

Custos de Investimento	Quantia	Ano de ocorrência	Fórmula Cálculo	Valor Atual
Projeto	204.861,90 €	0	N. A.	204.861,90 €
Construção	4.208.745,84 €	0	N. A.	4.208.745,84 €
Aquisição e Instalação de Bombas Elevatórias	8.720,35 €	0	SPW; 0; 2,45%	8.720,35 €
		0	SPW; 0; 2,45%	8.720,35 €
		15	SPW; 15; 2,45%	8.115,95 €
		30	SPW; 30; 2,45%	7.553,45 €
		45	SPW; 45; 2,45%	7.029,93 €
Custo Laje de Fundo	300.399,12 €	0	N. A.	300.399,12 €
Valor residual	- 4.360,18 €	50	SPW; 50; 2,45%	- 3.431,80 €

Custos Operacionais	Quantia	Ano de ocorrência	Fórmula Cálculo	Valor Atual
Operação, Manutenção e Reparação	29.346,00 €	Anual	UPW;50;2,45%	1.301.741,83 €
Eletricidade, bombas	20.931,01 €	Anual	UPWmod;50;2,45%;2,5%	1.811.164,71 €
Custo de manutenção das bombas	1.744,00 €	Anual	UPW;50;2,45%	77.361,06 €
Custo de demolição			Não contabilizado	

Total	7.940.982,69 €
--------------	-----------------------

Dados	r	0,48%	Solução com bombagem a partir do piso -2
	e	2,5%	
	t	50	

Custos de Investimento	Quantia	Ano de ocorrência	Fórmula Cálculo	Valor Atual
Projeto	204.861,90 €	0	N. A.	204.861,90 €
Construção	4.208.745,84 €	0	N. A.	4.208.745,84 €
Aquisição e Instalação de Bombas Elevatórias	7.370,48 €	0	N. A.	7.370,48 €
		0	N. A.	7.370,48 €
		15	SPW; 15; 2,45%	6.859,64 €
		30	SPW; 30; 2,45%	6.384,21 €
		45	SPW; 45; 2,45%	5.941,73 €
Custo Laje de Fundo	320.953,15 €	0	N. A.	320.953,15 €
Valor residual	- 3.685,24 €	50	SPW; 50; 2,45%	- 2.900,58 €

Custos Operacionais	Quantia	Ano de ocorrência	Fórmula Cálculo	Valor Atual
Operação, Manutenção e Reparação	29.346,00 €	Anual	UPW;50;2,45%	1.301.741,83 €
Eletricidade, bombagem	10.892,41 €	Anual	UPWmod;50;2,45%;2,5%	942.522,54 €
Custo de manutenção das bombas	1.474,00 €	Anual	UPW;50;2,45%	65.384,29 €
Custo de demolição			Não contabilizado	

Total 7.075.235,51 €

Dados	r	0,48%	Solução com laje de fundo espessa
	e	2,5%	
	t	50	

Custos de Investimento	Quantia	Ano de ocorrência	Fórmula Cálculo	Valor Atual
Projeto	204.861,90 €	0	N. A.	204.861,90 €
Construção	4.208.745,84 €	0	N. A.	4.208.745,84 €
Construção da Laje de fundo	659.053,08 €	0	N. A.	659.053,08 €
Valor residual	Não contabilizado			

Custos Operacionais	Quantia	Ano de ocorrência	Fórmula Cálculo	Valor Atual
Operação, Manutenção e Reparação	24.455,00 €	Anual	UPW;50;2,45%	1.084.784,86 €
Custo de demolição	Não contabilizado			

Total 6.157.445,69 €

Dados	r	0,48%	Solução com malha de ancoragens
	e	2,5%	
	t	50	

Custos de Investimento	Quantia	Ano de ocorrência	Fórmula Cálculo	Valor Atual
Projeto	204.861,90 €	0	N. A.	204.861,90 €
Construção	4.208.745,84 €	0	N. A.	4.208.745,84 €
Custos associados unicamente à solução	402.238,90 €	0	N. A.	402.238,90 €
Valor residual	Não contabilizado			

Custos Operacionais	Quantia	Ano de ocorrência	Fórmula Cálculo	Valor Atual
Operação, Manutenção e Reparação	24.455,00 €	Anual	UPW;50;2,45%	1.084.784,86 €
Custo de demolição	Não contabilizado			

Total	5.900.631,50 €
-------	----------------