



**Universidade de
Aveiro
2010**

Departamento de Engenharia Civil

**Maria Angélica de
Oliveira Rocha**

**FERRAMENTAS DE DIMENSIONAMENTO DE
SISTEMAS DE REBAIXAMENTO DO NÍVEL
FREÁTICO**



**Maria Angélica de
Oliveira Rocha**

**FERRAMENTAS DE DIMENSIONAMENTO DE
SISTEMAS DE REBAIXAMENTO DO NÍVEL
FREÁTICO**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, realizada sob a orientação científica do Doutor José Claudino de Pinho Cardoso, Professor Associado do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro e da Doutora Margarida João Fernandes de Pinho Lopes, Professora Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.

Ao meu pai que tantas horas gastou para me fazer aprender a gostar de números.

À minha mãe que me ensinou que as receitas são para ser modificadas, graças a isso o bolo é sempre diferente.

À minha irmã que passou horas comigo ao telefone para me fazer lembrar que nem tudo são receitas e números.

o júri

presidente

Prof. Doutor Aníbal Guimarães da Costa
Professor Catedrático da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor António Milton Topa Gomes
Professor Auxiliar da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Doutor António Agostinho Martins Mendonça
Director da Unidade de Geotecnia da Soares da Costa, SGPS

Prof. Doutor José Claudino de Pinho Cardoso
Professor Associado Universidade de Aveiro

Prof.^a Doutora Margarida João Fernandes de Pinho Lopes
Professora Auxiliar da Universidade de Aveiro

Agradecimentos

Quero agradecer à Dr. Margarida Lopes, porque foi incansável comigo mesmo eu sendo somente sua co-orientanda, até no Brasil se lembrou de mim, obrigada.

Quero também agradecer ao Dr. Agostinho Mendonça, porque sem ele muito deste trabalho não seria feito. Também ele foi incansável e tornou todo o trabalho ainda mais prático e interessante, obrigada.

Agradeço ainda a todos os colegas e amigos que me acompanharam nestes cinco anos e tantas coisas me ensinaram. De forma mais intensa agradeço ao meu núcleo duro de amigos que aguentaram com devaneios e perdas de paciência e ainda assim continuaram a dar-me todo o apoio que precisei.

Também agradeço o empenho e dedicação de todos os meus professores.

Aos meus tios Álvaro e Lina, obrigado por me desejarem todos os fins-de-semana, a melhor semana que alguém pode pedir, mas acima de tudo obrigado por me ensinarem o numero um e as direcções.

Aos meus pais e irmã, obrigado por estarem sempre lá.

Palavras-chave

Nível freático, Rebaixamento, Permeabilidade, Dimensionamento, Ferramenta de cálculo

Resumo

O rebaixamento do nível freático é um tema relevante da Engenharia Civil, em particular da Geotecnia, e trata-se de uma forma, ou método, que permite retirar, ou afastar, a água existente na área onde foi prevista e projectada uma determinada obra de engenharia. Ainda que se denote alguma falta de notoriedade em termos de informação associada ao rebaixamento do nível freático, este é um tema com muita relevância. De facto, a presença de água no subsolo é muitas vezes um problema cujas proporções podem ser fatais. Este tema é bastante vasto em termos de métodos de execução, contudo, por norma, faz-se recurso a soluções associadas a bombagens. Esta é a solução mais desenvolvida em termos teóricos, principalmente no que refere a dimensionamento.

O presente trabalho incluiu o desenvolvimento deste tema, tendo sido estruturado em quatro partes distintas. O principal objectivo do trabalho foi o desenvolvimento de uma ferramenta numérica para assistir o dimensionamento de sistemas de rebaixamento do nível freático.

Numa primeira parte são descritos vários métodos de rebaixamento de nível freático e suas vantagens e desvantagens. Dado que o dimensionamento de sistemas deste tipo depende essencialmente da permeabilidade dos solos envolvidos, numa fase seguinte, são apresentadas questões relativas à permeabilidade de solos. Depois são descritos alguns métodos de dimensionamento de sistemas de rebaixamento de nível freático com recurso a bombagem. Finalmente apresenta-se o programa de cálculo desenvolvido e faz-se a sua aplicação a uma obra real, já realizada, o que implica uma comparação de resultados entre os valores obtidos com a aplicação do programa e os valores que foram aplicados em obra.

keywords

Water level, Groundwater lowering, Permeability, Design methods, Calculus method

Abstract

The lowering of groundwater is a relevant theme of Civil Engineering, particularly Geotechnics. It is the method used to avoid the presence of water or remove it from the vicinity of a construction site. Although with a lack of notoriety, observed when searching for information on the lowering of groundwater, it is a very relevant theme. In fact, the presence of water in the subsoil is often a problem whose proportions might be fatal.

This theme is really wide in terms of executions methods though, normally, the solutions used are associated with bombing water. This solution is more developed in theoretical terms, particularly related with the design

The present work included the development of this issue and it is divided in four different parts. The main goal was to develop a numerical tool to assist the design of groundwater lowering systems.

First, a several methods for lowering the groundwater level are described and some of their advantages and disadvantages are pointed out. As the design of such systems depends essentially on the permeability of the soils, on second part some questions related with the soil permeability are presented. Third, three different design methods used to the lowering of the groundwater level using pumping are described.

Last, the program developed is presented as well as its application to a real case that was already finished. Thus, the results from the construction site observations and obtained with the program can be compared.

INDICE GERAL

INDICE GERAL	I
ÍNDICE DE FIGURAS	V
ÍNDICE DE TABELAS	IX
1. CAPITULO 1 – REBAIXAMENTO FREÁTICO	1
1.1. Rebaixamento do nível freático.....	1
1.1.1. Conceito	1
1.1.2. Condições de Aplicação	2
1.1.3. Objectivos.....	2
1.2. Métodos para rebaixamento do nível freático	3
1.2.1. Introdução.....	3
1.2.2. Método 1 – Bombeamento directo ou escoamento de vala.....	3
1.2.3. Método 2 – Sistema de rebaixamento com ponteiras filtrantes.....	4
1.2.4. Método 3 – Drenagem.....	5
1.2.5. Método 4- “Sump pumping”	7
1.2.6. Método 5 - Bombeamento de Poços ou Zona de poços	8
1.2.7. Método 6 - Poços de Alívio.....	9
1.2.8. Método 7 - “ <i>Cut-offs</i> ” ou barreiras impermeáveis	10
1.2.9. Método 8 - “ <i>Sheet Piling</i> ”	14
1.2.10. Método 9 – Electro-Osmose.....	15
1.2.11. Método 10 - Ar comprimido	15
1.2.12. Método 11 - Congelamento do solo	16
1.2.13. Método 12 - “ <i>Grouting</i> ”	16
1.3. Análise comparativa dos métodos apresentados	18
1.4. Avaliação da permeabilidade do solo.....	18
1.4.1. Introdução.....	18

FERRAMENTAS DE DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS DE REBAIXAMENTO DO NÍVEL FREÁTICO

1.4.2.	Relação Permeabilidade e Gradiente hidráulico.....	19
1.4.3.	Ensaio de campo ou “in situ”.....	22
1.4.4.	Ensaio de laboratório	27
1.4.5.	Fórmulas Empíricas.....	29
1.4.6.	Análise comparativa.....	30
1.4.7.	Anisotropia de permeabilidade.....	32
1.5.	Assentamentos.....	34
2.	CAPÍTULO 2 – MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS DE REBAIXAMENTO DO NÍVEL FREÁTICO COM RECURSO A BOMBAGEM.....	37
2.1.	Introdução	37
2.2.	Fila de poços simples ou fila dupla	38
2.3.	Poços aplicados a escavações quadradas ou retangulares profundas	42
2.4.	Grandes áreas em planta.....	44
2.5.	Assentamentos.....	45
2.6.	Considerações Finais.....	46
3.	CAPÍTULO 3 - PROGRAMA DE CÁLCULO DESENVOLVIDO.....	47
3.1.	Considerações iniciais	47
3.2.	Menu	47
3.3.	Questionário de Entrada.....	48
3.4.	Permeabilidade.....	49
3.5.	Valores de Entrada	56
3.6.	Método de Cálculo I.....	58
3.7.	Método de Cálculo II.....	60
3.8.	Retroanálise.....	61
3.9.	Resultado Final.....	62
3.10.	Erros e avisos	62
3.11.	Fluxogramas	63

4.	CAPITULO 4 – APLICAÇÃO DO PROGRAMA A UM CASO DE ESTUDO - PROBLEMA REAL	71
4.1.	Caso de Estudo	71
4.2.	Cálculo – Aplicação do programa	76
4.2.1.	Contextualização	76
4.2.2.	Sondagem 1	76
4.2.3.	Sondagem 2	79
4.2.4.	Sondagem 3	82
4.2.5.	Sondagem 4	84
4.2.6.	Sondagem 5	86
4.3.	Comparação entre o cálculo e o projecto	89
4.4.	Retroanálise	90
5.	CAPITULO 5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS	93
5.1.	Dificuldades encontradas	93
5.2.	Objectivos Definidos para o Desenvolvimento da Ferramenta Numérica	93
5.3.	Aplicação a um Caso Real	95
5.4.	Desenvolvimentos futuros	95
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA	99
	ANEXOS	I

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Sistema de valas (Xanthakos et al., 1994)	3
Figura 2 - Sistema de ponteira filtrante típico (adaptado de Xanthakos et al, 1994)	4
Figura 3 - Colocação de drenos verticais (adaptado de Blake, 2001)	6
Figura 4 - "Sump Pumping" típico (adaptado de Xanthakos et al., 1994)	8
Figura 5 - Progresso do rebaixamento pelo método de bombeamento de poços ou zona de poços (adaptado de Puller, 1996).	9
Figura 6 - Estrutura típica de poços de alívio (adaptada de Williams, 2009)	10
Figura 7 - Princípio de um dreno aplicado a "cut-offs" (adaptado de Ingold (1994))	11
Figura 8 - Exemplo típico de uma "Cut-off wall" (adaptado de Xantakos e tal.(1994))	12
Figura 9 - Método de execução de "Jet grouting"(Puller, 1996)	13
Figura 10- Fluxo de água numa amostra de solo (adaptado de Murthy, 2003)	20
Figura 11 - Ábaco para obtenção do valor de C_1 : a) acima do nível freático e b) abaixo do nível freático (Alonso, 2007)	23
Figura 12 - Ábaco para obtenção do valor de C_2 (Alonso, 2007)	24
Figura 13 - Possível disposição em planta de um ensaio de carga variável (Alonso, 2007)	25
Figura 14 - Gráficos relativos ao nível do piezómetro e volume de líquido (vazão) (Alonso, 2007)	26
Figura 15 - Ensaio de carga hidráulica variável: a) aquífero livre (fluxo gravitacional; b) aquífero artesiano, (adaptado de Alonso, 2007)	27
Figura 16 - Esquema do ensaio de carga variável (Alonso, 2007)	28
Figura 17 - Esquema do ensaio de carga constante (Alonso, 2007)	28
Figura 18 – Maciço	33
Figura 19 - Maciço composto por duas camadas isotrópicas em termos de permeabilidade	33
Figura 20 - Perfil de representativo do rebaixamento do nível freático (I)	38
Figura 21 - Perfil de representativo do rebaixamento do nível freático (II)	39
Figura 22 - Determinação gráfica de C_1 e C_2 , (adaptado de Puller, 1996)	40
Figura 23 - Gráfico de cálculo de novo R_0 (Puller, 1996)	40

Figura 24 - Ábaco para determinação do espaçamento entre poços: a) areias e gravilhas uniformes; b) areias e gravilhas estratificadas (adaptado de Puller, 1996)	41
Figura 25 - Menu inicial.....	48
Figura 26 - Ambiente do questionário de entrada	49
Figura 27 - Ambiente da folha Permeabilidade.....	50
Figura 28 - Ambiente da folha Permeabilidade – tabela de cálculo Parte I	51
Figura 29 - Ambiente da folha Permeabilidade – tabela de cálculo Parte II.....	51
Figura 30 - Figura de referência no cálculo da permeabilidade	52
Figura 31 - Ambiente da folha Permeabilidade - Introdução de camadas	52
Figura 32 - Exemplo de quadro resumo dos resultados obtidos na folha de cálculo “permeabilidade”.....	56
Figura 33 - Ambiente da folha Valores de Entrada.....	57
Figura 34 - Representação de uma possível distribuição de poços	57
Figura 35 - Ambiente folha Método de Calculo I.....	58
Figura 36 – Exemplo de quadro resumo dos resultados obtidos na folha de cálculo “Método de cálculo I”	59
Figura 37 - Exemplo de quadro resumo dos resultados obtidos na folha de cálculo “Método de cálculo II”	60
Figura 38 - Resultado para a retroanálise, resultados meramente indicativos	61
Figura 39 - Ambiente da folha Resultado Final - Referência ao botão imprimir.....	62
Figura 40 - Fluxograma relativo a Valores de Entrada	64
Figura 41 - Fluxograma Permeabilidade.....	65
Figura 42 - Fluxograma de Valores de Entrada	66
Figura 43 - Fluxograma Método de Calculo I.....	67
Figura 44 - Fluxograma de Método de Calculo II.....	68
Figura 45 - Fluxograma relativo resultado final e retroanálise	69
Figura 46 - Edifício executado pela Soares da Costa no Largo do Ambiente – Luanda (Mendonça, 2010)	71

Figura 47 - Planta da obra	72
Figura 48 – Perfil geológico obtido a partir das sondagens 4 e 3.....	72
Figura 49 - Perfil geológico obtido a partir das sondagens 1 e 2	73
Figura 50 - Perfil geológico obtido a partir das sondagens 1,3 e 5	73
Figura 51 - Planta adoptada para a aplicação prática	75
Figura 52 - Perfil tipo da zona de bombagem	75
Figura 53 – Informação sobre as camadas identificadas na sondagem 1 (S1)	76
Figura 54 - Solução ponderada com base nos valores de Fernandes (2006).....	77
Figura 55 - Valores tratados e escolha da permeabilidade mais indicada para o cálculo (S1)....	77
Figura 56 - Valores de cálculo relativos à Sondagem S1	78
Figura 57 - Solução obtida para S1	79
Figura 58 - Informação sobre as camadas identificadas na sondagem 2 (S2).....	80
Figura 59 - Solução ponderada com base nos valores de Fernandes (2006) – S2.....	80
Figura 60 - Valores tratados e escolha da permeabilidade mais indicada para o cálculo (S2)....	81
Figura 61 - Solução obtida para S2	81
Figura 62 - Informação sobre as camadas identificadas na sondagem 3 (S3).....	82
Figura 63 - Solução ponderada com base nos valores de Fernandes (2006) – S3.....	83
Figura 64 - Valores tratados e escolha da permeabilidade mais indicada para o cálculo (S3)....	83
Figura 65 - Solução obtida para S3	84
Figura 66 - Informação sobre as camadas identificadas na sondagem 4 (S4).....	85
Figura 67 - Solução ponderada com base nos valores de Fernandes (2006) – S4.....	85
Figura 68 - Valores tratados e escolha da permeabilidade mais indicada para o cálculo (S4)....	86
Figura 69 - Solução obtida para S4	86
Figura 70 - Informação sobre as camadas identificadas na sondagem 5 (S5).....	87
Figura 71 - Solução ponderada com base nos valores de Fernandes (2006) – S5.....	87
Figura 72 - Valores tratados e escolha da permeabilidade mais indicada para o cálculo (S5)....	88
Figura 73 - Solução obtida para S5	88

Figura 74 - Colocação projectada dos poços.....	90
Figura 75 - Aplicação da ferramenta de retroanálise ao caso de estudo	91
Figura 76 - Resultado obtido para a permeabilidade obtida na retroanálise	92

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Métodos “ <i>Cut-offs</i> ” (adaptado de Puller, 1996).....	11
Tabela 2 - Relações para melhoramento da dureza do método (Puller, 1996).....	14
Tabela 3 – Ensaios para avaliação da permeabilidade do solo.....	19
Tabela 4- Valores da permeabilidade atribuída a cada tipo de solo(Fernandes, 2006)	31
Tabela 5 - Classificação de Terzaghi e Peck (1967) para a permeabilidade dos solos(Fernandes, 2006)	31
Tabela 6 - Anisotropia de permeabilidade formado por duas camadas isotrópicas de igual espessura em função da razão dos coeficientes de permeabilidade de cada uma (Fernandes, 2006)	34
Tabela 7 - Resumo dos valores obtidos por aplicação do programa desenvolvido ao caso de estudo	89
Tabela 8 - Solução para o sistema de rebaixamento e permeabilidade equivalente para os perfis correspondentes às sondagens 1 a 4, após retroanálise	92

1. CAPITULO 1 – REBAIXAMENTO FREÁTICO

1.1. REBAIXAMENTO DO NÍVEL FREÁTICO

1.1.1. CONCEITO

Segundo um dicionário de língua portuguesa, o conceito de rebaixamento do nível freático pode ser decomposto em dois elementos simples:

1. Rebaixamento – “(...) tornar mais baixo; diminuir na altura (...);”
2. Freático – “proveniente da palavra grega phreatikós <do poço> – relativo ao lençol de água subterrânea existente próximo da superfície e que pode ser aproveitada por meio de poços.”

Fazendo uma pesquisa breve num dicionário de engenharia civil (Scott, 1991) é possível obter a descrição de que o rebaixamento do nível freático serve para assegurar uma escavação seca em areia ou gravilha ou manter as paredes laterais da escavação de pé.

O conceito de rebaixamento do nível freático é aplicado em todas as obras onde existe um nível de água elevado que precisa ser retirada, para que com isto seja possível executar a obra (Blake, 2001).

Assumindo que todas as soluções que a humanidade atribui aos problemas se resolvem da forma mais simples, é possível concluir que o rebaixamento do nível freático também se trata do método mais simples para secar solos de forma temporária e assim ser possível executar a obra no local pretendido.

As dificuldades associadas a um nível freático demasiado elevado, são discutidas desde longa data. Powrie (2008), entre muitas informações, descreve um caso ocorrido em 1943, de uma parede de retenção que falhou.

Assim, e prevendo a existência de solos cada vez mais saturados - em determinadas zonas por modificação das condições climáticas - é preciso controlar o nível destas águas, em geral de forma temporária, e ainda proteger toda a zona vizinha.

1.1.2. CONDIÇÕES DE APLICAÇÃO

Este método de intervenção é somente aplicado em casos em que o nível das águas do subsolo é elevado, contudo, pode também ser aplicado em locais não totalmente submersos. O objectivo deste tipo de intervenção é permitir a execução da obra, sem a ocupação do espaço por água, devendo assim ser conveniente o seu desvio permanente ou temporário.

Muitas são as estruturas, pertencentes ao quotidiano do ser humano, que aquando da sua execução foram alvo deste tipo de intervenção. Imagine-se a execução de uma obra de arte. Primeiro dimensionou-se a estrutura e depois o estaleiro, nesta fase conclui-se que é mais do que necessário secar o solo, caso contrário a obra é inviável.

Este é um simples exemplo da importância e necessidade, por muitos esquecida, de retirar a água que, em Engenharia Civil, se denomina de incomoda.

1.1.3. OBJECTIVOS

O objectivo principal deste trabalho consiste no desenvolvimento de uma ferramenta de cálculo que permita fazer o dimensionamento do rebaixamento do nível freático aplicando dois métodos. Os métodos implementados recorrem a bombagem: o primeiro refere-se a uma linha de poços (simples ou dupla – neste caso, duas linhas paralelas), enquanto o segundo se refere à utilização de vários poços distribuídos ao longo da área em planta ocupada pela escavação, quadrada ou rectangular. Assim, numa primeira abordagem, foi feito um levantamento, recorrendo à bibliografia, de métodos para o rebaixamento do nível freático, apontando-se as principais condições de aplicabilidade de cada um deles. Numa fase seguinte, fez-se o estudo relativo ao dimensionamento e ainda a aplicação matemática de dois dos métodos apresentados.

Finalmente, a ferramenta de cálculo foi testada, recorrendo à aplicação da informação disponível sobre um caso de estudo específico fornecido por uma empresa.

1.2. MÉTODOS PARA REBAIXAMENTO DO NÍVEL FREÁTICO

1.2.1. INTRODUÇÃO

Ao longo desta secção são descritos doze métodos para executar o rebaixamento do nível freático. Para cada método são apontadas algumas vantagens e desvantagens e condições de aplicabilidade. É importante referir que foi difícil encontrar bibliografia actual em que estas metodologias fossem descritas.

1.2.2. MÉTODO 1 – BOMBEAMENTO DIRECTO OU ESCOAMENTO DE VALA

O método de bombeamento directo ou escoamento de vala consiste na execução de valetas no fundo da escavação onde é recolhida a água. Estas valetas são ligadas a um ou vários poços, estrategicamente posicionados, onde a água é acumulada e, à medida que atinge um determinado volume, é retirada da zona onde decorrem os trabalhos. Na Figura 1 é representado, de forma esquemática, um sistema de vala.

Para retirar a água é necessária a instalação de bombas. Existem vários tipos de bombagem, sendo a sua escolha feita de uma forma empírica (Puller, 1996, Vitor and Kimus, 2000)

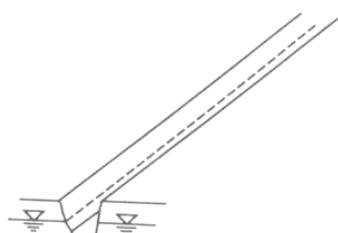


Figura 1 - Sistema de valas (Xanthakos et al., 1994)

Este método tem algumas desvantagens. De facto, quando a escavação tem como suporte cortinas estanques contínuas pode ocorrer perda considerável do suporte devido à força de percolação da água e ao gradiente hidráulico elevado. Isto pode ter como repercussão a inviabilidade de possíveis fundações superficiais, prejudicando assim os trabalhos. Para culminar, caso não existam drenos de alívio, pode ocorrer ruptura do fundo da escavação, sem aviso prévio (Puller, 1996, Vitor and Kimus, 2000).

Além disso, neste tipo de solução é importante saber se não está a ocorrer transporte sólido. Isto consegue-se monitorizando a água à saída das bombas, que deve sair limpa. Esta situação de transporte torna-se problemática, porque no caso da existência de edifícios nas imediações dos trabalhos, estes podem sofrer assentamentos ou verificar-se subsidências à superfície. O arrastamento submerso de sólidos pode provocar desníveis das infra-estruturas, como tubagens de água, de esgotos, de gás ou outros. A solução para evitar que tal ocorra, passa por melhorar o sistema de drenagem da água, por exemplo com a utilização de filtros adequados, de modo que não permita o arrastamento de finos (Puller, 1996, Vitor and Kimus, 2000).

1.2.3. MÉTODO 2 – SISTEMA DE REBAIXAMENTO COM PONTEIRAS FILTRANTES

Este método consiste na implantação de ponteiras filtrantes, espaçadas de 1 a 2 metros, ao longo do perímetro de rebaixamento. Estas ponteiras são posteriormente ligadas por intermédio de mangueiras a um colector. A água é retirada do solo com auxílio de uma bomba de vácuo (Puller, 1996, Vitor and Kimus, 2000).

Este método permite o rebaixamento em grandes áreas e a profundidades até aos 5 metros. Contudo, é uma solução que quando aplicada por níveis, permite que se atinjam profundidades superiores (Puller, 1996, Vitor and Kimus, 2000).

Por norma, as ponteiras são de 30 a 40m e os colectores de 40 a 60m (Puller, 1996, Vitor and Kimus, 2000).

É possível visualizar-se um sistema de ponteiras filtrantes na Figura 2.

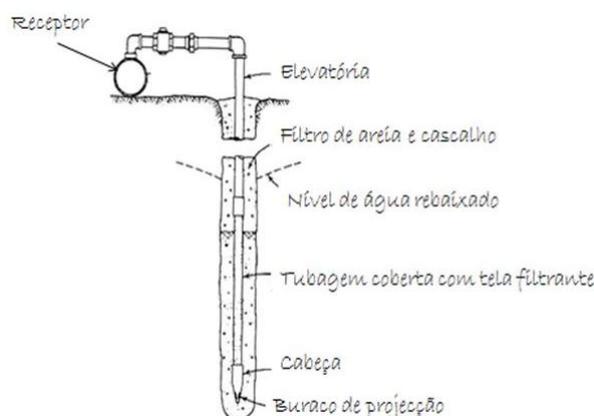


Figura 2 - Sistema de ponteira filtrante típico (adaptado de Xanthakos et al, 1994)

1.2.4. MÉTODO 3 – DRENAGEM

1.2.4.1. DRENOS VERTICAIS

Os drenos verticais têm como função base a aceleração do processo de assentamento do solo, quando este é composto por argilas suaves ou camadas de siltes. Este processo de assentamento ocorre de forma muito mais rápida que os usuais assentamentos. Ou seja enquanto a duração do assentamento causado por drenos verticais demora somente alguns meses o assentamento que ocorre de forma “natural” pode demorar até um ano (Blake, 2001).

O princípio base deste sistema, tal como já referido, é permitir a drenagem horizontal dos estratos acima referidos. Em suma, em momento algum diminuir o tempo de assentamento se relaciona com diminuição de assentamento. Quer-se com isto dizer que a altura de assentamento se mantém, demora somente menos tempo a ocorrer (Blake, 2001).

Este processo implica alguns cuidados relacionados com o facto da modificação da permeabilidade horizontal do solo. Ou seja é preciso ter em atenção, aquando da instalação dos drenos, para que esta não acabe a causar danos na permeabilidade horizontal. Assim é necessário o estudo constante e cuidadoso das características de drenagem horizontal (Blake, 2001).

Ainda que se trate de um sistema de aceleração de assentamentos, é considerado um método de rebaixamento do nível freático porque em paralelo com bombagens permite esse fim (Blake, 2001).

Existem 3 tipos de drenos, os drenos verticais em materiais naturais, os drenos pré-fabricados (“*sandwich*”) e os drenos pré-fabricados tipo banda (Blake, 2001).

Na Figura 3 pode ser visualizada a instalação de drenos verticais.

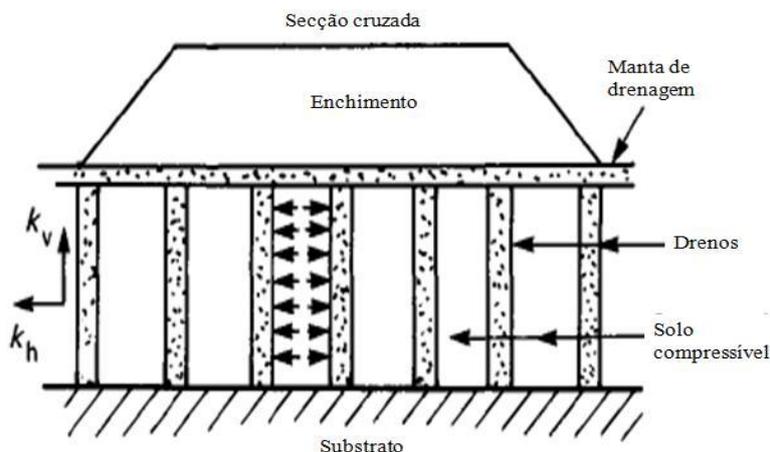


Figura 3 - Colocação de drenos verticais (adaptado de Blake, 2001)

1.2.4.2. DRENAGEM SUPERFICIAL

A drenagem superficial consiste na construção de uma vala para evitar a entrada de água superficial no solo. Esta solução é mais utilizada em situações de talude de elevada inclinação, onde se coloca um dreno no talude lateral da escavação (Blake, 2001, Puller, 1996).

1.2.4.3. DRENAGEM GRAVÍTICA

A drenagem gravítica, como processo de rebaixamento do nível freático, pode ser aplicada em solos relativamente impermeáveis, sendo que o processo de drenagem ocorre de forma “natural”. Ou seja, a água é conduzida para poços de drenagem pelas juntas das tubagens, isto é possível porque as tubagens estão embebidas em gravilha que pode ter falhas, sendo este então o caminho procurado pela água. Realça-se ainda uma vantagem que ocorre neste processo que é o facto da escavação da vala de drenagem se encontrar num nível abaixo em relação ao nível das águas de subsolo (Blake, 2001, Puller, 1996).

A aplicação deste método em paralelo com ensecadeiras deve-se ao facto de este conjunto promover a condução da água para os poços de drenagem localizados fora da zona de obra. Porém a instalação de ensecadeiras, neste caso, só é viável se ocorrer formação argilosa (Blake, 2001, Puller, 1996).

Ressalva-se ainda o facto de estes drenos serem claramente temporários, daí se falar numa solução combinada com uma ensecadeira. Em suma, para que não ocorram zonas

de solo fragilizadas, é necessário conjugar os drenos gravíticos com estruturas permanentes (Blake, 2001, Puller, 1996).

1.2.4.4. DRENAGEM POR VÁCUO

O rebaixamento do nível freático através da drenagem por vácuo é aplicado em solos de baixa permeabilidade, tipo siltes grosseiros (Blake, 2001, Puller, 1996).

Para a aplicação deste método introduzem-se poços selados no solo, de forma que estes não recebam ar. Em seguida, a pressão atmosférica provoca a consolidação do solo, expelindo água para os filtros drenantes que residem nos poços.

É de ressaltar o facto de não ser retirada muita água do solo, contudo a água retirada, porque conduz à diminuição das pressões intersticiais, aumenta em muito a tensão efectiva no solo, facilitando as escavações (Blake, 2001, Puller, 1996).

1.2.5. MÉTODO 4- “SUMP PUMPING”

O método de “Sump pumping” é um método tradicional para remover a água do subsolo por meio de escavações revestidas e profundas. Este método está ilustrado esquematicamente na Figura 4.

A situação perfeita seria a execução desta solução fora da escavação, contudo, para responder às necessidades da obra, a situação perfeita não existe.

O poço de drenagem é equipado, como é possível ver na Figura 4, com uma cabeça de sucção, uma bomba de ascensão ou topo do filtro e uma bomba submersível. Nesta última, a subida da água pode ir até aproximadamente os 6m.

O topo de filtro ou a cabeça de sucção é executado a partir de um tambor de óleo perfurado, rodeado por um filtro médio de gravilha média (Department of the Army, 1983, Puller, 1996).

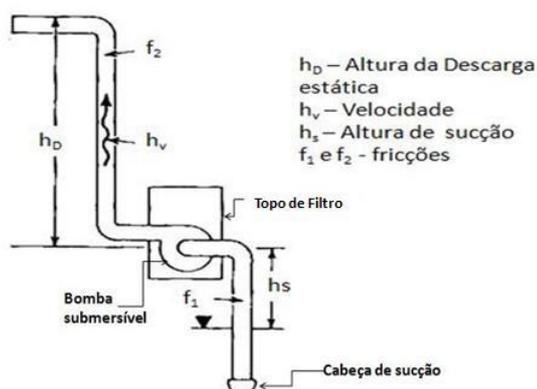


Figura 4 - "Sump Pumping" típico (adaptado de Xanthakos et al., 1994)

1.2.6. MÉTODO 5 - BOMBEAMENTO DE POÇOS OU ZONA DE POÇOS

A criação de uma zona de poços é um sistema de fácil instalação e contrapõe um método também utilizado, contudo mais natural, que é a utilização de areias bem graduadas para absorção de água (Puller, 1996, Vitor and Kimus, 2000).

Em geral, há um limite vertical de profundidade de 5 a 6 metros para os poços, a contar do nível de bombeamento. Os diâmetros dos poços rondam os 50mm e, tal como as ponteiros filtrantes, estes também são colocados de forma regular ao longo do perímetro (Puller, 1996, Vitor and Kimus, 2000).

Da Figura 5 é possível concluir que cada poço contribui progressivamente para o rebaixamento gradual do nível das águas (Puller, 1996, Vitor and Kimus, 2000). Estes autores referem ainda que esta solução compromete a resistência do solo.

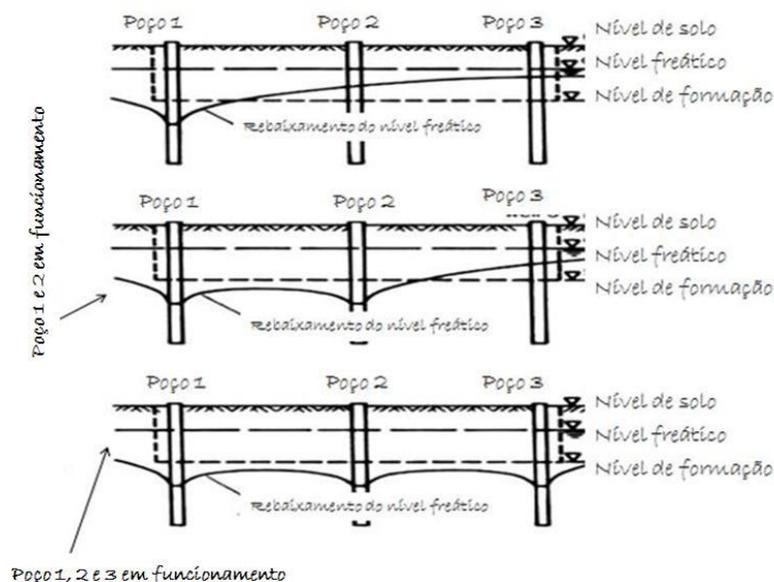


Figura 5 - Progresso do rebaixamento pelo método de bombeamento de poços ou zona de poços (adaptado de Puller, 1996).

1.2.7. MÉTODO 6 - POÇOS DE ALÍVIO

Os poços de alívio são poços verticais com um filtro (materializado por uma grade metálica), rodeado por filtros naturais, por exemplo, de gravilha. A sua principal função é a de prevenir a lavagem de finos dos solos, i.e., os filtros que o compõem constituem uma barreira à passagem de partículas sólidas. Neste método não é feito o recurso a bombagens, já que a verdadeira finalidade é somente afastar a água da escavação mantendo-a no interior do poço (podendo eventualmente ser retirada). Pode ainda referir-se que este tipo de poços é muito utilizado no caso de estruturas hidráulicas, devido à capacidade de controlar a pressão hidrostática. Em suma, não é simplesmente um sistema de rebaixamento é também um sistema de controlo de pressão hidrostática. Na Figura 6 pode ver-se a composição de um poço de alívio (Puller, 1996, Williams, 2009).

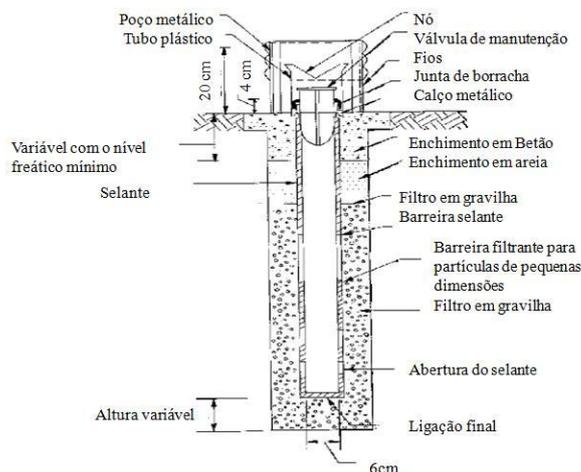


Figura 6 - Estrutura típica de poços de alívio (adaptada de Williams, 2009)

A grande vantagem deste método é possibilitar baixar a pressão artesiana que causa, não só a subida da água, mas também danos nas tubagens. Este alívio de pressão é necessário aquando da penetração de areias e siltes argilosos na água artesiana do subsolo. (Puller, 1996)

1.2.8. MÉTODO 7 - “*CUT-OFFS*” OU BARREIRAS IMPERMEÁVEIS

As barreiras ou paredes impermeáveis (designadas na literatura de língua inglesa por “*cut-off walls*”) são classificadas como uma solução temporária. Isto deve-se ao facto de serem utilizadas somente para afastar a água do subsolo de grandes escavações, diminuindo assim a necessidade da utilização de bombeamento de água. Por esta razão, este método é considerado uma solução simples de execução de caves (Puller, 1996).

Trata-se ainda de uma solução viável para a restrição de água existente em escavações abertas (Puller, 1996).

De acordo com Puller (1996), o método subdivide-se em duas classes: 1) soluções com encurvadura considerável e impermeável; 2) solução com bastante flexibilidade, encurvadura diminuta e ainda baixa permeabilidade.

Na Tabela 1 são identificadas as soluções adoptadas para cada uma das classes referidas.

Tabela 1 - Métodos “Cut-offs” (adaptado de Puller, 1996)

<u>Encurvadura e Impermeabilidade:</u>	<u>Flexibilidade, Encurvadura Diminuta e Baixa Permeabilidade:</u>
Parede em cortina estanque; Parede em betão armado; Parede diafragma.	Parede diafragma não reforçada, em betão plástico; Parede diafragma fina, projectada; Bentonite, não reforçada.

Ainda segundo Puller (1996), é extremamente importante ressaltar que este trabalho tem de ser executado por mão-de-obra especializada, caso contrário podem ocorrer fugas. Estas, no caso de serem demasiado sérias, tornam-se um risco de grau elevado.

Na Figura 7 encontra-se ilustrado o princípio de funcionamento de um dreno associado a uma parede “cut-offs”. Já na Figura 8 encontra-se o pormenor de uma “cut-off wall”.

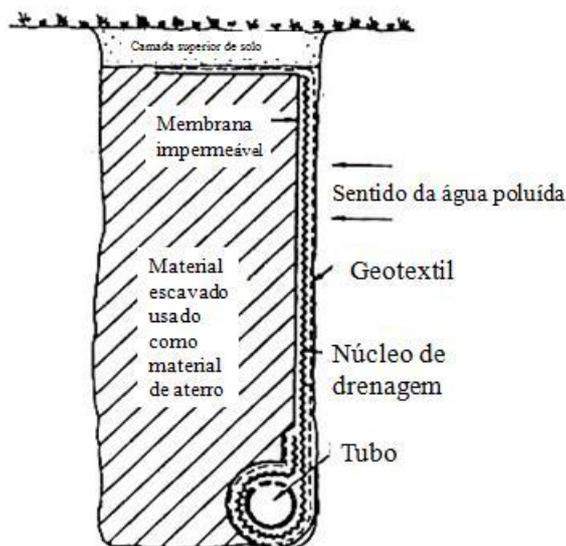


Figura 7 - Princípio de um dreno aplicado a “cut-offs” (adaptado de Ingold (1994))

Como nota pode referir-se que na execução da maior central hidroeléctrica do mundo, mais conhecida pela barragem das três gargantas, na China, foi utilizado como método de barreira estanque, uma enscadeira combinada com “cut-off wall”, ou seja,

recorreu-se a uma cortina de estacas-prancha. As estacas-prancha atingiram a profundidade de 60 m, a maior até hoje alcançada. Sendo que 2/3 da execução destas estacas-prancha, foram feitas em ambiente submerso, ou seja, aquando da execução do método o solo não foi posto a seco (Corporation, 2002).

A necessidade de combinar estes dois métodos, deveu-se ao facto das condições geológicas não permitirem somente a utilização de estacas-prancha. Tratava-se, em termos estruturais, de um solo bastante resistente, que em muito dificultava a montagem destes métodos estanques flexíveis (Corporation, 2002).

Neste caso particular, toda a construção teve de ser executada durante a época seca, caso contrário as deformações sentidas nas barreiras estanques seriam demasiado gravosas, levando à sua perda devido às correntes (Corporation, 2002).

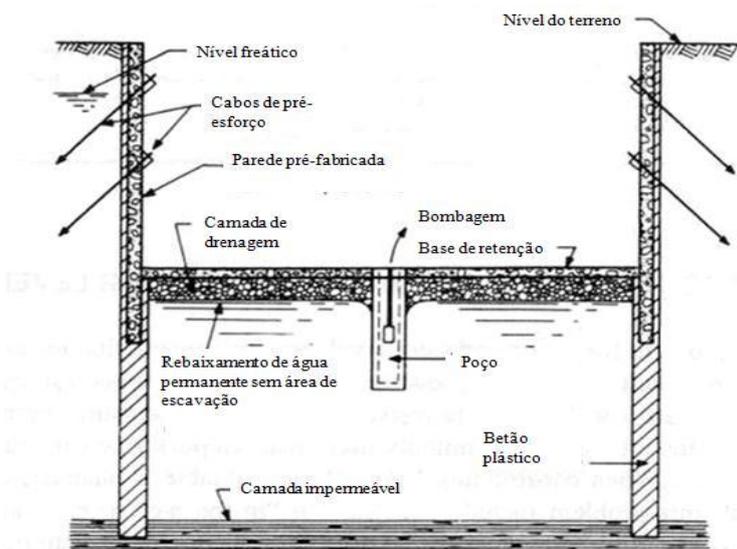


Figura 8 - Exemplo típico de uma “Cut-off wall” (adaptado de Xantakos e tal.(1994))

No que se refere aos métodos construtivos associados, esta solução pode ser executada por 3 métodos distintos, sendo que o resultado final difere de método para método. São eles: paredes moldadas, cortinas injectadas (“grouting” ou “jet grouting”) e cortinas injectadas horizontais (Puller, 1996).

Na Figura 9 encontra-se descrito, de forma esquemática, o processo de execução de “jet grouting”.

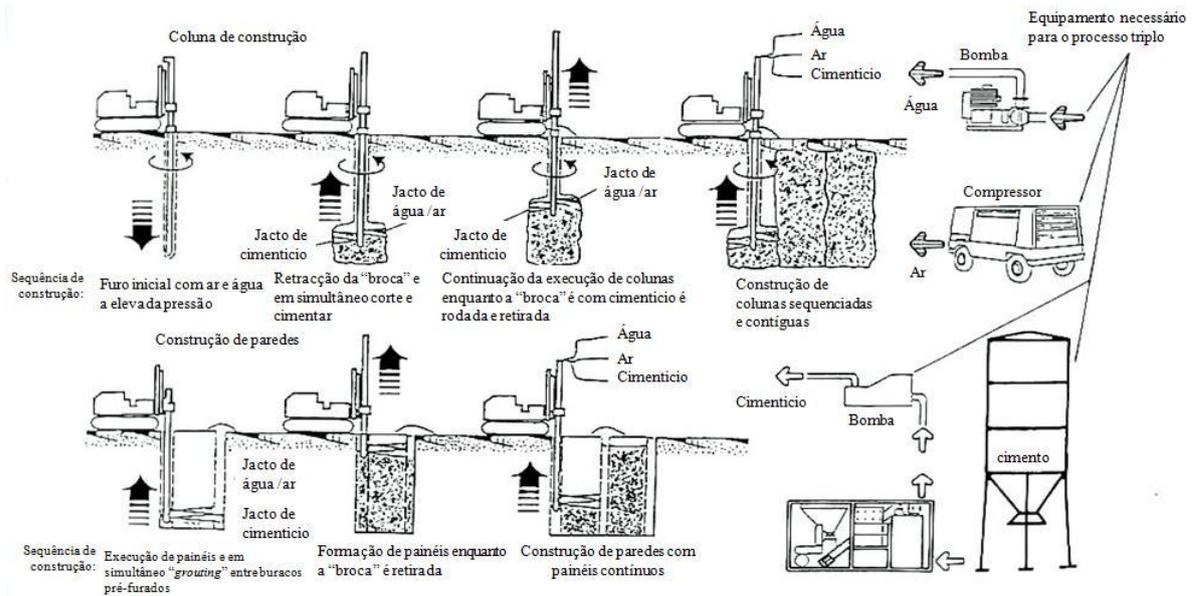


Figura 9 - Método de execução de "Jet grouting" (Puller, 1996)

Em seguida, refere-se a técnica designada por paredes moldadas com algum detalhe. De forma corrente, pode dizer-se que se trata de uma parede à base de elementos cimentícios, em geral bentonite, cuja finalidade é estabilizar uma escavação. Pode dizer-se que é uma solução muito frequente para grandes profundidades.

A bentonite cria uma barreira protectora que não deixa a zona escavada desmoronar (Blake, 2001). Assim, forma-se um filtro (como se fosse um bolo cimentício) à base dos depósitos das valas laterais e enchimento proveniente da escavação e da parede. Todo este conjunto forma uma barreira para a água existente. (Department of the Army, 1983, Puller, 1996).

Em primeiro lugar à superfície e ao longo do perímetro da escavação é executado um pequeno elemento guia. Posteriormente são escavados painéis alternados, com altura variável, de 2 a 7m. Durante esta escavação o solo é retirado e, ao mesmo tempo, vai sendo introduzida a bentonite. Esta vai formar uma barreira que não permite o colapso da escavação realizada. Seguidamente, a parede é executada "in situ". A armadura é introduzida e betona-se. Neste processo, o contacto directo entre betão e bentonite obriga esta última a ser expelida do painel em causa. O processo vai sendo repetido até que toda a barreira atinja as dimensões pretendidas, ao longo do perímetro da zona a escavar. Para garantir a continuidade da parede, em cada painel betonado é deixada uma armadura de espera (Blake, 2001).

Na Tabela 2 é possível obter uma relação de como aumentar a dureza deste método.

Tabela 2 - Relações para melhoramento da dureza do método (Puller, 1996)

<u>Características</u>	<u>Factor Principal</u>	<u>Factor Secundário</u>
Força	Razão cimento - água	Razão bentonite - água; Razão retardadores - água
Viscosidade	Razão bentonite - água	Razão cimento - água; Razão retardadores - água
Tempo de assentamento	Razão retardadores - água	Razão cimento - água; Razão bentonite - água

Este método pode ser aplicado em qualquer solo, porém podem ocorrer problemas associado à betonagem. No caso de pouca vibração do betão, a execução das paredes pode não ter a qualidade necessária. No caso de falta de resistência por parte do solo pode causar assentamentos não previstos (Blake, 2001).

A bentonite é um material reutilizável mas vai sendo perdido, e como se trata de um material bastante caro, esta solução acaba também por ser muito cara (Blake, 2001).

1.2.9. MÉTODO 8 - “SHEET PILLING”

O método designado por “*sheet pilling*” consiste na utilização de elementos verticais em madeira, betão reforçado ou aço que são colocados alinhados de forma a criar uma barreira impermeável que não permite a entrada de água na escavação (Blake, 2001, Scott, 1991).

Este é um método de rebaixamento muito utilizado aquando da construção de caves, principalmente se estas se localizarem nas imediações de outros edifícios. Isto porque, caso existam edifícios nas imediações estes poderiam sofrer fissuração ao ser retirada água nos terrenos adjacentes. Assim, como facilmente se percebe, do lado da escavação é feita bombagem, com rebaixamento do nível freático. No entanto, do lado exterior, o nível freático não sofre grandes alterações, mantendo-se aproximadamente constante.

É de ressaltar que esta solução é mais usada em solos saturados ou moles (Blake, 2001, Scott, 1991).

1.2.10. MÉTODO 9 – ELECTRO-OSMOSE

O método de rebaixamento do nível freático por eletro-osmose, é uma solução essencialmente direcionada para solos siltosos, e tem por base a transformação de um ânodo num cátodo, provocada pela corrente eléctrica em contacto com a água (Blake, 2001).

A execução, deste método, passa pela introdução ou elaboração de um cátodo num poço, que em contacto com a água acaba bombeada automaticamente para o exterior. Este método é demasiado caro, sendo utilizado quando mais nenhum método é executável. De facto, o método de electro-osmose, proporciona a retirada de pequenas quantidades de água, tornando-se muito moroso e pouco prático (Blake, 2001).

1.2.11. MÉTODO 10 - AR COMPRIMIDO

Este método de rebaixamento do nível freático consiste na aplicação de ar comprimido nos vazios do solo de forma a extrair toda a água mantendo o solo em equilíbrio (Blake, 2001).

Para que não ocorram problemas de estabilidade é necessário que a pressão do solo e da água sejam iguais, não sendo problemático se houver uma pequena variação entre elas (Blake, 2001).

Ainda que o método seja aplicado também a cascalhos, Blake (2001) ressalva que este material pode ser bastante poroso. Assim, nestes casos é necessário proteger o solo com uma camada de argila para minorar a sua permeabilidade e tornar o método viável.

Como principal desvantagem, é necessário referir que este método pode tornar-se excessivamente caro, se o solo ao qual será aplicado for demasiado permeável. Contudo, é bastante eficaz quando utilizado como túnel sub-aquoso para solos moles (Blake, 2001).

Blake (2001) salienta que aquando da aplicação deste método, é necessário que se assegure a segurança e saúde de todos os trabalhadores que o forem executar, já que o ar comprimido pode causar danos irrecuperáveis.

Tendo em conta todos os cuidados já descritos, este método é aplicável a areias, cascalho, siltes e argilas (Blake, 2001).

1.2.12. MÉTODO 11 - CONGELAMENTO DO SOLO

Este não é exactamente um método de rebaixamento do nível freático, porque o nível de água mantém-se, porém sob a forma sólida e não líquida. Contudo, o método é aqui incluído visto permitir realizar escavações em zonas de nível freático elevado. Para aplicação deste método é necessário fazer aberturas ou poços ao longo de um perímetro no solo. Nesses poços introduz-se salmoura arrefecida, que por seu turno vai provocar o congelamento gradual da água dentro do solo. Forma-se então, uma parede congelada, permitindo a execução dos trabalhos (Almeida, 2003).

Este processo obriga a alguma manutenção para que a barreira de gelo se mantenha intacta no decurso de toda a obra (Almeida, 2003) .

Este método tem algumas desvantagens. De facto, trata-se de um método bastante caro. Caso se opte por substituir a salmoura por dióxido de carbono ou até mesmo nitrogénio, o processo encarece muito mais. Note-se ainda que este método é muito sensível à existência de fugas no sistema. No caso de haver uma fuga nas tubagens aquando da introdução da salmoura, todo o processo perde o efeito e já não pode ser aplicado (Almeida, 2003).

1.2.13. MÉTODO 12 - “GROUTING”

A solução de “*grouting*” pode ser aplicada a materiais duros como as rochas ou enchimentos à base de rocha. A sua utilização é aconselhável em solos cujos vazios são grandes, por exemplo, cascalho e areia. De facto, o método não funciona se aplicado a silte ou argila, devidos à pequena dimensão dos vazios que existem nestes solos (Blake, 2001).

Note-se que o material injectado deve ser adaptado aos diferentes solos (Blake, 2001).

Para a implementação deste método introduzem-se tubagens no solo e bombeia-se um composto através de mangueiras anexadas a essas tubagens. O espaçamento entre os elementos depende do tipo de solução projectada (Blake, 2001).

De acordo com Blake (2001) este método subdivide-se em três grupos, suspensão, solução e emulsão aerizada, consoante o tipo de composto injectado.

1.2.13.1. SUSPENSÃO

No caso de “grouting” em suspensão, a injeção tem como composto o cimento. Devido à sua composição, quando o cimento entra em contacto com a água, esta é absorvida. Contudo, esta solução implica sedimentação, por isso, para ser mesmo viável, é necessário ter em atenção a relação água cimento (Blake, 2001).

Existem outras hipóteses mais viáveis, mas também mais caras, como é o caso da utilização de cimento com bentonite. Este composto pode ser aplicado em areia e argila, desde que os seus vazios sejam consideráveis. Esta opção traduz-se em resultados bem mais satisfatórios (Blake, 2001).

Segundo Blake (2001), para minorar os gastos da combinação cimento-bentonite, é comum introduzir areia no composto. Note-se que esta combinação só deve ser aplicada em solos com vazios grandes, maiores que os “normais”. Os resultados obtidos são bem mais económicos.

1.2.13.2. SOLUÇÃO

A injeção de uma solução tem aplicação sobretudo em solos finos (Blake, 2001).

Este método baseia-se na combinação de químicos à base de silicatos de sódio. Note-se porém que a injeção pode ser solução dupla, solução simples ou ainda uma mistura à base de uma vasta combinação de químicos. Esta última injeção é muito mais cara, embora corresponda aos melhores resultados (Blake, 2001).

No caso de solução dupla, no furo injecta-se silicato de sódio seguido de um sal (por exemplo, clorídrico de cálcio). Este tem de ser um processo rápido, daí a furação não ser muito profunda. Esta solução implica um espaçamento de aproximadamente 600mm entre os centros dos furos. Este método melhora a resistência do solo de uma forma pouco notável, no entanto, torna-o mais impermeável (Blake, 2001).

Para a aplicação de soluções simples, misturam-se dois químicos antes da injeção. Pode ainda misturar-se um terceiro com intuito de retardar o assentamento. Os furos podem por isto ficar mais afastados. O solo torna-se menos permeável, mas não aumenta a sua resistência (Blake, 2001).

1.2.13.3. EMULSÃO AERIZADA

A injeção de uma emulsão aerizada consiste em utilizar uma calda com base em cimento ou compostos orgânicos em que é emulsificado um gás. As propriedades da espuma resultante dependem da distribuição das bolhas de gás que, por sua vez, dependem dos materiais e método de preparação. As espumas não são particularmente resistentes e este tipo de calda sendo usado principalmente como enchimento (Blake, 2001).

1.3. ANÁLISE COMPARATIVA DOS MÉTODOS APRESENTADOS

Com base num estudo realizado por Puller (1996), foi preparada uma tabela com uma análise comparativa de alguns métodos. Dada a sua extensão, esta tabela encontra-se apresentada no anexo A.

Nessa tabela os métodos são descritos sumariamente, incluindo-se uma referência aos que melhor se adequam aos vários tipos de solos. Inclui-se ainda questões relativas à aplicabilidade, vantagens e desvantagens e as limitações em profundidade de cada método. Nessa tabela são envolvidos métodos que não se encontram na secção 1.2.

1.4. AVALIAÇÃO DA PERMEABILIDADE DO SOLO

1.4.1. INTRODUÇÃO

De acordo com a lei de Darcy, o coeficiente de permeabilidade, K , é a relação entre a percentagem de água que passa num solo saturado sob um dado gradiente hidráulico. Ou seja é um parâmetro que depende dos vazios e granulometria do terreno. Assim, a permeabilidade é um dos elementos mais importantes para o dimensionamento do rebaixamento do nível freático (Transportation, 2007).

Nesta secção e nas seguintes apresentam-se alguns ensaios utilizados para avaliar a permeabilidade do solo. A informação apresentada na Tabela 3, resume os métodos apresentados para obter a permeabilidade de um solo, em laboratório e em campo. Estes métodos foram coligidos em várias fontes: Department of the Army, 1983; Fernandes, 2006 e Feup, 2008.

Tabela 3 – Ensaios para avaliação da permeabilidade do solo

<u>Ensaio de Laboratório</u>	<u>Ensaio “in situ”</u>
Ensaio com permeâmetro de carga constante	Ensaio de carga hidráulica constante
Ensaio com permeâmetro de carga variável	Ensaio de carga variável
Ensaio edométrico	

De entre os ensaios de laboratório, apenas se referem os aplicáveis a solos, excluindo-se assim os métodos aplicáveis a maciços rochosos.

1.4.2. RELAÇÃO PERMEABILIDADE E GRADIENTE HIDRÁULICO

Tal como se referiu atrás, o coeficiente de permeabilidade do solo relaciona-se com o gradiente hidráulico. Nesta secção essa relação é apresentada.

Quando um material contém vazios é considerado permeável. Quer-se com isto dizer que existem espaços vazios para a passagem de água (Murthy, 2003).

A permeabilidade, segundo Alonso (2007), “é a propriedade dos solos que indica a maior ou menor facilidade oferecida à passagem da água por intermédio dos seus vazios”. Se isto for quantificado, existe um coeficiente de permeabilidade (K), cujo valor corresponde à maior ou menor vazão de água, proporcionalmente. Ou seja, se K for grande, então a sua capacidade de vazão também o é, o contrário também é aplicável, se K for pequeno a sua capacidade de vazão também o é (Alonso, 2007).

Quando a água segue o seu curso, ocorre alguma resistência por parte das partículas sólidas que lhe estão associadas. Para isso a equação de Bernoulli, em conjunto com as leis da mecânica dos fluidos, permite obter a diferença de altura entre dois pontos distintos, à superfície de um fluido. As equações que se seguem recorrem às grandezas

ilustradas na Figura 10 (Murthy, 2003), que pretende representar o fluxo de água entre dois pontos, designados por A e B, numa amostra de solo.

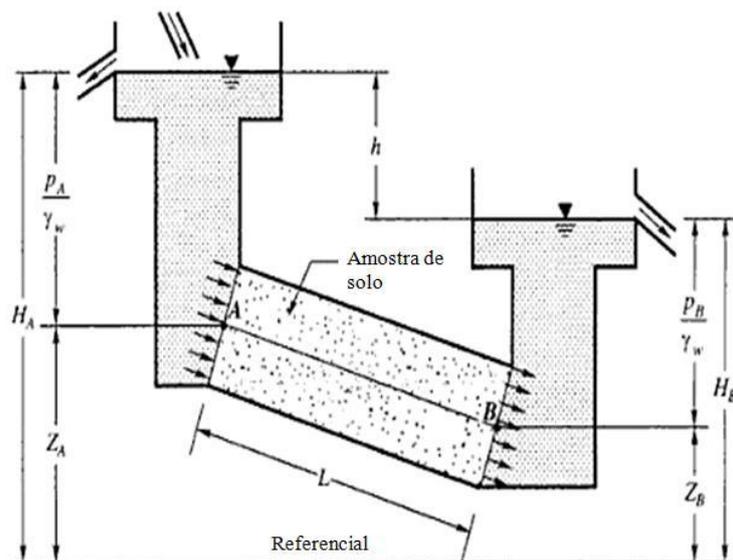


Figura 10- Fluxo de água numa amostra de solo (adaptado de Murthy, 2003)

A carga total em A, é dada por:

$$Z_A + \frac{P_A}{\gamma_w} + \frac{U_A^2}{2g} \quad (1)$$

E, de forma análoga, a carga total em B, H_B será:

$$Z_B + \frac{P_B}{\gamma_w} + \frac{U_B^2}{2g} \quad (2)$$

De onde

Z – Cota do ponto (m)

P – Pressão no ponto (kN/m^2)

γ_w - Peso volúmico da água (kN/m^3)

U – Velocidade de fluxo (m/s)

A perda de carga entre A e B, ΔH , é dada por:

$$H_A - H_B = \left(Z_A + \frac{P_A}{\gamma_w} + \frac{U_A^2}{2g} \right) - \left(Z_B + \frac{P_B}{\gamma_w} + \frac{U_B^2}{2g} \right) = \Delta H \quad (3)$$

Em solos, a velocidade da água é muito baixa, pelo que a última parcela das Equações 1 e 2 é desprezável.

A partir desta expressão é possível definir o gradiente hidráulico, para depois se obter a equação que define a permeabilidade (representada pelo coeficiente de permeabilidade, K).

Sabendo que o gradiente hidráulico (i) é igual à perda de carga por unidade de comprimento vem:

$$i = \frac{\Delta H}{L} \quad (4)$$

Onde L é a distância atravessada pela água no seu movimento no solo (ver Figura 10).

Para obter o coeficiente de permeabilidade a partir do gradiente hidráulico é necessário compreender a experiência de Darcy, em que é estabelecida uma relação entre gradiente hidráulico e coeficiente de permeabilidade. A base da experiência é uma das leis fundamentais da hidráulica: o caudal que entra numa dada amostra de solo é igual ao caudal que sai dessa mesma amostra. Assumindo condições de escoamento perfeitas, isto é, sem que haja regimes turbulentos de escoamento, tem-se que:

$$Q = K \times \frac{\Delta H}{L} \times A \quad (m^3/s) \quad (5)$$

Combinando as Equações (4) e (5) vem

$$Q = K \times i \times A \Leftrightarrow \frac{Q}{A} = K \times i \quad (6)$$

$$Q = U \times A \quad (m^3/s) \quad (7)$$

Igualando as Equações 6 e 7 tem-se que

$$U = K \times i \quad (m/s) \quad (8)$$

Então,

$$K = \frac{U}{i} \quad (m/s) \quad (9)$$

Sendo U é a velocidade aparente de fluxo (Alonso, 2007).

1.4.3. ENSAIOS DE CAMPO OU “IN SITU”

Os métodos de obtenção da permeabilidade em campo baseiam-se sempre no mesmo princípio prático: faz-se um furo no solo (em geral, com um equipamento rotativo), mede-se o nível de água no furo e faz-se uma avaliação da água já bombada (Alonso, 2007).

Nesta secção são apresentados dois métodos para a determinação em campo da permeabilidade de um maciço de solo. A diferença entre os dois métodos está na forma como a água é introduzida no solo. Esta pode ser infiltrada - ensaios de carga hidráulica constante, ou bombada - ensaios de carga hidráulica variável (Alonso, 2007).

1.4.3.1. ENSAIO DE CARGA HIDRÁULICA CONSTANTE

A base do ensaio de carga hidráulica constante é a introdução ou a bombagem de um caudal constante na cavidade criada de forma a verificar-se a estabilização do nível aquífero na sondagem (FEUP, 2008).

Injecta-se água até obtenção de um regime estacionário, caracterizado por um nível de água constante, e mede-se a vazão, mantendo-se esse nível (Alonso, 2007).

É relevante referir que para a execução deste método considera-se o meio isotrópico e homogéneo e o escoamento laminar e permanente. Igualmente relevante de referir é o facto de aqui só se descrever o ensaio de carga hidráulica constante num furo revestido.

Assim, o ensaio consiste em perfurar um comprimento, l , de solo e encher este furo de água, mantendo-o completamente preenchido com água durante 10min. Passados estes 10min o solo nas imediações do furo já se encontrará saturado; nessa altura injecta-se novo volume de água e mede-se esse volume, novamente num espaço de tempo de 10min (Alonso, 2007).

Para fazer as leituras são precisas sempre duas provetas, uma que serve de auxiliar aquando da injeção de água, e a outra que serve para manter o nível de água constante (Alonso, 2007).

Com o ensaio executado, é aplicada uma expressão matemática que relaciona todos os parâmetros obtidos, permitindo assim chegar a K, pela Equação 10 (Alonso, 2007).

$$K = C_1 \times \frac{Q}{l \times p} \quad (m/s) \quad (10)$$

Em que,

Q – caudal introduzido (l/min)

l – comprimento de solo a saturar

p – pressão (Kgf/cm²)

O valor da constante C₁ é dado pela Figura 11.

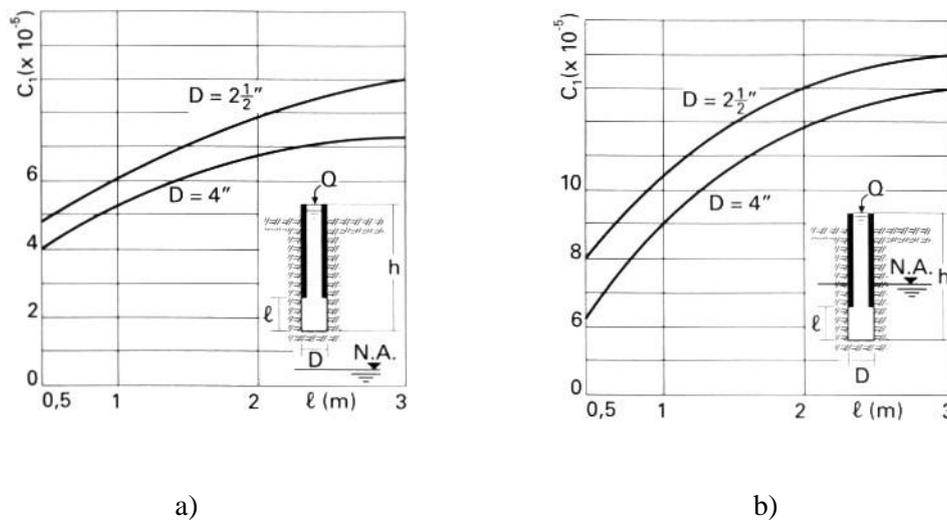


Figura 11 - Ábaco para obtenção do valor de C₁: a) acima do nível freático e b) abaixo do nível freático (Alonso, 2007)

A parte negativa deste cálculo é o facto de só funcionar para poços cujo diâmetro é o representado na Figura 11. Para ultrapassar essa problemática, generalizou-se muito mais a equação, podendo esta ser aplicada a um qualquer diâmetro de poços, Equação 11.(Alonso, 2007)

$$K = \frac{Q}{h} \times \frac{1}{C_2 \times r} \quad (m/s) \quad (11)$$

De onde,

Q – caudal introduzido (l/min)

h – altura do fundo do poço à superfície (m)

r – metade do diâmetro D (m)

O valor de C₂ é dado pela Figura 12

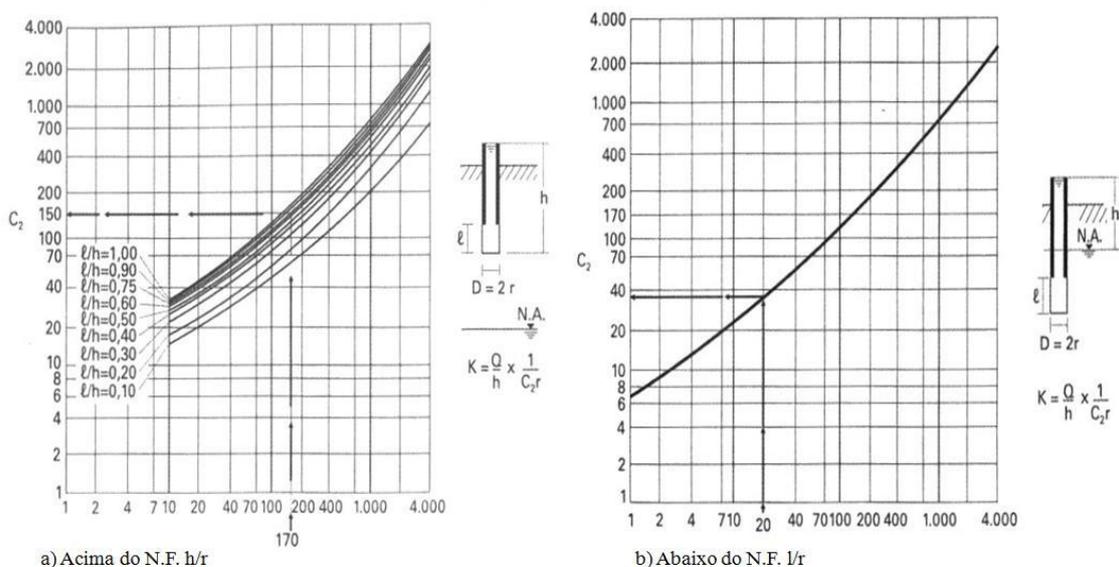


Figura 12 - Ábaco para obtenção do valor de C₂ (Alonso, 2007)

1.4.3.2. ENSAIO DE CARGA HIDRÁULICA VARIÁVEL

De acordo com FEUP (2008), para realizar ensaio de carga hidráulica variável introduz-se ou bombeia-se um dado volume de água numa cavidade e registam-se as variações de nível piezométrico no furo de sondagem ao longo do tempo.

A estrutura do ensaio é feita em torno de um poço central com uma bomba de assentamento submersa e com registo que permite controlar o volume de líquidos e fazer a sua medição (Alonso, 2007). Na Figura 13 pode visualizar-se a posição dos piezómetros que permitem a execução deste ensaio.

Tal como apresentado na Figura 13, as 3 linhas formam entre si 120° onde são instalados piezómetros que registam a descida do nível freático ou a carga piezométrica (Alonso, 2007).

O ensaio inicia-se com um estudo da envolvente, para avaliar se o aquífero é livre ou artesiano, e ainda qual a sua extensão. Seguidamente, bombeia-se água e são feitas anotações referentes ao tempo, variação do nível de água (ou altura piezométrica), e ainda o volume de água retirado. Este processo é repetido até ocorrer a estabilização do nível freático (Alonso, 2007).

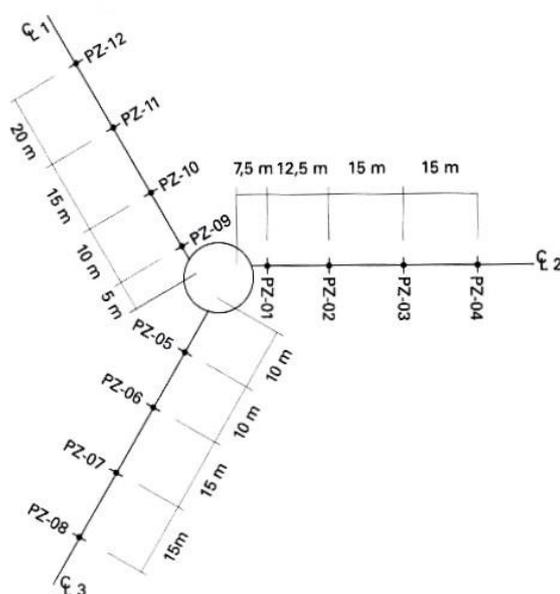


Figura 13 - Possível disposição em planta de um ensaio de carga variável (Alonso, 2007)

A Figura 14 representa os dois gráficos possíveis de obter com a execução dos ensaios: altura piezométrica em função do tempo, até se atingir a estabilidade; e volume de líquido em função do tempo, até atingir a estabilização dos valores.

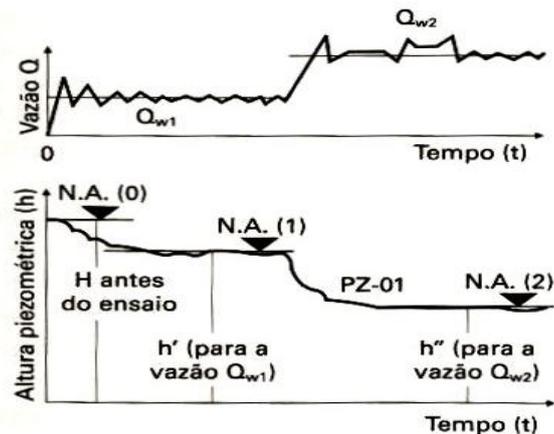


Figura 14 - Gráficos relativos ao nível do piezômetro e volume de líquido (vazão) (Alonso, 2007)

Após a execução do ensaio e ainda dos valores tratados, aplicam-se as fórmulas necessárias para a obtenção de K (Alonso, 2007).

Para um aquífero livre,

$$K = \frac{Q}{\pi} \times \frac{\Delta \ln r}{h_2^2 - h_1^2} \quad (m/s) \quad (12)$$

Para aquífero artesiano,

$$K = \frac{Q}{2 \times \pi \times L} \times \frac{\ln(r_2) - \ln(r_1)}{h_2 - h_1} \quad (m/s) \quad (13)$$

Na Figura 15 é possível ter uma percepção do significado das incógnitas representadas na Equação 12, Equação 13.

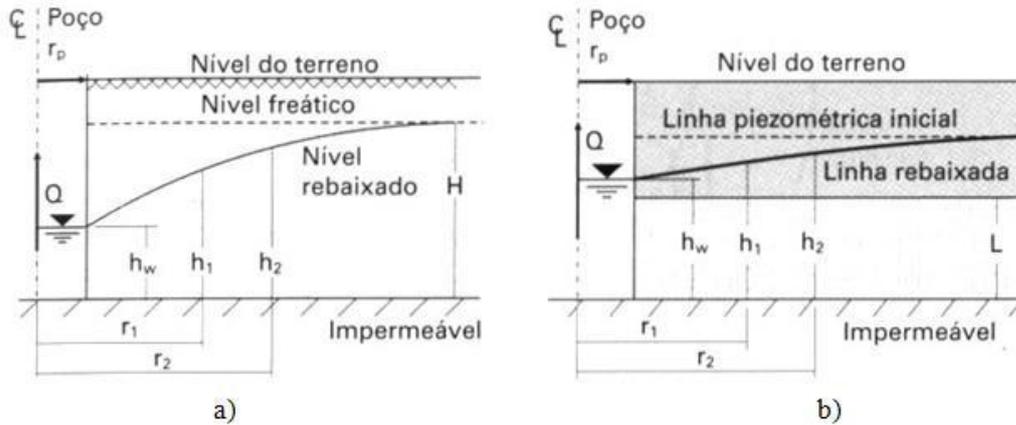


Figura 15 - Ensaio de carga hidráulica variável: a) aquífero livre (fluxo gravitacional; b) aquífero artesiano, (adaptado de Alonso, 2007)

1.4.4. ENSAIOS DE LABORATÓRIO

Os ensaios de laboratório funcionam sempre com o mesmo princípio. Recolhe-se o Volume de água (V_w) que atravessa um determinado espaço de tempo (t), num recipiente graduado e calcula-se o volume de água injectada por unidade de tempo que atravessa uma amostra, em suma Q (Alonso, 2007).

1.4.4.1. ENSAIOS COM PERMEÂMETRO DE CARGA CONSTANTE

Este ensaio é aplicado, essencialmente, a solos granulares (areias e cascalhos).

O princípio deste ensaio é manter o nível de água na entrada, constante (Alonso, 2007).

Fundamentando-se na lei de Darcy e também na Equação 6 (secção 1.4.2), vem:

$$\frac{V_w}{t} = k \times \frac{\Delta H}{l} \times A \quad (14)$$

$$K = \frac{V_w \times l}{A \times \Delta H \times t} \quad (m/s) \quad (15)$$

Todos os elementos se encontram referenciados na Figura 16.

A – área do recipiente onde se encontra a amostra de solo (m^2)

l – altura do recipiente onde se encontra a amostra de solo (m)

ΔH – diferença de altura entre o nível de água do recipiente superior e a entrada de água para a bureta (m)

t – intervalo de tempo (s)

V_w – volume de água (m^3)

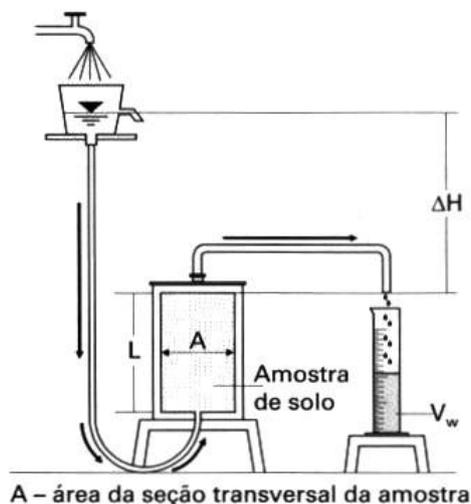


Figura 16 - Esquema do ensaio de carga variável (Alonso, 2007)

Faz-se uma ressalva de explicação ao facto de este ensaio ser utilizado para solos como areias e cascalhos (Alonso, 2007).

1.4.4.2. ENSAIOS COM PERMEÂMETRO DE CARGA VARIÁVEL

Este método é mais exacto quando se trata de solos de partículas finas, entenda-se argilas e siltes (Fernandes, 2006).

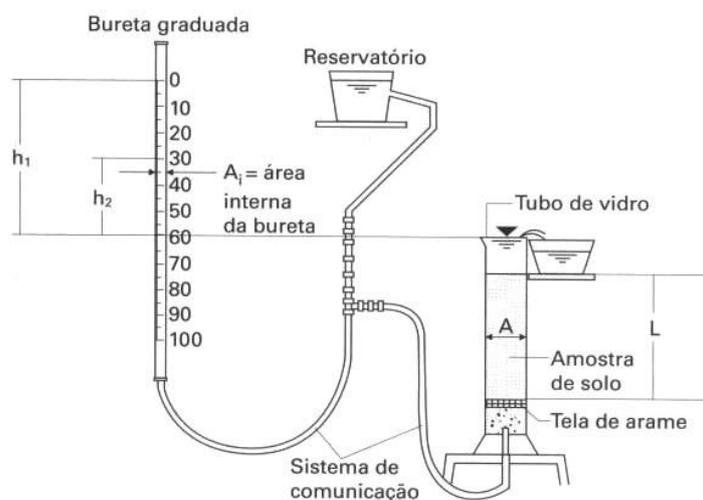


Figura 17 - Esquema do ensaio de carga constante (Alonso, 2007)

O ensaio (Figura 17) passa pela observação da descida de água na bureta, cuja secção é constante (A_i). Sabendo-se que num intervalo de tempo (dt), o nível de água desce (dh) (Alonso, 2007).

Se pelas leis da física uma velocidade é um comprimento percorrido num dado intervalo de tempo, então o mesmo ocorre aqui. A velocidade com que a água desce é dada por:

$$-\frac{dh}{dt} \quad (16)$$

Como se trata de uma perda de carga (h), justifica-se o sinal negativo (Alonso, 2007).

Por fim, para obtenção da permeabilidade (K) vem:

$$K = \frac{l \times A_i}{A \times (t_2 - t_1)} \ln \frac{h_1}{h_2} = 2.3 \times \frac{l \times A_i}{A \times (t_2 - t_1)} \log \frac{h_1}{h_2} \quad (m/s) \quad (17)$$

$t_2 - t_1$ é equivalente ao período de tempo percorrido para a descida de h_1 para h_2 (Alonso, 2007).

1.4.5. FÓRMULAS EMPÍRICAS

As fórmulas empíricas são o método comumente utilizado para a determinação da permeabilidade de solos (Alonso, 2007, FEUP, 2008, Rieke and Chilingar, 1974).

Existem várias fórmulas que permitem obter o coeficiente de permeabilidade, K . A mais utilizada é a apresentada na Equação 18 (Fórmula de Hazen), em que C é uma constante e D_{10} é o diâmetro associado à fracção mais fina do solo

$$K = C \times D_{10}^2 \quad (m/s) \quad (18)$$

Vários autores propuseram intervalos de valores para C . Contudo, nesta secção somente se faz referência a Hazen (1930) e Lambe & Whitman (1979) (Alonso, 2007, FEUP, 2008, Rieke and Chilingar, 1974). O intervalo proposto por Hazen (1930) encontra-se na gama de 10000, já o de Lambe & Whitman (1979) é [1000;4200] (Fernandes, 2006).

Esta expressão é válida somente para areias fofas e uniformes. No entanto, em geral, a Equação 18 é aplicada a solos granulares (Caputo, 1967).

Tendo em atenção a temperatura T ($^{\circ}C$) a fórmula escreve-se (Caputo, 1967):

$$K = C(0.7 + 0.03T)d_{10}^2 (cm/s) \quad (19)$$

Já se referiu o facto de a Equação 18 não ser aplicável a argilas. Rieke and Chilingar (1974) referem que foram feitos variadíssimos estudos que revelaram a incoerência da Equação 22 para argilas saturadas. Nishida e Nakagawa (1969) propõem o cálculo da permeabilidade de argilas saturadas (Rieke and Chilingar, 1974) com:

$$\log_{10} k = \left[\frac{e}{0.01 \times IP + 0.05} \right] - 10 \quad (20)$$

Onde:

e- índice de vazios ou porosidade

IP – Índice de plasticidade (%)

Esta equação é dada em cm/s (Rieke and Chilingar, 1974).

O facto de só se falar nesta equação para a solução de argilas saturadas deve-se à heterogeneidade deste tipo de material, dificultando assim a homogeneidade de uma equação (Rieke and Chilingar, 1974).

1.4.6. ANÁLISE COMPARATIVA

De um modo geral, os ensaios “*in situ*” são os mais adequados, dado que a sua área de influência é maior. No entanto nem sempre é possível realizar estes ensaios (Alonso, 2007, Department of the Army, 1983, Fernandes, 2006, FEUP, 2008, Transportation, 2007).

Quanto aos ensaios de laboratório, estes não são tão realistas. A grande vantagem destes ensaios é serem realizados com alguma rapidez e sob condições idênticas, facilitando a comparação de resultados. Embora os ensaios de laboratório permitam estimar a permeabilidade dos solos, esta nem sempre corresponde à realidade, isto deve-se, por exemplo, a efeitos de escala, condições fronteira ou até mesmo à representatividade das amostras utilizadas (Alonso, 2007, Department of the Army, 1983, Fernandes, 2006, FEUP, 2008, Transportation, 2007).

Assim, sempre que possível, devem aplicar-se os ensaios “*in situ*”. Caso tal seja demasiado caro ou caso a dimensão da obra não justifique esta intervenção, a solução é optar por valores e ensaios de laboratório ou até recorrer a valores estimados para solos e condições semelhantes (Alonso, 2007, Department of the Army, 1983, Fernandes, 2006, FEUP, 2008, Transportation, 2007).

Na Tabela 4 e na Tabela 5 são apresentados valores típicos da permeabilidade e classes associadas a esta grandeza de alguns tipos de solos.

Tabela 4- Valores da permeabilidade atribuída a cada tipo de solo(Fernandes, 2006)

<u>Tipo de Solo</u>	<u>K(m/s)</u>
Cascalhos limpos	$>10^{-2}$
Areia grossa	10^{-2} a 10^{-3}
Areia média	10^{-3} a 10^{-4}
Areia fina	10^{-4} a 10^{-5}
Areia siltosa	10^{-5} a 10^{-6}
Siltes	10^{-6} a 10^{-8}
Argilas	10^{-8} a 10^{-10}

Tabela 5 - Classificação de Terzaghi e Peck (1967) para a permeabilidade dos solos(Fernandes, 2006)

<u>Grau de Permeabilidade</u>	<u>K (m/s)</u>
Alto	$>10^{-3}$
Médio	10^{-3} a 10^{-5}
Baixo	10^{-5} a 10^{-7}
Muito baixo	10^{-7} a 10^{-9}
Praticamente impenetrável	$<10^{-9}$

1.4.7. ANISOTROPIA DE PERMEABILIDADE

A anisotropia de permeabilidade é mais um factor extremamente relevante no cálculo da permeabilidade.

Os maciços terrosos são, de uma forma mais ou menos profunda, afectados pela chamada anisotropia de permeabilidade. A razão deste facto deve-se à orientação das partículas de cada camada de solo serem afectadas pelo sedimentos superiores “obrigando” estas partículas de maior dimensão a tornarem-se orientadas na direcção horizontal, facilitando assim a circulação da água. O mesmo autor refere que, de um modo geral, a sua relevância depende da geometria da granulometria de um solo, ou seja, quanto mais laminar for a granulometria, mais relevante é o factor anisotropia (Fernandes, 2006).

Em suma, os solos granulares, salvo raras excepções, em pouco são afectados pela anisotropia. O mesmo é possível de ser dito sobre as argilas, desde que não se trate de estratos com algum peso histórico (Fernandes, 2006).

Posto isto, é possível dizer-se que a estratificação do solo é o factor mais importante da anisotropia de permeabilidade (Fernandes, 2006).

Para as condições da Figura 18, em que se representa um perfil de solo constituído por n camadas, com um determinado valor para as permeabilidades horizontal e vertical, pode obter-se a equação da permeabilidade equivalente horizontal, K_h^e , (Equação 21) e da permeabilidade equivalente vertical, K_v^e , (Equação 22).

$$K_h^e = \frac{\sum_{i=1}^n K_{hi} \times h_i}{\sum_{i=1}^n h_i} \quad (m/s) \quad (21)$$

$$K_v^e = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{K_{vi}}} \quad (m/s) \quad (22)$$

Na Figura 19, está representado um maciço constituído por duas camadas com igual altura ($h_1=h_2$), cada uma delas é isotrópica em termos de permeabilidade. Na Equação 23 está representada uma relação entre os valores da permeabilidade destas camadas (K_1 e K_2). O meio equivalente é anisotrópico em termos de permeabilidade.

$$\chi = \frac{K_2}{K_1} \quad (23)$$

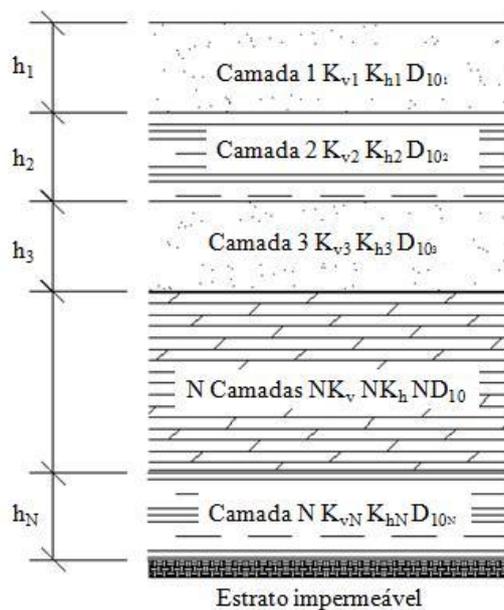


Figura 18 – Maciço

Em que h_i – Altura de camada i; K_{h_i} – Permeabilidade horizontal da camada i; K_{v_i} – Permeabilidade vertical da camada i.

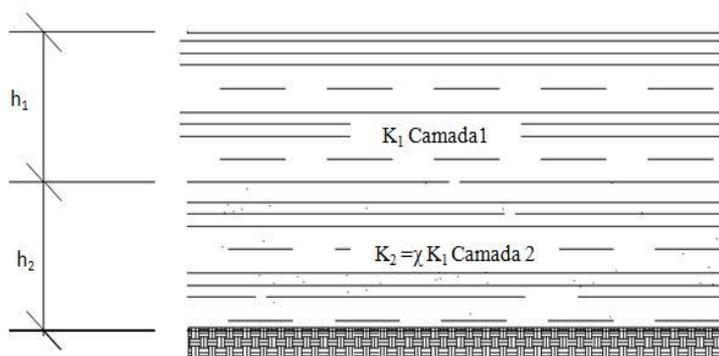


Figura 19 - Maciço composto por duas camadas isotrópicas em termos de permeabilidade

Determinando a permeabilidade equivalente vertical e horizontal, por aplicação da relação da Equação 23 nas Equações 21 e 22 vem:

$$K_h^e = \frac{K_1(1 + \chi)}{2} \quad (m/s) \quad (24)$$

$$K_v^e = \frac{2 \times \chi \times K_1}{(1 + \chi)} \text{ (m/s)} \quad (25)$$

Assim, relacionando a Equação 24 e a Equação 25 obtém-se a Equação 26, que relaciona as permeabilidades equivalentes horizontal e vertical do maciço considerado (Figura 19).

$$\frac{K_h^e}{K_v^e} = \frac{(1 + \chi)^2}{4 \times \chi} \quad (26)$$

Na Tabela 6 são apresentados alguns valores possíveis para a relação da Equação 29, em função de diferentes valores da Equação 23.

Tabela 6 - Anisotropia de permeabilidade formado por duas camadas isotrópicas de igual espessura em função da razão dos coeficientes de permeabilidade de cada uma (Fernandes, 2006)

$\chi = K_2/K_1$	1	5	10	10^2	10^3	10^4
		0.2	0.1	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}
$\frac{K_h^e}{K_v^e}$	1	1.8	3	25.5	250.5	2500.5

A permeabilidade das duas camadas difere, obtendo-se assim um meio anisotrópico em termos de permeabilidade, com uma permeabilidade na direcção horizontal superior ou muito superior à permeabilidade na direcção vertical (Fernandes, 2006).

Tendo em conta que o valor do coeficiente de permeabilidade é muito sensível em relação à granulometria do solo, variações relativamente modestas no tamanho das partículas são susceptíveis de induzir variações significativas de permeabilidade entre subcamadas (Fernandes, 2006).

1.5. ASSENTAMENTOS

Segundo Xanthakos (1994), a bombagem de finos e a consolidação, assim como a resposta elástica dos solos, podem causar assentamentos nas zonas em que se processa o rebaixamento do nível freático. Deve notar-se que as escavações também causam assentamentos, que devem ser considerados junto com todos os elementos que

provocam assentamentos nas estruturas adajacentes à obra. O assentamento total em torno da escavação associada ao rebaixamento do nível freático deve ser estimado e avaliado considerando os valores admissíveis para as estruturas adjacentes (Xanthakos et al., 1994)

Captuto (1966), refere que o rebaixamento do nível de água provoca, no solo, em consequência do aumento do peso específico aparente – não mais sujeito ao impulso hidrostático – um acréscimo de pressão entre as partículas constituintes do terreno.

De facto, o peso volúmico do solo submerso:

$$\gamma_{sub} = (\gamma_s - \gamma_w)(1 - n) \quad (27)$$

Passa a ser o do solo seco:

$$\gamma_d = \gamma_s(1 - n) \quad (28)$$

Do acréscimo de pressão resulta um aumento de carga e, em consequência, o aparecimento de assentamento.

Se o solo é constituído por camadas de areia ou de pedregulhos, o assentamento produz-se simultaneamente com o rebaixamento do nível freático e é, em geral, de pouca importância.

O mesmo já não acontece quando no terreno se encontra uma camada de argila compressível. A sobrecarga decorrente do rebaixamento provocará o adensamento desta camada, podendo assim dar lugar a assentamentos nas fundações das obras vizinhas.

Os assentamentos que se produzem, assim como a sua evolução com o tempo, podem ser calculados segundo a teoria de consolidação de Terzaghi.

A ocorrência de assentamentos pode ter diversas causas:

- Vibração do solo, em que a estrutura do solo sofre um rearranjo e desce em altura;
- Remoção de solo de uma zona mais profunda, criando vazios que são preenchidos provocando assentamentos;
- Remoção da água dos vazios do solo.

Esta última causa é associada ao rebaixamento do nível freático. Assim, a indução do rebaixamento do nível freático vai provocar assentamentos nos solos envolvidos.

Quando o solo se encontra saturado, os vazios do solo estão totalmente preenchidos com água. Porém quando a água é retirada, há rearranjos da estrutura do solo, de forma a formar uma estrutura estável. Em consequência desse rearranjo ocorrem deformações no solo, essencialmente verticais, designadas por assentamentos (Medeiros, 2008, Tercero, 2005, Vitor and Kimus, 2000).

Dependendo da sua magnitude, os assentamentos podem comprometer estruturas vizinhas e infra-estruturas existentes nos solos envolvidos. Assim, a selecção do método de rebaixamento do nível freático deve ser realizada tendo em conta os assentamentos que lhe estão associados e as eventuais consequências dos mesmos.

Além disso, do ponto de vista ambiental, retirar a água do solo implica a morte precoce dos seres vivos aí existentes e que dependem desta saturação para se manterem saudáveis (Medeiros, 2008, Tercero, 2005, Vitor and Kimus, 2000).

Assim, é necessário fazer um estudo prévio da zona circundante que inclua o solo, a superfície e todos os elementos que a compõem.

Em muitos casos, o rebaixamento do nível freático é temporário. Assim, após o rebaixamento e o fim da escavação a água é reintroduzida no solo, restabelecendo-se os níveis de saturação. Note-se que esta situação não reverte os assentamentos ocorridos (Medeiros, 2008, Tercero, 2005, Vitor and Kimus, 2000).

2. CAPÍTULO 2 – MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS DE REBAIXAMENTO DO NÍVEL FREÁTICO COM RECURSO A BOMBAGEM

2.1. INTRODUÇÃO

Ao longo deste capítulo são apresentados dois métodos de cálculo, utilizados no dimensionamento do rebaixamento do nível freático e implementados numericamente neste trabalho. Retrata-se ainda um método que não foi testado, porém é de relevância considerável, em desenvolvimentos futuros.

Puller (1996) faz referência a várias bases de cálculos que são necessárias adquirir antes do dimensionamento. Todos os métodos em que se baseia são métodos de bombeamento, sendo que por norma a diferença entre eles é a geometria do terreno ou da escavação.

Alonso (2007), refere que a Equação 5 é a base do cálculo do rebaixamento do nível freático. Contudo, e tal como já referido na secção 1.4.2, esta é um base teórica e meramente estimativa, por apenas ser aplicável a escoamentos laminares. Como cada caso é um caso, e são extremamente raros os casos de regimes laminares, é necessário moldar esta equação para que com ela se possa fazer dimensionamento (Alonso, 2007).

Em geral, quando existe a necessidade de aplicação de um sistema que permita o rebaixamento do nível freático, os solos atravessados são solos granulares. A caracterização destes solos, nomeadamente em laboratório, é extremamente complexa. Assim, a determinação da permeabilidade deste tipo de solos, a aplicar no dimensionamento, deverá ser feita através de ensaios de campo ou recorrendo a valores estimados ou empíricos. Estes métodos foram discutidos na secção 1.4.

Assim, nas secções seguintes descrevem-se os dois métodos de dimensionamento de sistemas de rebaixamento de nível freático implementados numericamente neste trabalho. Esses métodos são: o método de rebaixamento com recurso a sistema de fila de poços simples ou dupla e ainda o rebaixamento com poços, aplicados a escavações quadradas ou rectangulares profundas. Descreve-se ainda o método para

dimensionamento de sistemas de rebaixamento de grandes áreas em planta que, por limitações de tempo, não foi implementado numericamente.

2.2. FILA DE POÇOS SIMPLES OU FILA DUPLA

O método de rebaixamento com recurso a fila de poços simples ou dupla, tal como o nome indica, permite obter dois tipos de soluções para uma obra. A primeira solução inclui a execução de uma fila simples de poços, todos eles com determinado espaçamento. A segunda solução corresponde à execução de uma fila dupla de poços. Em ambos os casos a finalidade é a bombagem de um determinado caudal. O factor que permite chegar à selecção do tipo de soluções final é o raio de influência (Puller, 1996).

Para aplicação deste método é necessário começar por calcular o valor do raio de influência, R_0 (Equação 29), correspondente à hipótese da existência de um único poço que bombeia toda a água necessária (Puller, 1996).

$$R_0 = 1500 \times (H - h_D) \times K^{1/2} \quad (29)$$

Em que H é a altura do nível freático (antes do rebaixamento) e h_D é a altura máxima de água admitida após o rebaixamento, ambas medidas desde o estrato impermeável. O coeficiente de permeabilidade, k , será o valor da permeabilidade equivalente do solo em causa.

Na Figura 20 e na Figura 21 estas grandezas são representadas.

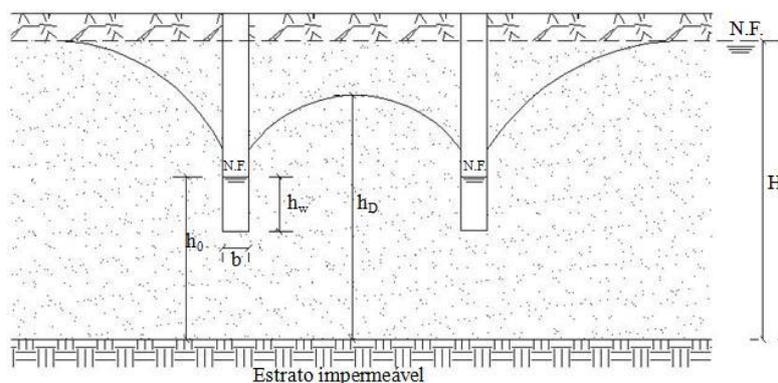


Figura 20 - Perfil de representativo do rebaixamento do nível freático (I)

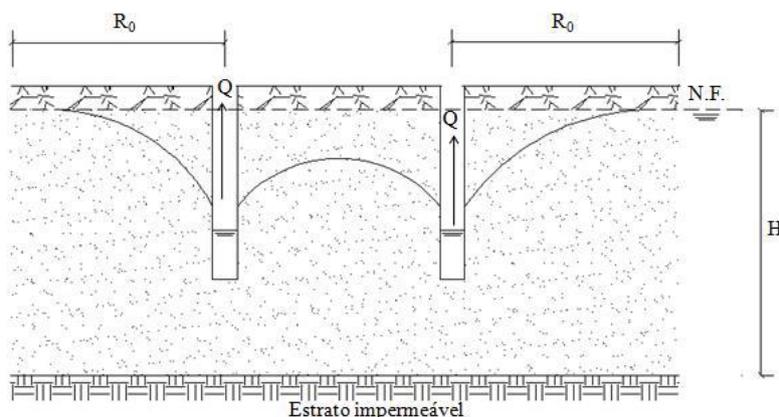


Figura 21 - Perfil de representativo do rebaixamento do nível freático (II)

De acordo com (Puller, 1996), a altura máxima de água admitida após o rebaixamento, medida desde o estrato impermeável (h_D) é um valor obtido em obra ou calculável. Para tal, deve recorrer-se à Equação 30

$$h_D = h_0 \times \left[\frac{C_1 \times C_2}{R_0} (H - h_0) + 1 \right] (m) \quad (30)$$

Em que h_0 , representado na Figura 20, é a altura de água no poço, medida até ao estrato impermeável (Puller, 1996). Esta grandeza deve ser determinada através da Equação 31, resolvendo-a em ordem a h_D . Assim, verifica-se que para aplicar o método é necessário conhecer um dos valores, h_D ou h_0 . Em suma, um destes valores tem de ser um dado da obra (Puller, 1996).

Na Equação 30 são ainda incluídas duas constantes, C_1 e C_2 , que são determinadas graficamente, de acordo com a Figura 22 (Puller, 1996).

Após a determinação de R_0 é necessário verificar se a solução a adoptar é a de fila única ou de fila dupla de poços. Para tal é necessário proceder à análise da relação apresentada na Equação 31. Caso esta condição seja verdadeira, a solução a adoptar é a de fila simples de poços. Caso contrário, é necessário recorrer a uma fila dupla de poços (Puller, 1996).

$$\frac{R_0}{H} \geq 3 \quad (31)$$

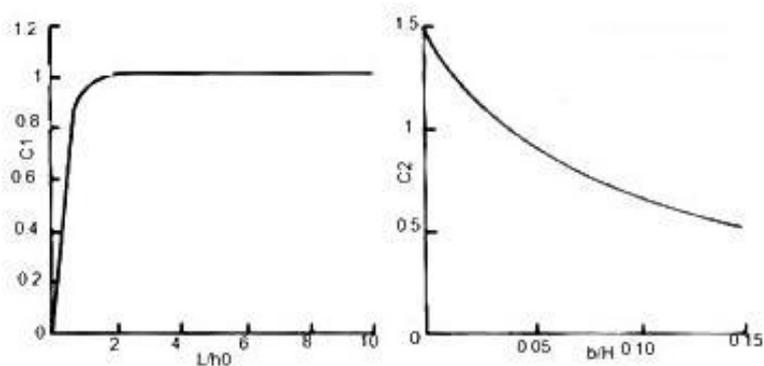


Figura 22 - Determinação gráfica de C_1 e C_2 , (adaptado de Puller, 1996)

Onde L é a distancia pretendida entre poços, medida em metros, e b o diâmetro do poço, também este medido em metros.

Caso a verificação da Equação 31 seja falsa, isto é, na necessidade de aplicar uma solução de bombagem com fila dupla de poços, é necessária a obtenção de um novo R_0 . Para isso recorre-se ao gráfico da Figura 23 (Puller, 1996).

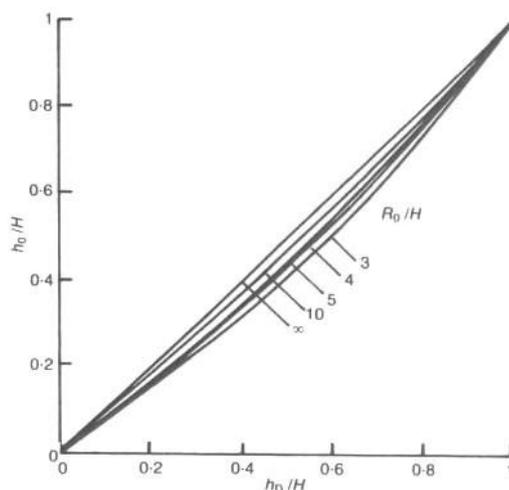


Figura 23 - Gráfico de cálculo de novo R_0 (Puller, 1996)

Na implementação deste método o ponto seguinte corresponde ao cálculo do caudal a ser bombado. Este caudal é determinado de forma igual no caso de uma fila simples de poços como numa fila dupla, diferindo apenas R_0 . De facto, se a solução a adoptar for a de fila dupla de poços, R_0 é o que se obtém da Figura 23, se a solução a usar for a de

uma fila simples de poços o valor de R_0 é o proveniente da Equação 29. Assim, para calcular o caudal total a bombear aplica-se a Equação 32

$$Q = \left[\left(0.73 + 0.27 \times \frac{H - h_0}{H} \right) \times \frac{K \times C}{2 \times R_0} \times (H^2 - h_0^2) \right] (m^3/s) \quad (32)$$

Nesta equação, C é o comprimento, em metros, da vala a escavar.

Por último, é necessário determinar a quantidade de poços e ainda o espaçamento entre eles. Para isso recorre-se ao ábaco apresentado na Figura 24 que permite obter o espaçamento entre poços. Para obter a quantidade de poços, n , ao longo do comprimento da vala deve recorrer-se à Equação 33 (Puller, 1996).

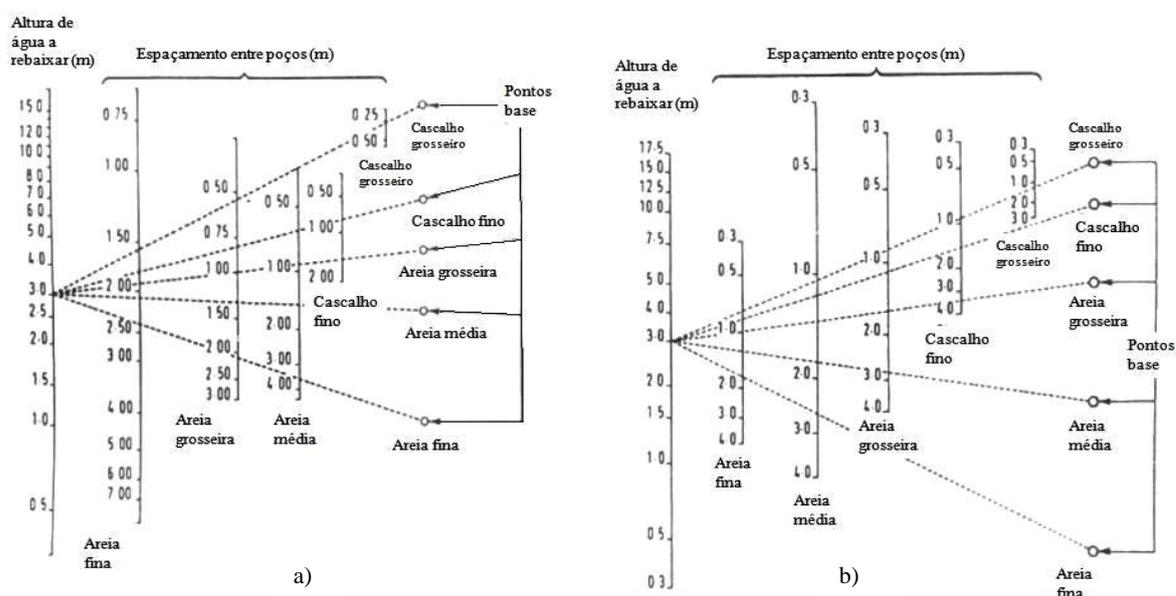


Figura 24 - Ábaco para determinação do espaçamento entre poços: a) areias e gravilhas uniformes; b) areias e gravilhas estratificadas (adaptado de Puller, 1996)

$$n = \frac{C}{\text{espaçamento entre poços}} \quad (33)$$

2.3. POÇOS APLICADOS A ESCAVAÇÕES QUADRADAS OU RECTANGULARES PROFUNDAS

No dimensionamento de sistemas de rebaixamento do nível freático em escavações rectangulares ou quadrangulares profundas, existem algumas etapas de cálculo necessárias (Puller, 1996).

O processo inicia-se fazendo uma estimativa do caudal a bombear (Equação 34).

$$Q = \frac{\pi \times K (H^2 - h_0^2)}{\ln(R_0) - \ln(a)} \text{ (m}^3/\text{s)} \quad (34)$$

Nesta equação, K, H e h_0 têm o significado já descrito atrás (secção 2.2) e são determinados da mesma forma. O raio de influência do poço, R_0 , embora com o mesmo significado, é determinado de forma um pouco distinta, por aplicação da Equação 35.

Na Equação 36 é apresentada a forma de determinar o coeficiente a da Equação 34, de acordo com a proposta de Puller (1996).

$$R_0 = 3000 \times (H - h_0) \times K^{1/2} \text{ (m)} \quad (35)$$

$$a = \left(\frac{L \times C}{\pi} \right)^{1/2} \quad (36)$$

Tendo em conta que L e C são a largura e o comprimento da escavação, respectivamente, verifica-se que o coeficiente a está directamente ligado à geometria da escavação. Este factor é específico deste método por se tratar de um método direccionado a escavações quadrangulares ou rectangulares (Puller, 1996).

Assim, e com recurso à Equação 34, deve determinar-se uma primeira estimativa do caudal total inicial a bombear (Puller, 1996). Para avaliar o número de poços necessários para bombear esse caudal, é necessário determinar o caudal bombado por poço.

Segundo Alonso (2007), é possível obter este cálculo recorrendo à regra de Sichard (Equação 37).

$$Q_i = 2 \times \pi \times r_w \times h_w \times K \times i \text{ (m}^3/\text{s)} \quad (37)$$

O gradiente hidráulico, i , é um elemento que dita a existência de, por exemplo, possíveis turbulências, ou até mesmo instabilidade dos filtros. Assim, Puller (1996) atribui um valor máximo a esta gradeza (Equação 38).

$$i_{max} = \frac{1}{15 \times K^{1/2}} \quad (38)$$

Note-se que h_w é a altura de água no poço (ver Figura 20). No caso de o poço ser escavado até ao estrato inferior impermeável, h_w será igual a h_0 .

Como facilmente se percebe, o caudal a bombar por poço depende do raio do mesmo, designado por r_w .

Assim, é possível reescrever a Equação 37, sem levar em consideração o facto de poder acontecer a coincidência entre h_0 e h_w :

$$Q_i = 2 \times r_w \times h_w \times \pi \times \frac{K^{1/2}}{15} (m^3/s) \quad (39)$$

Com este valor é possível determinar a quantidade de poços necessária para bombar o caudal estimado: Equação 40 (Puller, 1996).

$$n = \frac{Q}{Q_i} \quad (40)$$

Os valores calculados são valores estimados, com alguns erros associados. Para optimização do cálculo, é necessário minimizar ou eliminar esses erros. Para tal é necessário recorrer à Equação 41, para determinar o valor da altura h_0 correspondente ao caudal total a bombar estimado antes.

$$Q = \frac{\pi \times K \times (h_D^2 - h_0^2)}{\ln(R_0) - \frac{1}{n} \ln(\sum_{i=0}^{i=n} x_i)} (m^3/s) \quad (41)$$

A parcela $\sum_{i=0}^{i=n} x_i$ do numerador corresponde à soma dos valores de x_i , ou seja, a distância entre o centro do poço i e o centro da escavação, este somatório é feito para os n poços existentes. Esta distância, x_i , é determinada aplicando o teorema de Pitágoras (Equação 42), em que l_i é a distância entre o centro do poço i e o centro da escavação,

na direcção da largura da escavação, e c_i é a distância entre o centro do poço i e o centro da escavação, na direcção do comprimento da escavação (Puller, 1996).

$$x_i = \sqrt{l_i^2 + c_i^2} \text{ (m)} \quad (42)$$

Dado que algumas das gradezas da Equação 41 dependem de h_0 , o processo de cálculo é iterativo. De facto, os valores de n , R_0 , e , por conseguinte, os caudais sofrem mutações. Assim sendo, este cálculo iterativo termina quando se encontrar um valor de h_0 da Equação 41 coincidente com o valor de h_0 anterior. Os valores a usar são as soluções dessas equações, correspondendo aos valores a utilizar de: caudal total, caudal por poço e quantidade de poços (Puller, 1996).

Com esse resultado determinam-se o número de poços em cada direcção (largura e comprimento), utilizando-se as equações Equação 43 e Equação 44.

$$n_C = \frac{L}{C} \times \sqrt{n} \quad (43)$$

$$n_L = \frac{C}{L} \times \sqrt{n} \quad (44)$$

Note-se que n é obtido pela Equação 40 utilizando os valores finais dos caudais (do processo iterativo).

2.4. GRANDES ÁREAS EM PLANTA

Como já foi referido anteriormente, o método de rebaixamento do nível frático de grandes áreas em planta não foi implementado numericamente no programa de cálculo elaborado, contudo é também um método interessante que poderá mais tarde vir a ser implementado.

Tal como a sua designação indica, este método aplica-se a áreas de elevadas dimensões, em planta, cujo nível freático é demasiado elevado (Alonso, 2007).

Como nos métodos anteriores, também neste se inicia o cálculo pela obtenção de caudal a rebaixar (Alonso, 2007), usando a Equação 45.

$$Q = \frac{\pi \times K \times (H^2 - h_D^2)}{\ln\left(\frac{R_0}{r_p}\right)} \quad (m^3/s) \quad (45)$$

Nesta equação R_0 tem o valor obtido pela Equação 35 e r_p é dado pela Equação 46, em que A é a área em planta da escavação:

$$r_p = \sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad (m) \quad (46)$$

Para obter o caudal bombado de cada poço recorre-se à Equação 47, em que x é a distância medida entre o centro dos poços.

$$Q_i = \frac{Q}{2 \times (L + C)} \times x \quad (m^3/s) \quad (47)$$

Para obter a quantidade total de poços aplica-se a Equação 40.

Outro elemento que pode ser calculado é o assentamento que a extracção de água pode provocar (Alonso, 2007). Este cálculo é executado com a Equação 48.

$$\Delta h_{D_2} = \sqrt[3]{\frac{R_1^2}{345600 \times K}} \quad (48)$$

A Equação 49 permite definir o valor de R_1

$$R_1 = \frac{\text{minimo}(C, L)}{2} + \Delta h_{D_1} \quad (m) \quad (49)$$

2.5. ASSENTAMENTOS

Alonso (2007), refere várias expressões para o cálculo dos assentamentos associados ao rebaixamento do nível freático.

Para aquíferos gravitacionais, tem-se a Equação 50

$$\Delta h_D = \sqrt{\frac{Q_w}{K \times \pi} \ln\left(\frac{x}{2 \times \pi \times r_w}\right)} \quad (m) \quad (50)$$

Para aquíferos artesianos tem-se a Equação 51 e Equação 52.

A Equação 51 é referente a assentamento da superfície piezométrica em poços de espaçamento entre si igual a x . Já a Equação 52, refere-se a assentamento da superfície piezométrica ($H - h$) a uma distância y , medida do lado oposto à escavação, a partir da saída da água.

$$\Delta h_D = \frac{Q_w}{K \times \pi \times 2 \times D} \ln \left(\frac{x}{2 \times \pi \times r_w} \right) \quad (m) \quad (51)$$

$$H - h = \frac{Q_w}{K \times D \times x} (L - y) = \frac{R_0 - y}{R_0} (H - h_D) \quad (m) \quad (52)$$

Das e equações apresentadas, pode dizer-se que:

Q_w – caudal de vazão (m^3/s)

D – espessura da camada permeável (m)

r_w – raio do poço (m)

x – espaçamento entre poços (m)

Finalmente, e tal como já apresentado, quando se trata de rebaixamento de grandes áreas em planta, segundo Alonso (2007), recorre-se à Equação 48.

2.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram descritos três métodos de dimensionamento de sistemas de rebaixamento do nível freático recorrendo a bombagem. Como já foi referido atrás, o terceiro método (para escavações de grande área em planta) não foi implementado no programa de cálculo desenvolvido. No capítulo seguinte é feita a descrição do programa de cálculo desenvolvido.

3. CAPÍTULO 3 - PROGRAMA DE CÁLCULO DESENVOLVIDO

3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Esta secção é inteiramente dedicada a descrever o programa elaborado. Este foi executado numa base de Excel, com auxílio de macros e linguagem VBA. Existem algumas folhas de cálculo que foram ocultadas por serem simplesmente auxiliares de cálculo. Cada capítulo do programa é descrito individualmente e no final são apresentados os fluxogramas que ilustram a execução do programa e que podem auxiliar a aplicação do mesmo.

3.2. MENU

Para facilitar a interacção com o utilizador, no início do programa é visualizada uma janela com alguns botões (Figura 25). Cada um desses botões direcciona o utilizador para a folha de cálculo correspondente. Esses botões são:

- 1 Questionário de entrada;
- 2 Permabilidade;
- 3 Valores de entrada;
- 4 Método de Cálculo I;
- 5 Método de Cálculo II;
- 6 Retronálise;
- 7 Resultado final.

Existe ainda o botão “*sair*” que permite terminar a utilização do programa e guardar o trabalho já feito.

Esta janela de “*Menu*” é meramente indicativa, isto porque é possível saltar de folhas de cálculo sem utilizar o “*Menu*”. Contudo este elemento tem um seguimento de cálculo intrínseco à colocação dos botões. Assim para seguir o sistema de cálculo sugerido deve seleccionar-se o botão “*Questionário de Entrada*”

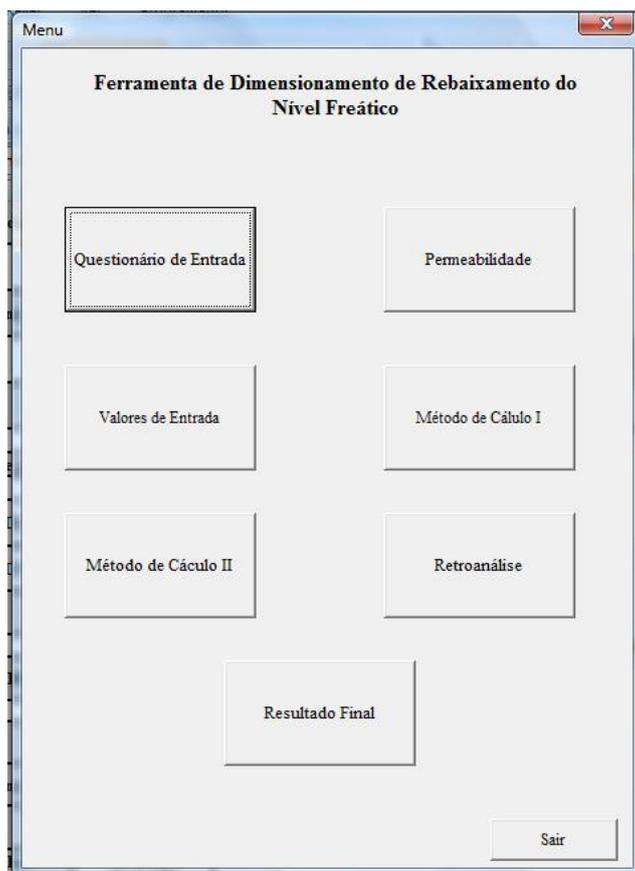


Figura 25 - Menu inicial

3.3. QUESTIONÁRIO DE ENTRADA

O objectivo do questionário de entrada é recolher e armazenar informações gerais sobre o caso em estudo e que são incluídas no relatório de apresentação do resultado final. Assim, quando se acede ao botão questionário de entrada tem-se acesso a uma folha com algumas questões. A intenção é guardar o trabalho com a identificação correcta da obra. Porém, antes de se iniciar uma nova rotina de cálculo, é importante que as folhas sejam todas limpas. Este procedimento visa eliminar valores de cálculos anteriores que possam adulterar os resultados da análise de um novo problema. Assim, antes de se dar resposta às questões, deve carregar-se no botão “*Limpar*”. Após esta acção pode iniciar-se as respostas às questões colocadas.

Na Figura 26 ilustra-se o questionário de entrada.

Ferramenta de Dimensionamento de Rebaixamento do Nível Freático	
Versão 1.0	
Data de Utilização	27-06-2010
Nome da Empresa	
Morada da Empresa	
Nome da Obra	
Morada da Obra	
Símbolo da Empresa	

Logótipo da Empresa

[Manual de utilizador.pdf](#)

Programa elaborado por: Maria Angélica Rocha, com Auxílio da Dr. Margarida Lopes e do Dr. Agostinho Mendonça	
Versão 1.0	

Figura 26 - Ambiente do questionário de entrada

No ponto “*Data de Utilização*” deve ter em conta que a data que aparece é a data de utilização da folha de cálculo (este valor é automaticamente actualizado).

Foi ainda criado um campo para introdução do logótipo da empresa. Pressionando a imagem o programa acede aos ficheiros do computador, permitindo ao utilizador seleccionar o logótipo da empresa, ou um qualquer outro símbolo que se pretenda. Esta imagem aparecerá na primeira folha do relatório final.

Em todas as folhas de cálculo existe um botão de ligação ao menu inicial, designado por “*Menu*”. Além deste e do botão de “*Limpar*”, já referido, existe uma ligação ao “*Manual de Utilizador*”, que facilita a utilização do programa e a compreensão de todos os passos de cálculo.

Após o preenchimento do “*Questionário de Entrada*”, pode prosseguir-se para o “*Menu*” e, de seguida, para a folha de cálculo “*Permeabilidade*”.

3.4. PERMEABILIDADE

Esta folha de cálculo serve para o cálculo da permeabilidade equivalente do solo de várias maneiras distintas. A todas elas é comum a introdução de informação sobre o perfil geológico-geotécnico em análise.

Foi necessário introduzir algumas restrições como o número máximo de camadas do perfil geológico-geotécnico de 15 camadas diferentes, com espessura definida.

A utilização deste módulo inicia-se pela definição do número de camadas de solo no perfil em causa. Para cada camada é necessário atribuir uma altura e identificar o tipo de solo que a constitui (de uma lista existente). Caso a informação introduzida não seja compatível o programa fornece indicação de que existe um erro. A descrição dos vários tipos de erros é apresentada na secção Erros e avisos.

Seguidamente fez-se uma rotina de cálculo, numerada por passos, cuja descrição se inclui nesta secção. Na Figura 27 apresenta-se o perfil esquemático e a indicação das gradezas a introduzir, incluídas nesta folha de cálculo.

Camada	Tipo de solo	h_i (m)	K_{ih} (m/s)	K_{iv} (m/s)	D_{10} (mm)
1	ESCOLHER				
2	ESCOLHER				
3	ESCOLHER				
4	ESCOLHER				
5	ESCOLHER				
6	ESCOLHER				
7	ESCOLHER				
8	ESCOLHER				
9	ESCOLHER				
10	ESCOLHER				
11	ESCOLHER				
12	ESCOLHER				
13	ESCOLHER				
14	ESCOLHER				
15	ESCOLHER				
			$K_{equivalente}$ (m/s)	#DIV/0!	#DIV/0!

Figura 27 - Ambiente da folha Permeabilidade

Note-se que, mais uma vez, é necessário fazer recurso ao botão “Limpar” antes de se iniciar o cálculo.

Na Figura 28 e Figura 29 apresenta-se a tabela em que é feita a introdução e o cálculo da permeabilidade dos vários solos que constituem o perfil em análise.

Deve notar-se a importância do passo número 1, isto porque caso este não seja respeitado encontrar-se-ão imensos “Erros” ao longo de todo o processo de cálculo.

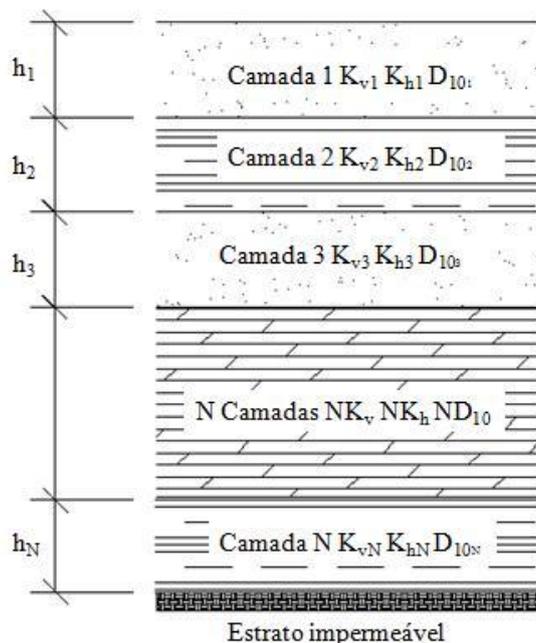


Figura 30 - Figura de referência no cálculo da permeabilidade

Mem Limpar

[Manual de utilizador.pdf](#)

A figura apresentada representa todas as diferentes camadas de um solo. Pretende-se com a visualização desta minorar a dificuldade de compreensão dos valores abaixo pedidos. Tenha em atenção a quantidade de camadas que pretende estudar. A figura apresentada representa todas as diferentes camadas de um solo. Pretende-se com a visualização desta minorar a dificuldade de compreensão dos valores abaixo pedidos. Tenha em atenção a quantidade de camadas que pretende estudar.

Número de Camadas	
-------------------	--

ERRO3

Figura 31 - Ambiente da folha Permeabilidade - Introdução de camadas

Passo 2:

Na tabela de cálculo, na coluna intitulada de “*Tipo de solo*”, faz-se a escolha dos vários tipos de solo em causa. Ressalva-se que deve escolher-se a quantidade igual ao “*número de camadas*” que foi seleccionado no passo 1. Para facilitar todo o processo de cálculo deve deixar-se com o título “ESCOLHER” todas as outras camadas que não são precisas.

Nota: Caso se pretenda saber qual a gama de valores típicos de permeabilidade atribuídos ao tipo de solo seleccionado deve analisar-se a coluna intitulada de “*Valores tabelados (Matos Fernandes, 2006)*”.

Passo 3:

Na coluna “*Altura de camada*” deve-se ir digitando a altura de cada camada de solo, h (Figura 27). Note-se mais uma vez que apenas deve ser introduzida a altura para um número de camadas igual ao definido no passo 1.

Passo 4:

Caso exista informação sobre a permeabilidade das diferentes camadas, esta deve também ser incluída. Este procedimento aumenta a quantidade de soluções finais disponíveis para a permeabilidade equivalente do solo. Assim, nas colunas “ k_{ih} ” e “ k_{iv} ” escreve-se, respectivamente, a permeabilidade horizontal e a permeabilidade vertical, de cada camada de solo.

Note-se que a permeabilidade equivalente calculada a partir destas grandezas apenas tem sentido no caso de se dispor de valores para todas as camadas em análise.

Passo 5:

Para fazer o cálculo da permeabilidade pela conhecida equação de Hazen, é necessário introduzir o valor de D_{10} , a dimensão de partículas do solo correspondente a 10% de passados. Este valor deve ser introduzido em milímetros. É importante que se respeite todas as unidades, caso contrários os valores obtidos não têm significado.

Existe uma coluna que verifica se o valor que se atribuiu ao D_{10} é ou não aceitável. De facto, caso o valor de D_{10} seleccionado seja maior do que a dimensão das partículas do tipo de solo definido, é mostrada uma mensagem de erro. Para tal, o botão

“*Granulometria*” remete para um gráfico onde são designados os limites de cada camada e o respectivo valor atribuído. Assim é possível perceber se o valor que foi colocado é ou não o mais correcto.

Como se referiu na secção 1.4.5, a fórmula de Hazen inclui uma constante, C. Existe na bibliografia várias propostas, a que estão associados valores de permeabilidade distintos. Assim, neste passo e após a introdução do valor de D10 são determinados valores para a permeabilidade de solos granulares pela fórmula de Hazen, usando 6 valores distintos para a constante aí incluída.

Passo 6:

Com base em todos os métodos de cálculo de permeabilidade para as várias camadas de solo, o programa faz uma avaliação do melhor valor (“*Comparação*”). Assim, reduz-se de 6 valores inicialmente, soluções segundo Hazen (1930) e Lambe & Whitman (1979), para 3 valores, sugestões propostas. Estes são comparados com os valores tabelados, coluna “*Valores tabelados (Matos Fernandes, 2006)*”. Caso as diferentes soluções obtidas em “*Sugestão*” não estejam incluídas na gama de valores tabelados, o programa atribui uma nova permeabilidade, dentro daquela gama de valores. Por outro lado, se os valores de sugestão estiverem incluídos na gama de valores tabelados, o programa escolhe o valor da permeabilidade mais conservativo, ou seja, o mais baixo.

É importante ressaltar que a fórmula de Hazen apenas deve ser aplicada a solos granulares. Para argilas saturadas, foi introduzida outra equação (secção 1.4.5).

Passo 7:

Quando se escolhe argilas saturadas na lista de solos, o método de cálculo que é assumido é o método de Nishida e Nagakwa (1969), este método de cálculo já foi descrito na secção da permeabilidade 1.4.5. Os autores calculam a permeabilidade com base no índice de vazios e no índice de plasticidade do solo. Em suma, neste passo, e se foram seleccionadas argilas saturadas, deve atribuir-se os respectivos índices de vazios e plasticidade para as camadas em questão.

Note-se que, uma vez mais, o valor obtido para argila saturada é comparado com um valor tabelado. Caso o valor não se encontre dentro dos valores tabelados, o programa

assume o valor tabelado, caso contrário, assume o calculado (“*Comparação para Argilas saturadas*”).

Passo 8:

A coluna “*K_{resultante}*”, assimila os variados valores que foram sendo calculados. Os valores que entram nesta coluna são os que resultam da coluna “*Comparação*” e “*Comparação para Argilas saturadas*”.

Passo 9:

Em “*Escolha os K's que achar mais convenientes*” pode fazer-se uma escolha variada entre os diferentes valores de K calculados, os que inicialmente foram atribuídos a cada camada, ou um outro qualquer valor de permeabilidade que se pretenda testar. A finalidade desta coluna é aumentar a gama de opções para a determinação da permeabilidade equivalente, deixando ao utilizador a liberdade de definir os valores a utilizar para cada camada.

Passo 10:

O botão “*Gráficos (Camada1- Camada15)*” serve para se visualizar o resultado de todos os K's. O intuito é perceber se os resultados obtidos se encontram todos dentro da mesma gama de valores. Este botão pode ser utilizado em qualquer altura. O seu recurso é meramente indicativo, permite contudo perceber se os resultados são ou não coerentes.

A janela que aparece quando se recorre a este botão permite voltar ao “*Menu*”, à folha onde estão a decorrer os cálculos “*Permeabilidade*” e ainda ver todas as camadas de solo recorrendo-se aos botões “*Seguinte*” e “*Anterior*”.

Passo 11:

Todos os valores de K equivalente determinados são listados, porém é preciso respeitar sempre a quantidade de camadas de solo que inicialmente decidiu estudar, caso contrário aparece uma mensagem de erro.

Assim, na Figura 32 encontra-se representado o quadro de apresentação dos valores finais desta folha de cálculo.

K _{equivalente} (valores fornecidos)	6,67E-06	(m/s)
K _{equivalente} (cálculo)	6,67E-06	
K _{equivalente} (valores escolhidos)	9,60E-05	

Por sugestão optou-se pelo seguinte valor de permeabilidade	6,67E-06	(m/s)
---	----------	-------

Pretende manter o valor sugerido?	Sim
-----------------------------------	-----

Se não qual o valor que pretende?		(m/s)
-----------------------------------	--	-------

Permeabilidade a usar	6,67E-06	(m/s)
-----------------------	----------	-------

Figura 32 - Exemplo de quadro resumo dos resultados obtidos na folha de cálculo “permeabilidade”

Passo 12:

Tal como apresentado na Figura 32, o programa faz uma sugestão do valor que estima como sendo o mais adequado ao cálculo. Contudo, se o utilizador não o aceitar pode demonstrá-lo respondendo à questão “*Pretende manter o valor sugerido?*”. Caso não queira aceitar, em frente a “*Se não qual o valor que pretende?*” digite a permeabilidade que pretende ver adoptada. O valor final (equivalente) da permeabilidade será incluído em “*Permeabilidade a usar*”.

Para continuar a execução do programa deve carregar no botão “OK”, que o remete para o “Menu”, aqui deve seleccionar o botão “Valores de Entrada”.

3.5. VALORES DE ENTRADA

Na folha de cálculo designada por “*Valores de Entrada*” pretende-se que sejam introduzidos todos os valores que caracterizam o local da obra para que se possa continuar para o dimensionamento do sistema de rebaixamento do nível freático. Esta folha de cálculo está representada na Figura 33. Ainda nesta folha de cálculo são apresentadas as Figuras 20 e Figura 34, em que se representam várias grandezas relevantes.

Novamente existe um botão para limpar, que deve ser primido antes de se iniciar o processo de cálculo, e um outro para aceder ao menu, e ainda uma hiperligação para o manual de utilizador.

Resposta às seguintes questões:		
Conhece h_D e quer saber h_0 ?	Escolher	
Distancia entre poços (m)	1	
Altura de água no poço, até ao estrato impermeável (m)	erro no cálculo de h_0	#DIV/0!
	h_{0calc}	
Diâmetro dos poços (m)	b	
Altura do nível freático (m)	H	
Altura máxima de água admitida após o rebaixamento, obtida a partir do estrato impermeavel (m)	erro no cálculo de h_D	#DIV/0!
	h_{Dcalc}	
Permeabilidade do solo (m/s)	K	
Altura de água no poço (m)	hw	
Comprimento da escavação (m)	C	
Largura da escavação (m)	L	

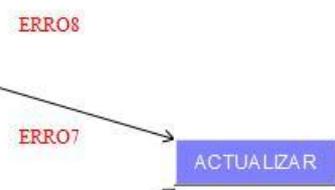


Figura 33 - Ambiente da folha Valores de Entrada

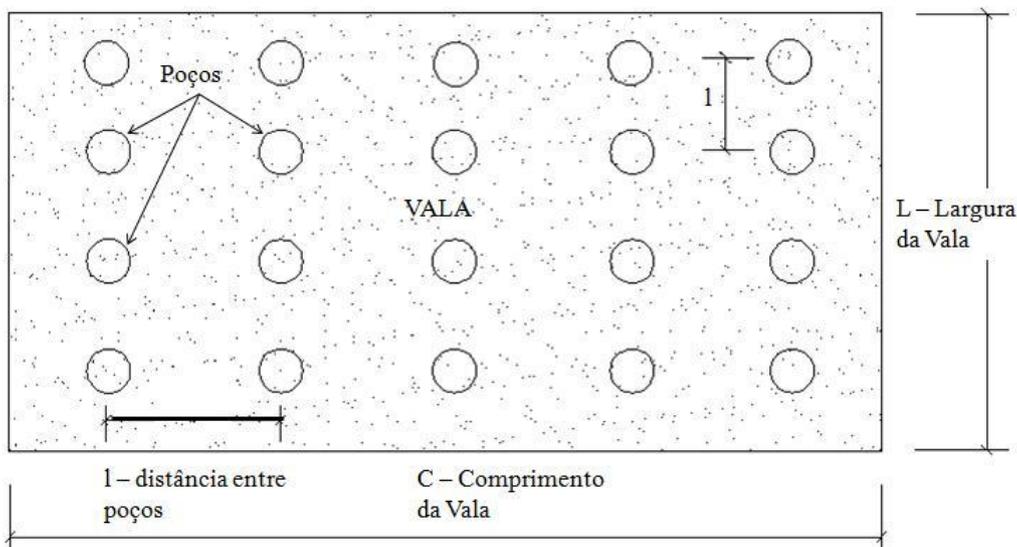


Figura 34 - Representação de uma possível distribuição de poços

Passo 1:

De acordo com o que foi referido na secção 2.2, é necessário identificar qual a grandeza conhecida: h_D ou h_0 . Para tal, é necessário responder à questão “Conhece h_D e quer obter h_0 ?”. Se a resposta for positiva, deve atribuir-se um valor a h_D e escrever um qualquer valor positivo e diferente de zero em h_0 , caso contrário ocorre um problema de

programação. De seguida faz-se recurso ao botão “*Actualizar*”. Se a resposta for negativa o processo é o mesmo contudo o valor a digitar é h_0 .

Passo 2:

Após a colocação de todos os valores necessários deve carregar-se no botão “*Menu*” e depois no botão “*Método de Cálculo I*”.

3.6. MÉTODO DE CALCULO I

Este método de cálculo foi descrito na secção 2.2. A folha de cálculo está ilustrada na Figura 35. Também se encontra representada na folha de cálculo a Figura 21.

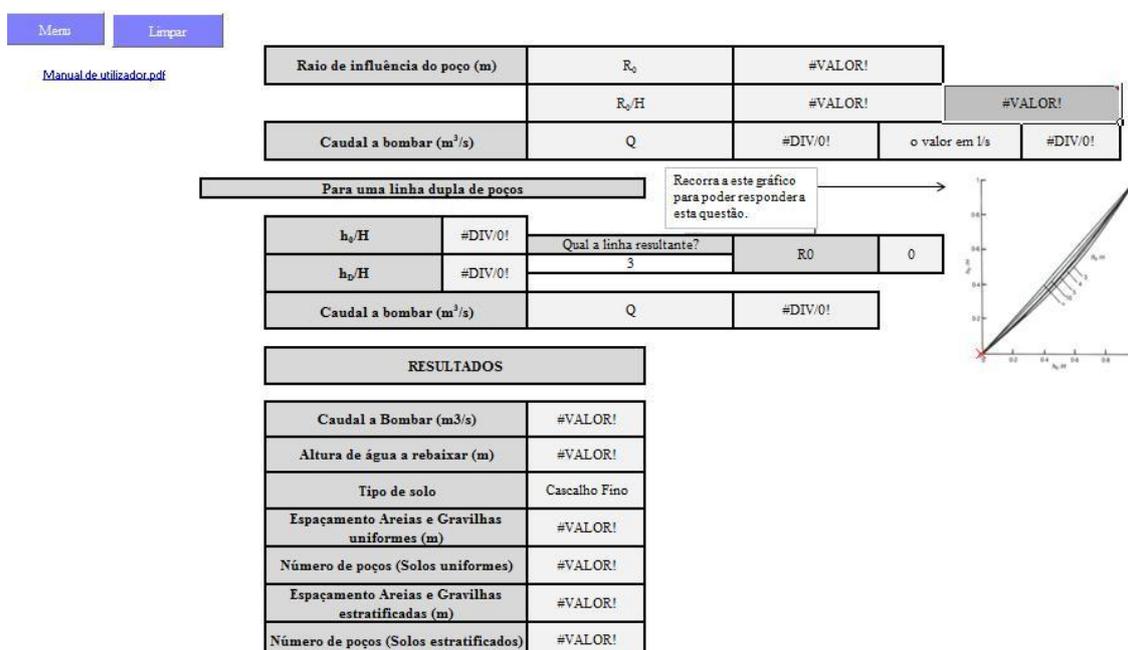


Figura 35 - Ambiente folha Método de Cálculo I

Mais uma vez é visível nesta folha de cálculo a existência de um botão “*Limpar*”, este deve ser primido antes do acompanhamento do cálculo.

Com base no raio de influência do poço calculado e da altura a que se encontra o nível freático o programa conclui se, para o caso em apreço, é necessário recorrer a uma ou a duas filas de poços. O caudal total a bombear é apresentado.

Quando existe a necessidade de uma linha dupla de poços o programa apresenta a linha de cálculo necessária para a obtenção do novo R_0 . Porém, a visualização gráfica da linha

correspondente (ilustrada na Figura 23) tem de ser digitada, por isso é necessário responder à questão “Qual a linha resultante?”. Deve ainda atender-se ao facto de ao seleccionar infinito o programa recorrer à linha 10.

Para evitar dificuldades em discernir qual a linha mais correcta pode-se sempre recorrer à funcionalidade *Zoom* e aumentar a imagem. Com essa informação o caudal total a bombar correspondente é apresentado.

Para obter a altura de água a bombar, o espaçamento entre poços e ainda a quantidade de poços necessária no programa o ábaco da Figura 24e a interpolação de resultados foi implementado numericamente. Assim, os valores a utilizar devem ser seleccionados com base no tipo de solo do perfil em estudo, ou seja se o solo é ou não estratificado.

Deve levar-se em consideração o facto de na Figura 24 haver um limite máximo da altura de água a rebaixar: 15m, para um solo não estratificado; e 17,5m solo estratificado. A partir desse limite, a solução apresentada no programa não sofre alterações e corresponde a esses máximos.

Na Figura 36 encontra-se representada a tabela final de cálculo, ou seja, os resultados do dimensionamento do sistema de rebaixamento do nível freático recorrendo a uma linha simples ou dupla de poços.

RESULTADOS	
Caudal a Bombar (m ³ /s)	0,365136525
Altura de água a rebaixar (m)	2,981
Tipo de solo	Areia Média
Espaçamento Areias e Gravilhas uniformes (m)	2
Número de poços (Solos uniformes)	10
Espaçamento Areias e Gravilhas estratificadas (m)	0,53
Número de poços (Solos estratificados)	38

Figura 36 – Exemplo de quadro resumo dos resultados obtidos na folha de cálculo “Método de cálculo I”

Após a conclusão da aplicação deste método, pode prosseguir-se com a utilização do programa através dos botões “Menu” e “Método de Cálculo II”.

3.7. MÉTODO DE CÁLCULO II

Este método só é aplicável a escavações rectangulares ou quadrangulares profundas, como já foi explicado na secção 2.3.

Chama-se novamente à atenção da necessidade de se fazer uso do botão “Limpar” já que, caso este botão não seja utilizado e os valores já existentes de outros cálculos se mantiverem, existir a possibilidade de ocorrerem erros de cálculo.

Todas as grandezas necessárias para a aplicação deste método foram já introduzidas. Assim, apenas é necessário fazer com que o processo iterativo seja implementado (ver Figura 37).

Processo iterativo		
Altura de água no poço até ao estrato impermeável (valor melhorado) (m)	h_0	14,2765
Raio de influência do poço (valor melhorado) (m)	R_0	1931,986652
Caudal total a bombar (valor melhorado) (m^3/s)	Q	8,4843
Erro no cálculo de h_0		0,0000
Caudal total final a bombar (m^3/s)	Q_t	0,4222
Confirmação do valor de h_0 para o caudal (m)		14,2765
Número de poços (valor final)	n	11
Número de poços ao longo do comprimento	n_c	4
Número de poços ao longo da largura	n_l	4

Figura 37 - Exemplo de quadro resumo dos resultados obtidos na folha de cálculo “Método de cálculo II”

Antes de iniciar o processo iterativo é necessário atribuir um valor positivo e diferente de zero a “Caudal total final a bombar (m^3/s)” e seguidamente primir o botão “Calcular”, desta forma serão determinados os valores de caudal total a bombar, número total de poços e a quantidade de poços em cada direcção.

Depois de determinar todos os valores acima descritos pode continuar-se com a utilização do programa através dos botões “Menu” e “Retroanálise”.

3.8. RETROANÁLISE

Neste tipo de obras (rebaixamento temporário do nível freático) é usual ter que ajustar a solução dimensionada. De facto, é comum que o caudal bombado seja diferente do calculado em dimensionamento. Assim, julgou-se essencial criar um módulo no programa que permita ajustar os resultados em função dos valores da obra. Então, caso em obra o caudal seja diferente do previamente calculado, é possível utilizar o programa para obter a permeabilidade real, partindo do caudal medido em obra e das características da solução de bombagem utilizada. Com a nova informação é possível refazer todos os cálculos chegando a uma renovada solução (número de poços e espaçamentos).

Antes da introdução do caudal e até mesmo da permeabilidade, é necessário primir o botão “*Limpar*” (ver Figura 38).

Onde aparece “*caudal medido em obra*” deve incluir-se o valor do caudal real obtido.

Este tipo de cálculo é feito através de um processo iterativo, assim, é necessário fazer recurso ao botão “*Calcular*”. Nesta folha é ainda necessário introduzir um valor inicial (positivo e diferente de zero) onde diz para “ K_{real} ”, permeabilidade real a calcular. Note-se que este valor deve ter ordem de grandeza adequada para uma permeabilidade (ver Tabela 4 de Matos Fernandes, 2006). Ou seja, o valor inicial mais indicado para esta grandeza será, provavelmente, 0,01 ou mesmo menor. Na Figura 38 está ilustrada a tabela de dados e resultados desta folha de cálculo.

Caudal medido em obra	(m ³ /s)	0,10	
Caudal calculado	(m ³ /s)	0,15	
K_{cal}	(m/s)	2,32E-03	
Caudal	(m ³ /s)	0,07	
		0,00	
K_{real}	(m/s)	3,40E-03	

Figura 38 - Resultado para a retroanálise, resultados meramente indicativos

Com o valor do caudal real e a permeabilidade correspondente determinada nesta folha de cálculo é então possível repetir os cálculos para o dimensionamento do sistema de rebaixamento.

Nesta fase é possível aceder ao relatório final através dos botões: “Menu” e “Resultado final”.

3.9. RESULTADO FINAL

Nesta folha de cálculo obtém-se um relatório que resume os resultados obtidos com o programa. A finalidade deste relatório é resumir todos os valores relevantes, de entrada no programa e de resultados.

Os valores descritos são os associados à geometria da obra, os valores de caudais a bombear e poços a construir (dimensões e espaçamentos) e toda a informação relativa à permeabilidade. Neste relatório é também incluída informação sobre a retroanálise.

Para imprimir o relatório deve fazer-se recurso ao botão “Imprimir”, aparece uma pré-visualização do relatório e recorre-se à ferramenta imprimir do Office (Figura 39).

Valores de Premeabilidade - Parte I											Manual de utilizador.pdf			
Número de Camadas		0									<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block; background-color: #4a7ebb; color: white;">Imprimir</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block; background-color: #4a7ebb; color: white;">Menu</div>			
Cálculo Executado para os Seguintes C's						Cálculo Executado para os Seguintes C's						Sugestão (Método: Média)	Sugestão (Método: Média excluindo mínimo e máximo)	Sugestão (Método: Média excluindo o máximo)
C _{Min}		C _{Med}		C _{Max}		C _{Min}		C _{Med}		C _{Max}				
0,01		0,01125		0,0125		1000		16000		42000				
K=CxD ₁₀ ²						K=CxD ₁₀ ²								
Hazen (1930)						Lambe & Whitman (1979)								
Tipo de solo	hi (m)	Kih(m/s)	Kimin (m/s)	Kimed (m/s)	Kimax (m/s)	Kimin (m/s)	Kimed (m/s)	Kimax(m/s)	Ki(m/s)	Ki(m/s)	Ki(m/s)			

Figura 39 - Ambiente da folha Resultado Final - Referência ao botão imprimir

3.10. ERROS E AVISOS

Sempre que relevante, a utilização do programa desenvolvido é acompanhada da informação da existência de erros na introdução de dados. Essa lista inclui:

Erro1: Deve preencher somente a quantidade de camadas que pré-definiu

Erro2: Número de camadas incoerente com valores fornecidos

Erro3: Deve limitar o número de camadas entre 1 e 15

Erro5: Tem de seleccionar o método que pretende ver aplicado na sugestão

Erro6: Granulometria adoptada não é conforme com a tabela de granulometrias. Faça uso do botão “Granulometria”;

Erro7: O seu h_0 é igual a H, modifique h_0 para um valor inferior a H

Erro8: Deve colocar um valor > 0

Erro9: h_D tem de ser sempre menor que H

Erro10: h_w tem de ser menor que h_0

Erro11: $R_0 >$ coeficiente a

Erro12: H tem de ser igual ao somatório dos h 's das camadas representadas na folha relativa à permeabilidade

Erro13: Caudal < 0

Erro14: Permeabilidade resultante > 0.1 (m/s)

Aviso1: Ainda que tenha seleccionado infinito, o programa assume o valor imediatamente anterior, ou seja, a linha identificada com 10

NA: Não aplicável

NT: Não tabelado

3.11. FLUXOGRAMAS

Nesta secção são descritos os passos acima explicados de forma esquemática, como fluxogramas (Figura 41, Figura 42, Figura 43, Figura 44 e Figura 45).

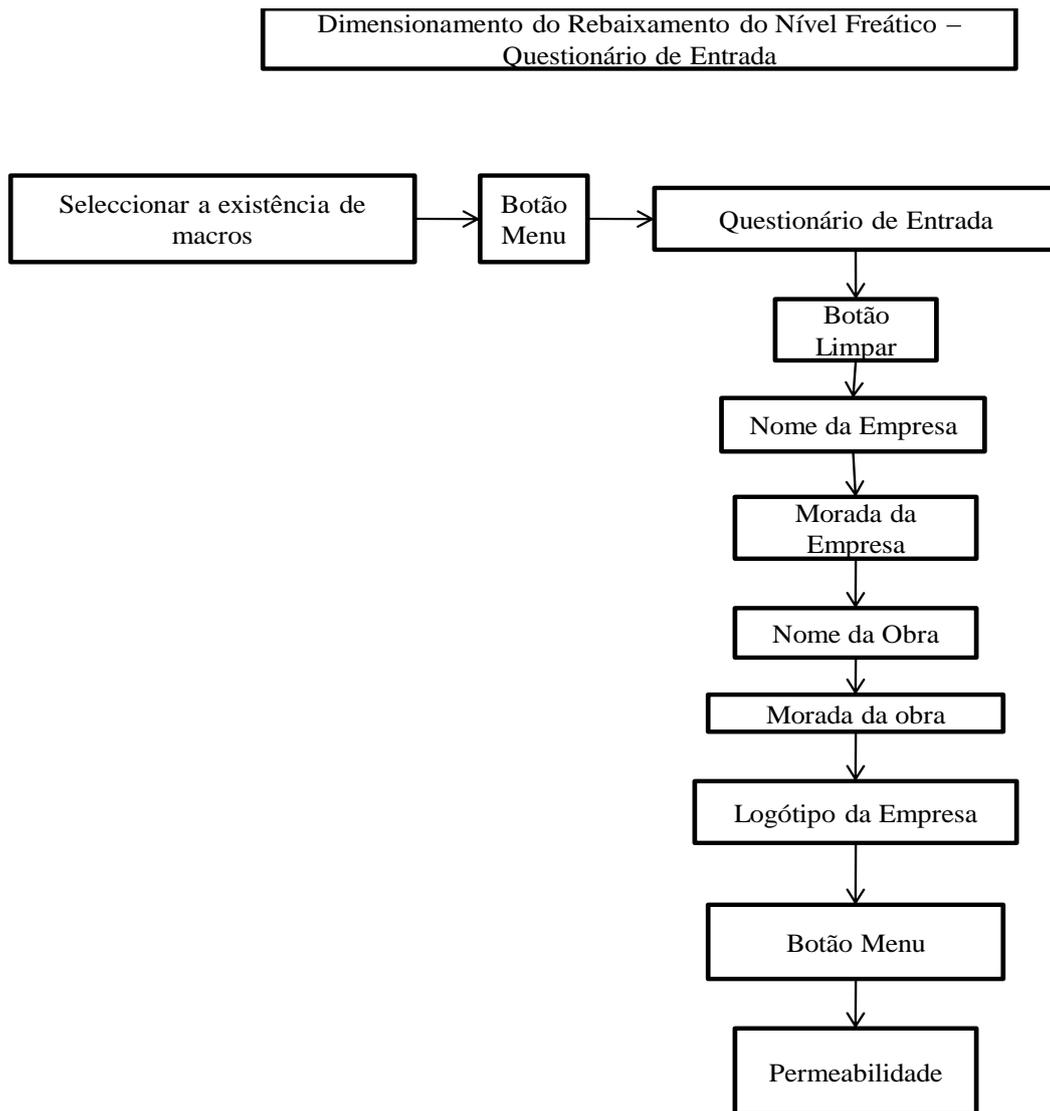


Figura 40 - Fluxograma relativo a Valores de Entrada

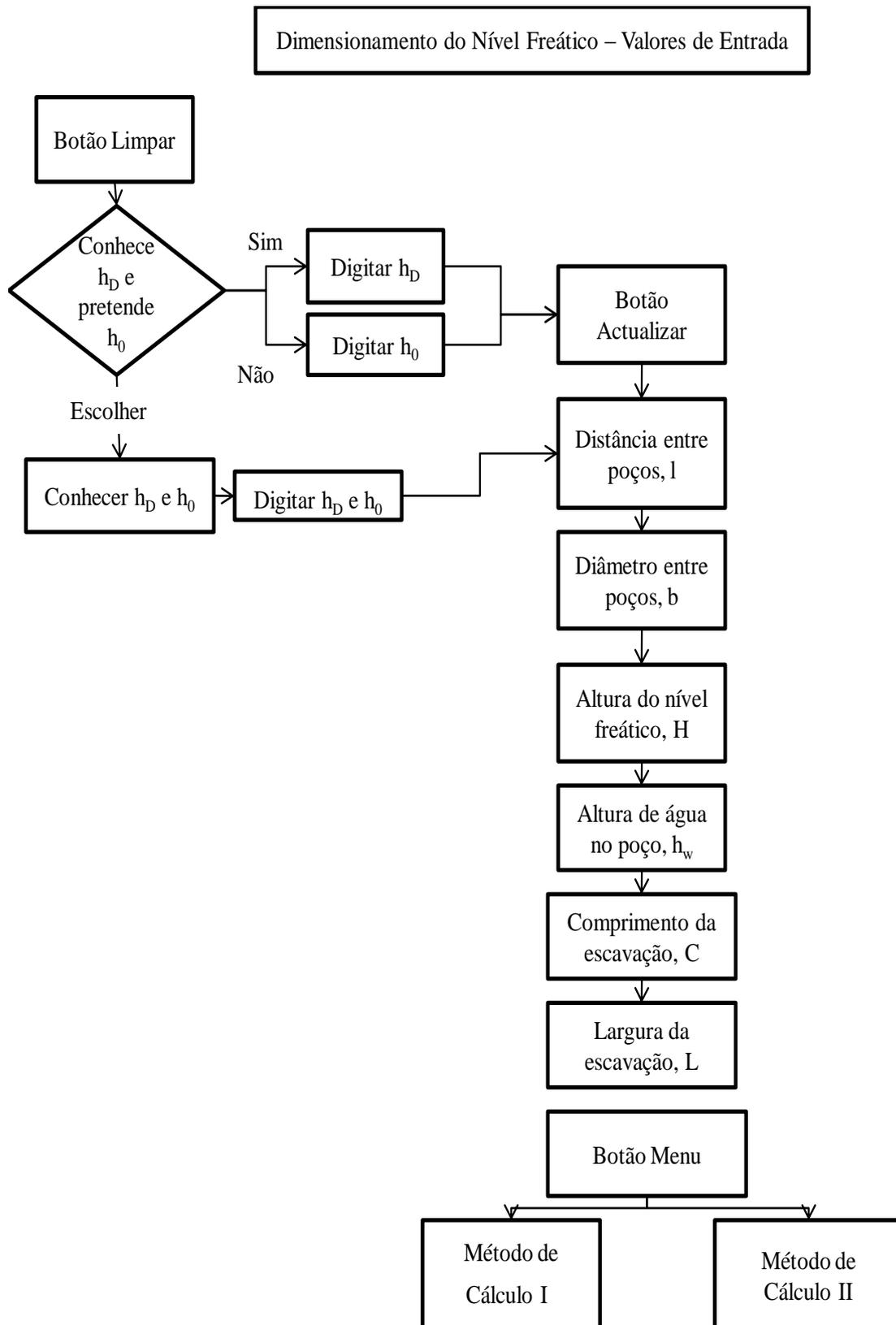


Figura 42 - Fluxograma de Valores de Entrada

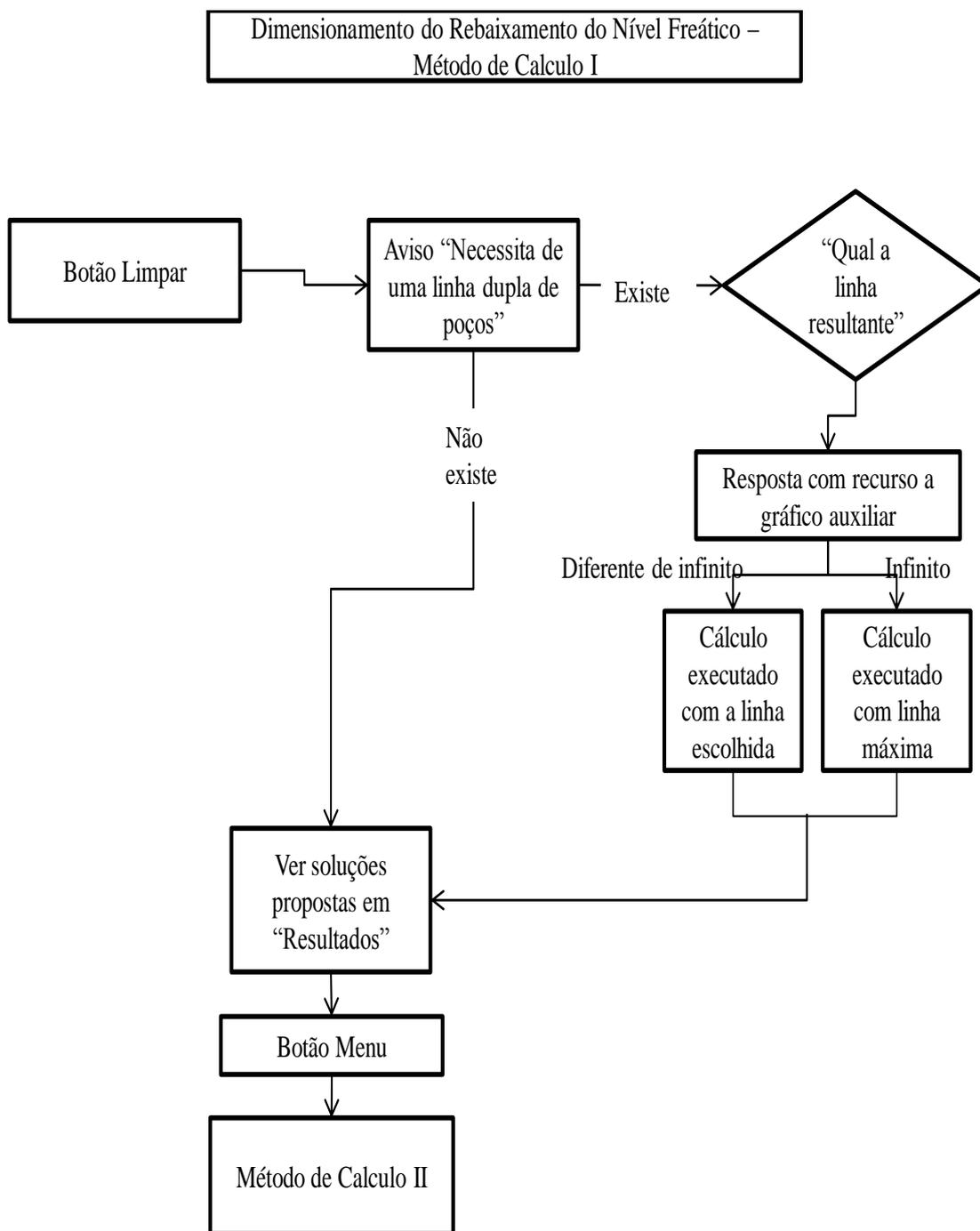


Figura 43 - Fluxograma Método de Calculo I

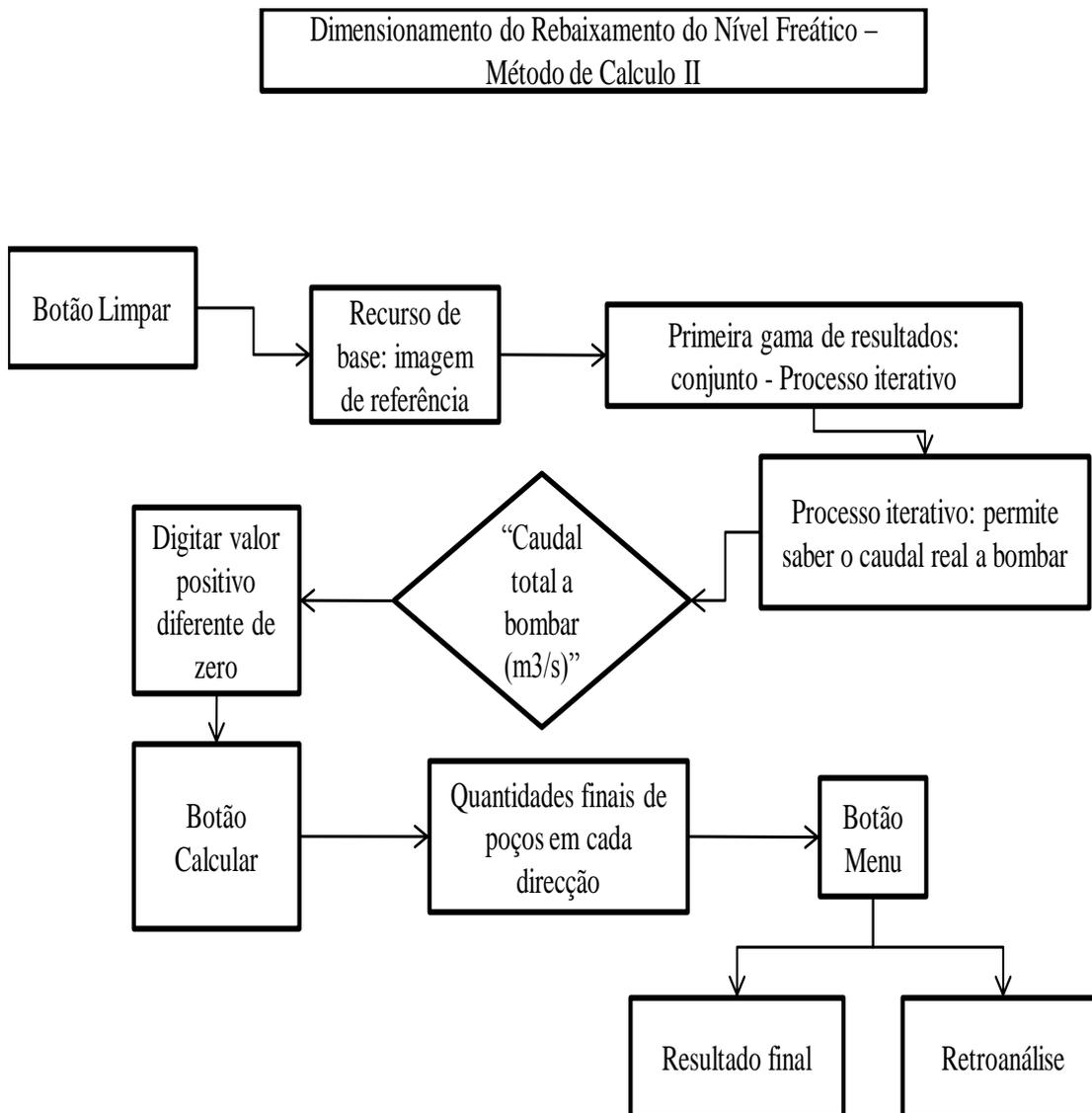


Figura 44 - Fluxograma de Método de Cálculo II

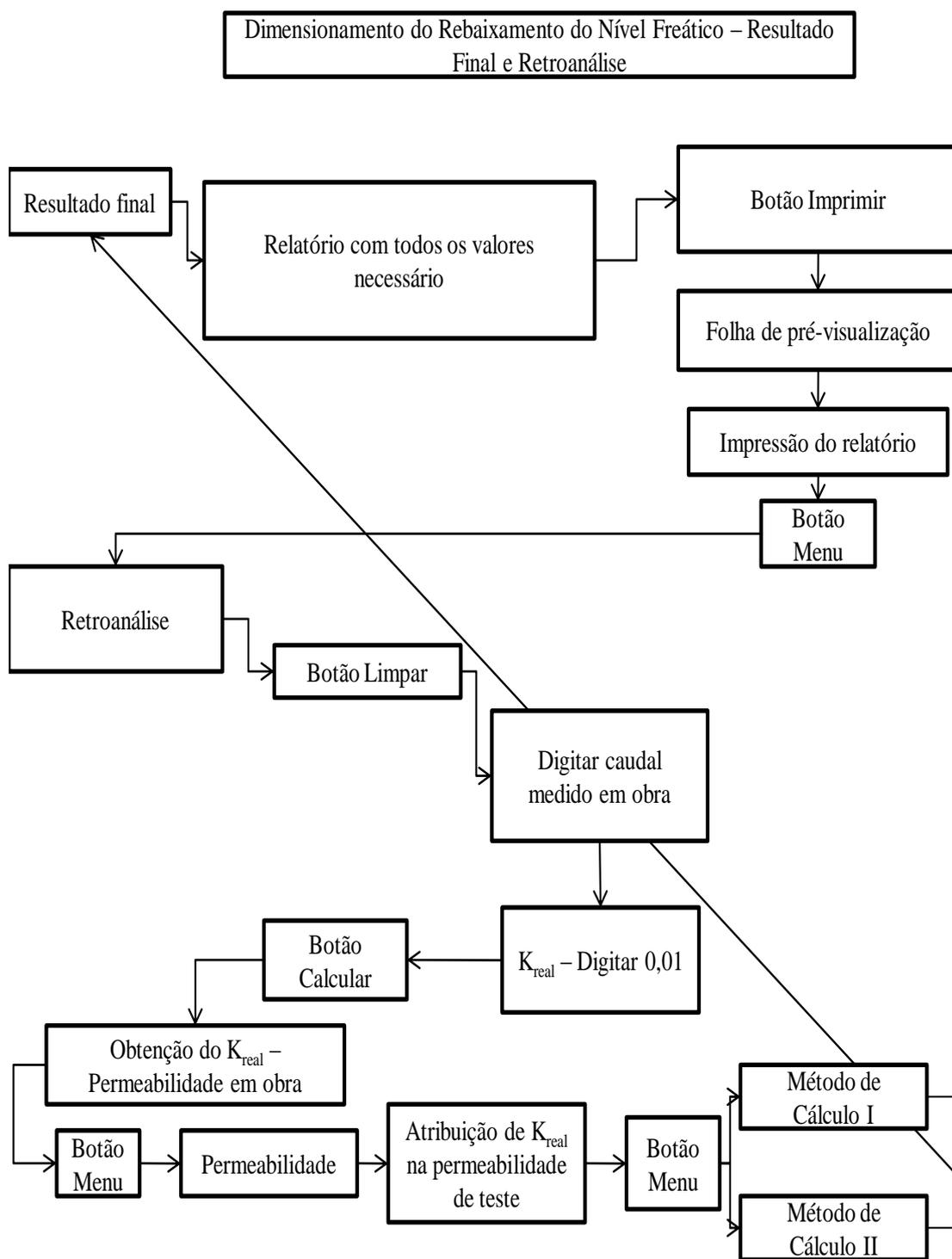


Figura 45 - Fluxograma relativo resultado final e retroanálise

4. CAPITULO 4 – APLICAÇÃO DO PROGRAMA A UM CASO DE ESTUDO - PROBLEMA REAL

4.1. CASO DE ESTUDO

A aplicação do programa executado foi feita a um caso real. Trata-se de uma obra executada pela empresa Soares da Costa, SGPS.: um edifício localizado no Largo do Ambiente em Luanda, Angola. O aspecto final da obra é o apresentado na Figura 46.



Figura 46 - Edifício executado pela Soares da Costa no Largo do Ambiente – Luanda (Mendonça, 2010)

Mendonça (2010) forneceu uma série de elementos sobre a obra, de forma a permitir a aplicação do programa desenvolvido a este caso.

A planta do edifício é dada pela Figura 47. Os perfis geológicos cedidos são os apresentados na Figura 48, na Figura 49 e na Figura 50. As sondagens localizavam-se distribuídas dentro da área onde decorreram os trabalhos.

FERRAMENTAS DE DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS DE REBAIXAMENTO DO NÍVEL FREÁTICO

Os elementos cedidos têm informação sobre a campanha de sondagens executada, o que permite desenhar o perfil do solo onde decorreram os trabalhos. Em suma, foram executadas 5 sondagens e a altura da água nos vários pontos encontrava-se ente 1.5 a 2m de profundidade.

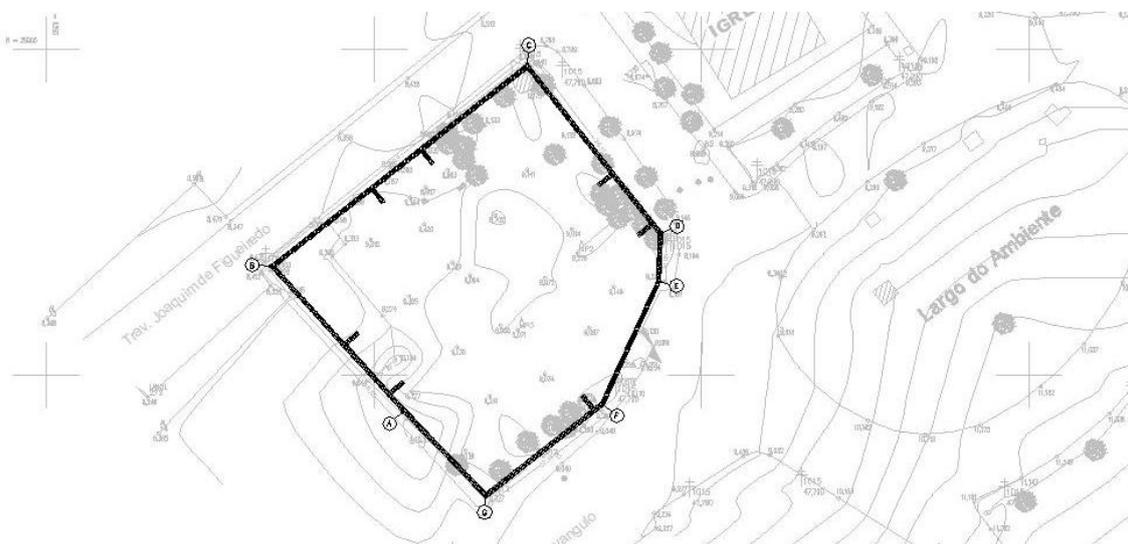


Figura 47 - Planta da obra

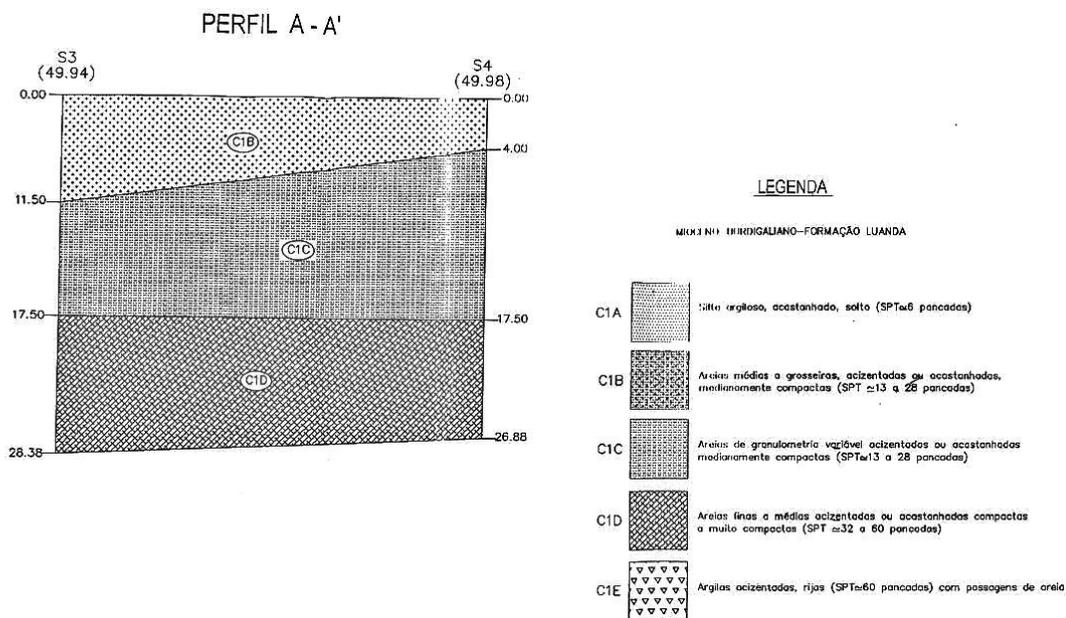


Figura 48 – Perfil geológico obtido a partir das sondagens 4 e 3

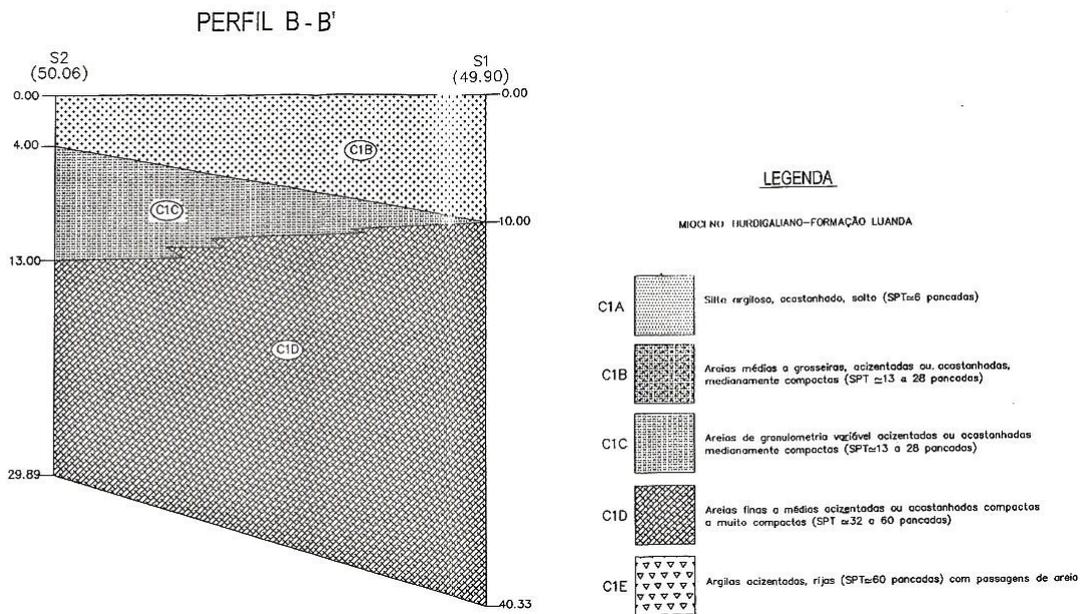


Figura 49 - Perfil geológico obtido a partir das sondagens 1 e 2

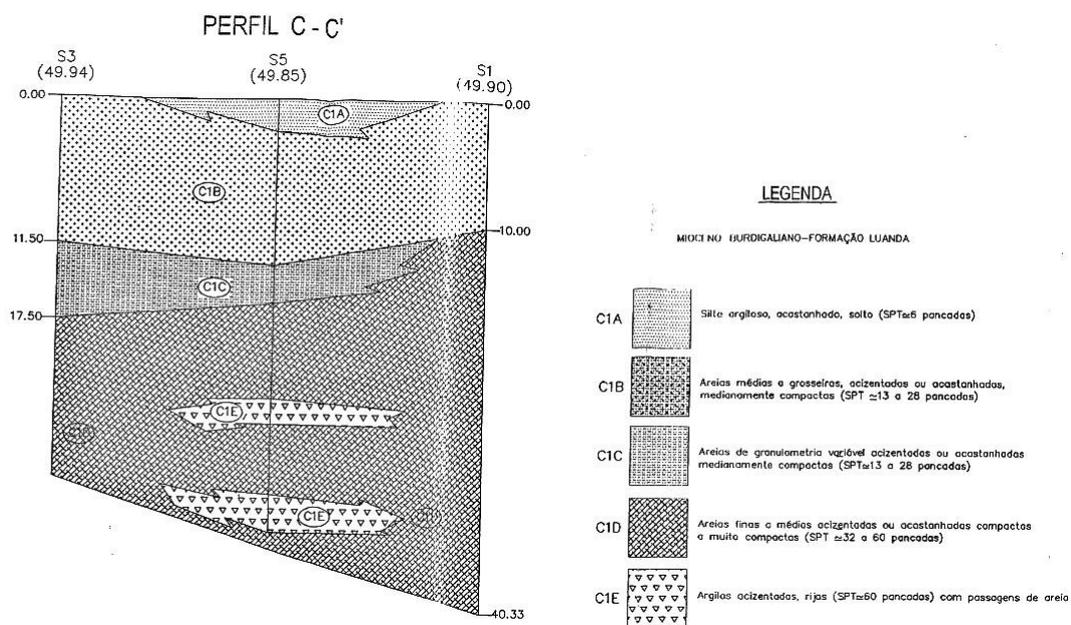


Figura 50 - Perfil geológico obtido a partir das sondagens 1,3 e 5

Pela Figura 47, é perceptível a presença de uma parede moldada. O efeito que esta surge é o rebaixamento do nível da água para um patamar inferior, contudo a altura de água que resta ainda é prejudicial ao trabalho, daí existir a necessidade da instalação de um sistema de bombas.

Em projecto, para além do estudo geológico, também foi possível obter valores extremamente relevantes relacionados com a permeabilidade. De facto, um dos elementos fornecidos por Mendonça (2010) era um relatório de avaliação da permeabilidade do solo na obra. Esse relatório incluía duas propostas para a permeabilidade equivalente: obtida de ensaios de bombagem e da aplicação da fórmula de Hazen.

Assim, dos ensaios de bombagem resultou um valor proposto em projecto para a permeabilidade equivalente do solo atravessado pela obra e relevante para o rebaixamento do nível freático. Esse valor foi de 6×10^{-3} m/s.

A aplicação da fórmula de Hazen deu origem a um valor permeabilidade média de 6.17×10^{-3} m/s. Em conclusão, pode dizer-se que a permeabilidade obtida pelos dois métodos encontra-se dentro da mesma gama de valores.

Note-se que não foi possível recriar o cálculo da permeabilidade equivalente desse relatório com o programa desenvolvido pois não foram fornecidos valores de D_{10} dos solos em causa.

No relatório referido incluía-se ainda uma proposta para o sistema de bombagem a usar em obra de forma a atingir o rebaixamento do nível freático pretendido. A solução utilizada inclui-a poços com diâmetro de 0,4m e espaçamento entre poços de com espaçamento entre poços de 7,5m e com diâmetro de 0,40m.

Com o programa desenvolvido neste trabalho procurou-se dimensionar uma solução de rebaixamento do nível freático para a obra em causa, tendo em conta as condicionantes fornecidas. Para tal, simplificou-se a configuração em planta da escavação para a apresentada na Figura 51. Assim, optou-se por recorrer a uma escavação quadrangular com 50m de lado.

Foi ainda necessário definir um perfil de base a usar no cálculo (Figura 52).

Com todos estes elementos iniciou-se o processo de cálculo.

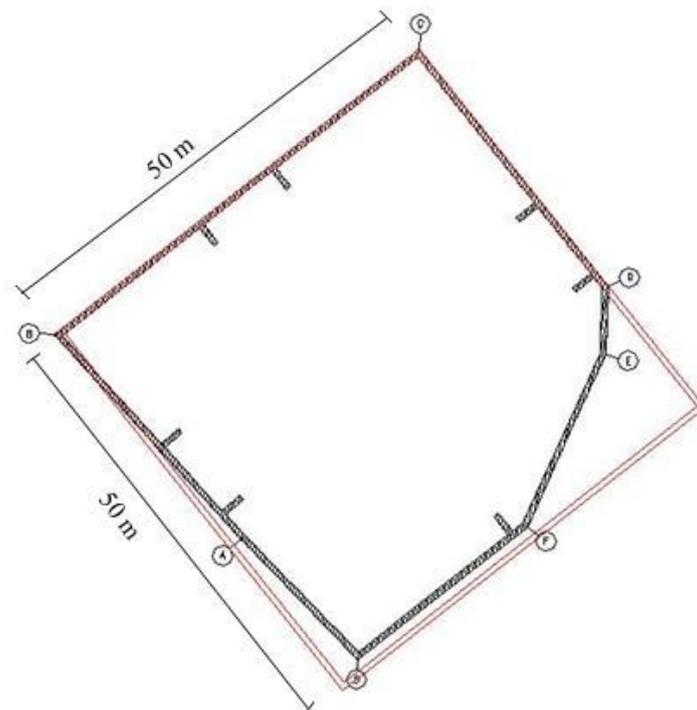


Figura 51 - Planta adoptada para a aplicação prática

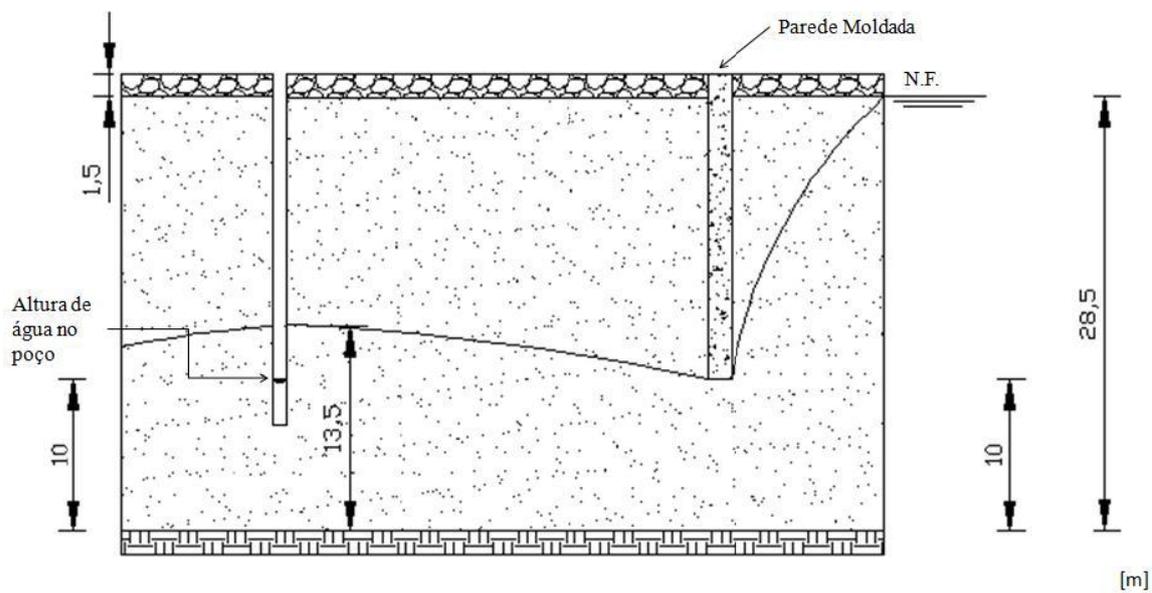


Figura 52 - Perfil tipo da zona de bombagem

4.2. CÁLCULO – APLICAÇÃO DO PROGRAMA

4.2.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

Como já se referiu, não se dispunha de dados de granulometria dos solos atravessados. No entanto, para testar o módulo de definição da permeabilidade equivalente do solo, recorreu-se às informações constantes nas cinco sondagens. Assim, todas elas foram testadas. Dado que o programa foi desenvolvido para um perfil em que as alturas das várias camadas de solo são constantes, foram testados cinco perfis, um para cada sondagem.

4.2.2. SONDAGEM 1

Da sondagem 1 resulta um perfil com duas camadas de solo: uma areia grossa e uma areia média (ver Figura 49 e Figura 50). Na Figura 53 está ilustrada a introdução dessa informação no módulo de permeabilidade. A permeabilidade equivalente ilustrada na figura não é utilizada no cálculo, já que como apenas foi introduzido o valor da permeabilidade de uma das camadas o resultado final não tem significado. Na Figura 54 é possível visualizar as sugestões do programa feitas com base em Fernandes (2006).

Número de Camadas		2	
Camada	Tipo de solo	h i (m)	K _{ih} (m/s)
1	Areia Grossa	10	1,90E-03
2	Areia Média	18,5	
3	ESCOLHER		
4	ESCOLHER		
5	ESCOLHER		
6	ESCOLHER		
7	ESCOLHER		
8	ESCOLHER		
9	ESCOLHER		
10	ESCOLHER		
11	ESCOLHER		
12	ESCOLHER		
13	ESCOLHER		
14	ESCOLHER		
15	ESCOLHER		
K _{equivalente} (m/s)			6,67E-04

Figura 53 – Informação sobre as camadas identificadas na sondagem 1 (S1)

Valores tabelados (Matos Fernandes, 2006)				Escolha os K's que achar mais convenientes
K_{min} (m/s)	K_{max} (m/s)	K_i (m/s)	$K_{equivalente}$ (m/s)	
1,00E-03	1,00E-02	1,00E-02	1,00E-02	
1,00E-04	1,00E-03	1,00E-03	1,00E-03	
NT	NT	0,00E+00	0,00E+00	
NT	NT	0,00E+00	0,00E+00	
NT	NT	0,00E+00	0,00E+00	
NT	NT	0,00E+00	0,00E+00	
NT	NT	0,00E+00	0,00E+00	
NT	NT	0,00E+00	0,00E+00	
NT	NT	0,00E+00	0,00E+00	
NT	NT	0,00E+00	0,00E+00	
NT	NT	0,00E+00	0,00E+00	
NT	NT	0,00E+00	0,00E+00	
NT	NT	0,00E+00	0,00E+00	
NT	NT	0,00E+00	0,00E+00	
NT	NT	0,00E+00	0,00E+00	
$K_{equivalente}$ (m/s)			4,16E-03	0,00E+00

Figura 54 - Solução ponderada com base nos valores de Fernandes (2006)

Na Figura 55 é visível a existência de dois valores distintos de permeabilidade. O primeiro está associado ao valor de permeabilidade introduzido na camada 1, como é perceptível na Figura 53, o segundo é obtido pela média ponderada dos valores tabelados em Fernandes (2006).

A partir da análise destes dois valores o programa sugere a permeabilidade calculada pelos valores fornecidos por Mendonça (2010). Dado que o primeiro valor não tem significado, tal como já foi referido, optou-se pela escolha do valor da permeabilidade obtida dos valores de Fernandes (2006).

$K_{equivalente}$ (valores fornecidos)	6,67E-04	(m/s)
$K_{equivalente}$ (cálculo)	4,16E-03	
$K_{equivalente}$ (valores escolhidos)	0,00E+00	
Por sugestão optou-se pelo seguinte valor de permeabilidade		6,67E-04 (m/s)
Pretende manter o valor sugerido?	<input type="text" value="Não"/>	
Se não qual o valor que pretende?		4,16E-03 (m/s)
Permeabilidade a usar		4,16E-03 (m/s)

Figura 55 - Valores tratados e escolha da permeabilidade mais indicada para o cálculo (S1)

Com a permeabilidade calculada seguiu-se para a atribuição de valores para as várias grandezas relevantes, com base na Figura 52.

Responda às seguintes questões:		
Conhece h_D e quer saber h_0 ?		Escolher
Distancia entre poços (m)	1	0,75
Altura de água no poço, até ao estrato impermeável (m)	erro no cálculo de h_0	0,350
	h_{Dcalc}	10,0
Diâmetro dos poços (m)	b	0,40
Altura do nível freático (m)	H	28,50
Altura máxima de água admitida após o rebaixamento, obtida a partir do estrato impermeável (m)	erro no cálculo de h_D	-3,500
	h_{Dcalc}	13,5
Permeabilidade do solo (m/s)	K	4,16E-03
Altura de água no poço (m)	h_w	10,00
Comprimento da escavação (m)	C	50,00
Largura da escavação (m)	L	50,00



Figura 56 - Valores de cálculo relativos à Sondagem S1

Como é possível ver pela Figura 56 na escolha das alturas não se fez qualquer opção, isto deve-se ao facto de se conhecerem ambas alturas. Também aqui é perceptível o valor da permeabilidade calculada.

Ainda que tenha sido testado o método de cálculo 1, este não é incluído neste relatório por ser um método cuja relevância não é muito grande para o caso em estudo.

Assim, com aplicação do método de cálculo 2 obtiveram-se os resultados apresentados na Figura 57.

Processo iterativo		
Altura de água no poço até ao estrato impermeável (valor melhorado) (m)	h_0	13,3
Raio de influência do poço (valor melhorado) (m)	R_0	2933,4
Caudal total a bombar (valor melhorado) (m ³ /s)	Q	12,9
Erro no cálculo de h_0		0,0
Caudal total final a bombar (m ³ /s)	Q_t	0,8
Confirmação do valor de h_0 para o caudal (m)		13,3
Número de poços (valor final)	n	15
Número de poços ao longo do comprimento	n_c	4
Número de poços ao longo da largura	n_l	4

Calcular

Figura 57 - Solução obtida para S1

É notório pela Figura 57 que a solução encontrada corresponde à utilização de 15 poços. Dado que o número de poços em cada direcção (comprimento e largura da escavação) tem que ser um número inteiro, na verdade a solução a adoptar corresponde a 16 poços (4 x 4).

4.2.3. SONDAGEM 2

Sobre a sondagem S2, pode dizer-se que se trata de um perfil de 3 camadas, como é perceptível pela Figura 49. Em termos de valores fornecidos obteve-se a informação da Figura 58. Mais uma vez é notório o problema de só existir informação de permeabilidade de uma camada, camada 2. Em suma, a permeabilidade resultante de $7,46E-4$ m/s não deve ser considerada nos cálculos. Por isso optou-se pelo valor resultante das permeabilidades das camadas ilustradas na Figura 59.

Número de Camadas 3

Camada	Tipo de solo	h i (m)	K _z (m/s)
1	Areia Grossa	4	2,32E-03
2	Areia Média	9	
3	Areia Fina	15	
4	ESCOLHER		
5	ESCOLHER		
6	ESCOLHER		
7	ESCOLHER		
8	ESCOLHER		
9	ESCOLHER		
10	ESCOLHER		
11	ESCOLHER		
12	ESCOLHER		
13	ESCOLHER		
14	ESCOLHER		
15	ESCOLHER		
			K _{equivalente} (m/s) 7,46E-04

Figura 58 - Informação sobre as camadas identificadas na sondagem 2 (S2)

Gráficos (Camada 1 - Camada 15)

Valores tabelados (Matos Fernandes, 2006)		Comparações		Escolha os K's que achar mais convenientes
K _{min} (m/s)	K _{max} (m/s)	K _i (m/s)	K _{equivalente} (m/s)	
1,00E-03	1,00E-02	1,00E-02	1,00E-02	
1,00E-04	1,00E-03	1,00E-03	1,00E-03	
1,00E-05	1,00E-04	1,00E-04	1,00E-04	
NT	NT	0,00E+00	0,00E+00	
NT	NT	0,00E+00	0,00E+00	
NT	NT	0,00E+00	0,00E+00	
NT	NT	0,00E+00	0,00E+00	
NT	NT	0,00E+00	0,00E+00	
NT	NT	0,00E+00	0,00E+00	
NT	NT	0,00E+00	0,00E+00	
NT	NT	0,00E+00	0,00E+00	
NT	NT	0,00E+00	0,00E+00	
NT	NT	0,00E+00	0,00E+00	
NT	NT	0,00E+00	0,00E+00	
NT	NT	0,00E+00	0,00E+00	
			K _{equivalente} (m/s) 1,80E-03	0,00E+00

Figura 59 - Solução ponderada com base nos valores de Fernandes (2006) – S2

Na Figura 60 são apresentados os dois valores de cálculo possíveis e ainda o processo de seleção inerente à permeabilidade associada aos valores que Fernandes (2006) propõe.

$K_{equivalente}$ (valores fornecidos)	7,46E-04	(m/s)
$K_{equivalente}$ (cálculo)	1,80E-03	
$K_{equivalente}$ (valores escolhidos)	0,00E+00	
Por sugestão optou-se pelo seguinte valor de permeabilidade		7,46E-04 (m/s)
Pretende manter o valor sugerido?	<input type="text" value="Não"/>	
Se não qual o valor que pretende?		1,80E-03 (m/s)
Permeabilidade a usar		1,80E-03 (m/s)

Figura 60 - Valores tratados e escolha da permeabilidade mais indicada para o cálculo (S2)

Sobre a gama de valores de cálculo não se repete a informação visto que os valores se mantêm, a única diferença reside no valor da permeabilidade equivalente apresentada na Figura 60.

A solução atribuída pelo programa de cálculo para esta sondagem é a solução dada pela Figura 61.

Processo iterativo		
Altura de água no poço até ao estrato impermeável (valor melhorado) (m)	h_0	14,5
Raio de influência do poço (valor melhorado) (m)	R_0	1786,3
Caudal total a bombar (valor melhorado) (m ³ /s)	Q	8,9
Erro no cálculo de h_0		0,0
Caudal total final a bombar (m ³ /s)	Q_t	0,4
Confirmação do valor de h_0 para o caudal (m)		14,5
Número de poços (valor final)	n	11
Número de poços ao longo do comprimento	n_c	4
Número de poços ao longo da largura	n_l	4

Figura 61 - Solução obtida para S2

Mais uma vez o valor final obtido é bombado com recurso a 16 poços. É importante, mais uma vez, ressaltar que a resultante da quantidade de poços é extremamente conservativa. Contudo este valor só reflecte a geometria simétrica da escavação.

4.2.4. SONDAGEM 3

Todos os recursos explicados até agora são aplicados também à sondagem 3. Mais uma vez a folha de valores de entrada não é aqui apresentada visto os valores atribuídos serem iguais aos da sondagem 1 com excepção da permeabilidade que é possível de ler na Figura 62. Novamente, houve necessidade de seleccionar a permeabilidade adequada, devido à permeabilidade atribuída não ser a mais indicada. Sobre as permeabilidades resultantes, pode ainda dizer-se que, mais uma vez, se optou pelos valores sugeridos por Fernandes (2006). As bases dessa solução são visíveis na Figura 63.

Número de Camadas		3	
Camada	Tipo de solo	h _i (m)	K _s (m/s)
1	Areia Grossa	11,5	1,23E-03
2	Areia Média	6	
3	Areia Fina	11	
4	ESCOLHER		
5	ESCOLHER		
6	ESCOLHER		
7	ESCOLHER		
8	ESCOLHER		
9	ESCOLHER		
10	ESCOLHER		
11	ESCOLHER		
12	ESCOLHER		
13	ESCOLHER		
14	ESCOLHER		
15	ESCOLHER		
K _{equivalente} (m/s)			4,96E-04

Figura 62 - Informação sobre as camadas identificadas na sondagem 3 (S3)

Valores tabelados (Matos Fernandes, 2006)				Comparações	Escolha os K's que achar mais convenientes
K_{min} (m/s)	K_{max} (m/s)	K_i (m/s)	$K_{equivalente}$ (m/s)		
1,00E-03	1,00E-02	1,00E-02	1,00E-02		
1,00E-04	1,00E-03	1,00E-03	1,00E-03		
1,00E-05	1,00E-04	1,00E-04	1,00E-04		
NT	NT	0,00E+00	0,00E+00		
NT	NT	0,00E+00	0,00E+00		
NT	NT	0,00E+00	0,00E+00		
NT	NT	0,00E+00	0,00E+00		
NT	NT	0,00E+00	0,00E+00		
NT	NT	0,00E+00	0,00E+00		
NT	NT	0,00E+00	0,00E+00		
NT	NT	0,00E+00	0,00E+00		
NT	NT	0,00E+00	0,00E+00		
NT	NT	0,00E+00	0,00E+00		
NT	NT	0,00E+00	0,00E+00		
NT	NT	0,00E+00	0,00E+00		
			$K_{equivalente}$ (m/s)	4,28E-03	0,00E+00

Figura 63 - Solução ponderada com base nos valores de Fernandes (2006) – S3

As camadas de solo observadas nesta sondagem são em tudo equivalentes às da sondagem S2, sendo que a permeabilidade aqui calculada é algo distinta, como é possível de ser visualizado pela Figura 64.

$K_{equivalente}$ (valores fornecidos)	4,96E-04	(m/s)
$K_{equivalente}$ (cálculo)	4,28E-03	
$K_{equivalente}$ (valores escolhidos)	0,00E+00	

Por sugestão optou-se pelo seguinte valor de permeabilidade **4,96E-04** (m/s)

Pretende manter o valor sugerido?

Se não qual o valor que pretende? **4,28E-03** (m/s)

Permeabilidade a usar **4,28E-03** (m/s)

Figura 64 - Valores tratados e escolha da permeabilidade mais indicada para o cálculo (S3)

Sobre a Figura 64 pode repetir-se a informação de que a opção da permeabilidade recaiu sobre os valores sugeridos por Fernandes (2006).

Processo iterativo		
Altura de água no poço até ao estrato impermeável (valor melhorado) (m)	h_0	13,3
Raio de influência do poço (valor melhorado) (m)	R_0	2985,8
Caudal total a bombear (valor melhorado) (m ³ /s)	Q	12,9
Erro no cálculo de h_0		0,0000
Caudal total final a bombear (m ³ /s)	Q_t	0,8
Confirmação do valor de h_0 para o caudal (m)		13,3
Número de poços (valor final)	n	15
Número de poços ao longo do comprimento	n_c	4
Número de poços ao longo da largura	n_l	4

Calcular

Figura 65 - Solução obtida para S3

Pela Figura 65 é perceptível que também para esta sondagem a solução de rebaixamento corresponde a 16 poços de bombagem.

4.2.5. SONDAGEM 4

Nesta sondagem não foi possível obter um valor para a permeabilidade a partir do relatório fornecido. Contudo, fez-se a descrição das camadas, Figura 66, com base na sondagem apresentada na Figura 48, e obteve-se um factor de permeabilidade, baseado nas tabelas de Fernandes (2006), Figura 67. Em suma, neste estudo aceitou-se a sugestão feita pelo programa, Figura 68.

Número de Camadas	3
-------------------	---

Camada	Tipo de solo	h i (m)	K _z (m/s)
1	Areia Grossa	4	
2	Areia Média	13,5	
3	Areia Fina	9	
4	ESCOLHER		
5	ESCOLHER		
6	ESCOLHER		
7	ESCOLHER		
8	ESCOLHER		
9	ESCOLHER		
10	ESCOLHER		
11	ESCOLHER		
12	ESCOLHER		
13	ESCOLHER		
14	ESCOLHER		
15	ESCOLHER		
K_{equivalente} (m/s)			0,00E+00

Figura 66 - Informação sobre as camadas identificadas na sondagem 4 (S4)

Valores tabelados (Matos Fernandes, 2006)		Comparações		Escolha os K's que achar mais convenientes
K _{min} (m/s)	K _{max} (m/s)	K _i (m/s)	K _{resultante} (m/s)	
1,00E-03	1,00E-02	1,00E-02	1,00E-02	
1,00E-04	1,00E-03	1,00E-03	1,00E-03	
1,00E-05	1,00E-04	1,00E-04	1,00E-04	
NT	NT	0,00E+00	0,00E+00	
NT	NT	0,00E+00	0,00E+00	
NT	NT	0,00E+00	0,00E+00	
NT	NT	0,00E+00	0,00E+00	
NT	NT	0,00E+00	0,00E+00	
NT	NT	0,00E+00	0,00E+00	
NT	NT	0,00E+00	0,00E+00	
NT	NT	0,00E+00	0,00E+00	
NT	NT	0,00E+00	0,00E+00	
NT	NT	0,00E+00	0,00E+00	
NT	NT	0,00E+00	0,00E+00	
K_{equivalente} (m/s)			2,05E-03	0,00E+00

Gráficos (Camada 1 - Camada 15)

Figura 67 - Solução ponderada com base nos valores de Fernandes (2006) – S4

$K_{equivalente}$ (valores fornecidos)	0,00E+00	(m/s)
$K_{equivalente}$ (cálculo)	2,05E-03	
$K_{equivalente}$ (valores escolhidos)	0,00E+00	

Por sugestão optou-se pelo seguinte valor de permeabilidade	2,05E-03	(m/s)
---	----------	-------

Pretende manter o valor sugerido?	Sim
-----------------------------------	-----

Se não qual o valor que pretende?		(m/s)
-----------------------------------	--	-------

Permeabilidade a usar	2,05E-03	(m/s)
-----------------------	----------	-------

Figura 68 - Valores tratados e escolha da permeabilidade mais indicada para o cálculo (S4)

Processo iterativo		
Altura de água no poço até ao estrato impermeável (valor melhorado) (m)	h_0	14,3
Raio de influência do poço (valor melhorado) (m)	R_0	1933,5
Caudal total a bombear (valor melhorado) (m ³ /s)	Q	8,5
Erro no cálculo de h_0		0,0
Caudal total final a bombear (m ³ /s)	Q_t	0,4
Confirmação do valor de h_0 para o caudal (m)		14,3
Número de poços (valor final)	n	11
Número de poços ao longo do comprimento	n_c	4
Número de poços ao longo da largura	n_l	4

Figura 69 - Solução obtida para S4

Novamente, pela Figura 69 é perceptível uma solução, conservativa, de 16 poços.

4.2.6. SONDAGEM 5

Esta sondagem foi testada, porém, foram obtidos valores que não devem ser levados em consideração devido aos estratos de argila que são considerados, Figura 50 e Figura 70. Até porque, a permeabilidade da argila utilizada, pela coluna “Valores tabelados (Matos Fernandes, 2006)”, pode não ser a mais indicada, Figura 71.

Número de Camadas	6
-------------------	---

Camada	Tipo de solo	h i (m)	K_s (m/s)
1	Siltos	2,5	2,25E-03
2	Areia Grossa	10,5	
3	Areia Média	3	
4	Areia Fina	7,5	
5	Argilas	1,5	
6	Areia Fina	3	
7	ESCOLHER		
8	ESCOLHER		
9	ESCOLHER		
10	ESCOLHER		
11	ESCOLHER		
12	ESCOLHER		
13	ESCOLHER		
14	ESCOLHER		
15	ESCOLHER		
$K_{equivalente}$ (m/s)			2,41E-04

Figura 70 - Informação sobre as camadas identificadas na sondagem 5 (S5)

Valores tabelados (Matos Fernandes, 2006)		Comparações		Escolha os K's que achar mais convenientes
K_{min} (m/s)	K_{max} (m/s)	K_i (m/s)	$K_{equivalente}$ (m/s)	
1,00E-08	1,00E-06	1,00E-06	1,00E-06	
1,00E-03	1,00E-02	1,00E-02	1,00E-02	
1,00E-04	1,00E-03	1,00E-03	1,00E-03	
1,00E-05	1,00E-04	1,00E-04	1,00E-04	
1,00E-10	1,00E-08	1,00E-08	1,00E-08	
1,00E-05	1,00E-04	1,00E-04	1,00E-04	
NT	NT	0,00E+00	0,00E+00	
NT	NT	0,00E+00	0,00E+00	
NT	NT	0,00E+00	0,00E+00	
NT	NT	0,00E+00	0,00E+00	
NT	NT	0,00E+00	0,00E+00	
NT	NT	0,00E+00	0,00E+00	
NT	NT	0,00E+00	0,00E+00	
NT	NT	0,00E+00	0,00E+00	
NT	NT	0,00E+00	0,00E+00	
$K_{equivalente}$ (m/s)			3,89E-03	0,00E+00

Figura 71 - Solução ponderada com base nos valores de Fernandes (2006) – S5

$K_{\text{equivalente}}$ (valores fornecidos)	2,41E-04	(m/s)
$K_{\text{equivalente}}$ (cálculo)	3,89E-03	
$K_{\text{equivalente}}$ (valores escolhidos)	0,00E+00	

Por sugestão optou-se pelo seguinte valor de permeabilidade	2,41E-04	(m/s)
---	----------	-------

Pretende manter o valor sugerido?	Não
-----------------------------------	-----

Se não qual o valor que pretende?	3,89E-03	(m/s)
-----------------------------------	----------	-------

Permeabilidade a usar	3,89E-03	(m/s)
-----------------------	----------	-------

Figura 72 - Valores tratados e escolha da permeabilidade mais indicada para o cálculo (S5)

Assim como já descrito nas sondagens anteriormente estudadas, também nesta se consideraram os valores cuja base é a tabela de Fernandes (2006)

Processo iterativo		
Altura de água no poço até ao estrato impermeável (valor melhorado) (m)	h_0	13,4
Raio de influência do poço (valor melhorado) (m)	R_0	2816,9
Caudal total a bombar (valor melhorado) (m ³ /s)	Q	12,8
Erro no cálculo de h_0		0,0001
Caudal total final a bombar (m ³ /s)	Q_t	0,7474
Confirmação do valor de h_0 para o caudal (m)		13,4
Número de poços (valor final)	n	14
Número de poços ao longo do comprimento	n_c	4
Número de poços ao longo da largura	n_l	4

Figura 73 - Solução obtida para S5

A Figura 73, representa os resultados obtidos. Mais uma vez a solução repete-se, contudo e tal como já descrito de todas as sondagens testadas, esta é a de menor relevância devido às formações argilosas existentes, isto deve-se à relatividade da permeabilidade das argilas. As argilas são problemáticas por se tratarem de um material de difícil estudo.

4.3. COMPARAÇÃO ENTRE O CÁLCULO E O PROJECTO

Com as soluções obtidas a partir do programa de cálculo e a informação fornecida chegou-se às soluções descritas na Tabela 7.

Tabela 7 - Resumo dos valores obtidos por aplicação do programa desenvolvido ao caso de estudo

Sondagem	Permeabilidade (m/s)	Caudal a Bombar (m ³ /s)	Número de poços resultante
S1	4,16E-03	0,8	16
S2	1,80E-03	0,4	16
S3	4,28E-03	0,8	16
S4	2,05E-03	0,4	16
Valores fornecidos	6,00E-03	-	15
	6,17E-03		

Do resumo foi retirada a informação relativa à sondagem 5 por os seus valores se tornarem pouco relevantes devido à presença de bolsas de argila, que não são representativas do que foi encontrado em obra.

Como é visível os valores obtidos pelo cálculo e os valores fornecidos do projecto são em tudo equivalentes, desde o valor das permeabilidades, que se encontram todos dentro da mesma ordem de grandeza, à quantidade final de poços. Na Figura 74 está representada a solução adoptada em projecto. Note-se que a solução projectada tem 15 poços, enquanto a solução calculada com o programa compreende a execução de 16 poços. Esta diferença deve-se, provavelmente, à simplificação realizada para utilização do programa, referente à área em planta da escavação.

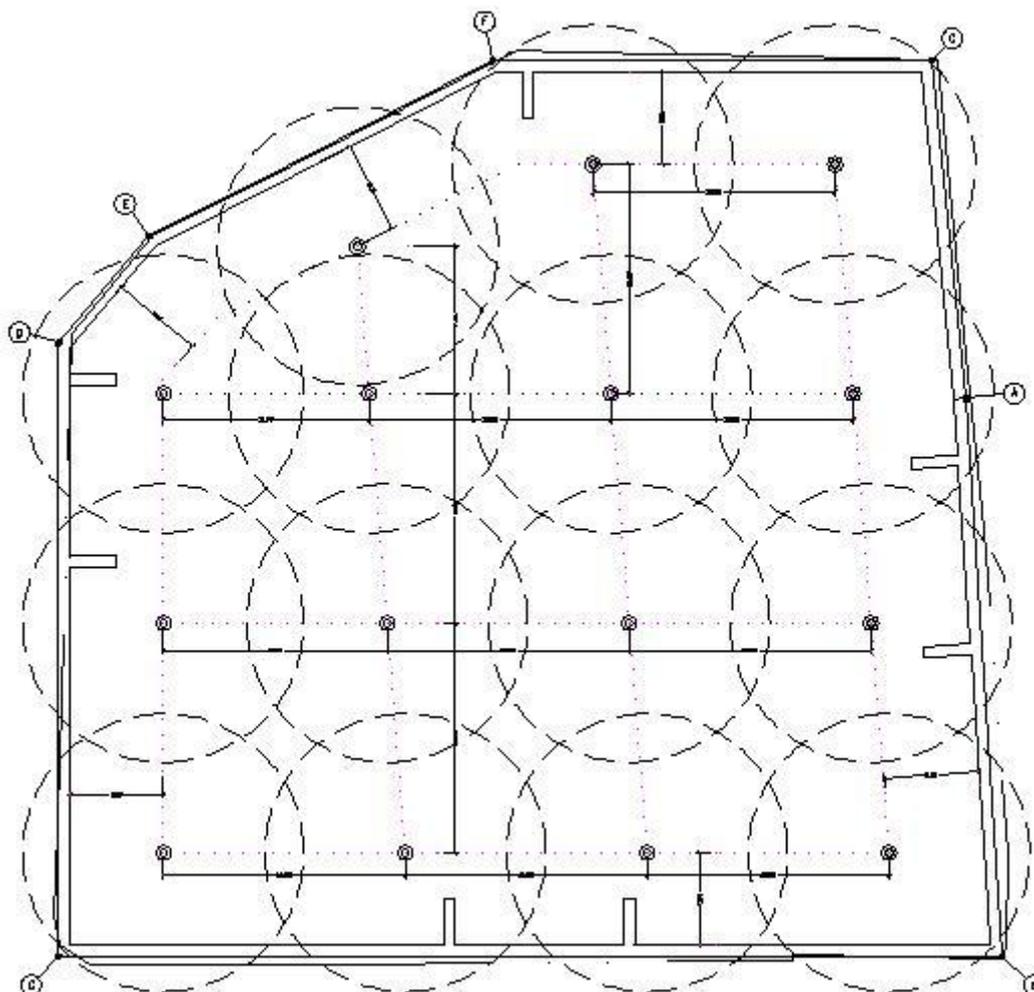


Figura 74 - Colocação projectada dos poços

4.4. RETROANÁLISE

Tal como já referido, no programa de cálculo foi incluído um módulo para realização de retroanálises. Assim, este módulo do programa permite obter um valor da permeabilidade equivalente mais realista, em função do caudal real bombado em obra. Além disso, este módulo permite ainda otimizar a solução de rebaixamento do nível freático, ou seja, ao número de poços adequado para bombear este caudal. Para o caso de estudo em análise foi também realizada uma retroanálise, sabendo-se que o caudal bombado em obra foi de $0,67\text{m}^3/\text{s}$. (Figura 75).

Caudal medido em obra	(m ³ /s)	0,67
Caudal calculado	(m ³ /s)	0,79
Kcal	(m/s)	5,21E-03
Caudal	(m ³ /s)	1,32
		0,00
K_{real}	(m/s)	2,65E-03



Figura 75 - Aplicação da ferramenta de retroanálise ao caso de estudo

Como se verifica, a permeabilidade equivalente correspondente ao caudal bombado em obra encontra-se dentro dos valores já apresentados na Tabela 7. O que significa que a quantidade de poços também é igual à apresentada na mesma tabela, como é perceptível pela Figura 76.

Mais uma vez a solução obtida é de 16 poços. Ressalva-se que esta solução acontece porque o cálculo que o programa executa está directamente ligado á raiz quadrada do número total de poços, e ainda à geometria da escavação. Ou seja aquando do arredondamento, e de forma a obter um resultado mais conservativo, o arredondamento é feito por excesso daí a solução 4x4. Por outro lado, esta solução acontece porque a escavação considerada é quadrada logo a razão entre lado é igual a um.

A retroanálise, recorrendo ao caudal real bombado em obra, foi aplicada às soluções apresentadas atrás, para as 4 sondagens estudadas. Na Tabela 8 é apresentado um resumo das soluções obtidas.

Com a aplicação do caudal real bombado em obra chegou-se, como seria de prever, aos valores de permeabilidade real equivalentes ao da solução real, assim como a quantidade de poços obtida.

FERRAMENTAS DE DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS DE REBAIXAMENTO DO NÍVEL FREÁTICO

Processo iterativo		
Altura de água no poço até ao estrato impermeável (valor melhorado) (m)	h_0	13,9
Raio de influência do poço (valor melhorado) (m)	R_0	2250,7
Caudal total a bombear (valor melhorado) (m^3/s)	Q	8,4
Erro no cálculo de h_0		0,0
Caudal total final a bombear (m^3/s)	Q_t	0,5
Confirmação do valor de h_0 para o caudal (m)		13,9
Número de poços (valor final)	n	12
Número de poços ao longo do comprimento	n_c	4
Número de poços ao longo da largura	n_l	4

Calcular

Figura 76 - Resultado obtido para a permeabilidade obtida na retroanálise

Tabela 8 - Solução para o sistema de rebaixamento e permeabilidade equivalente para os perfis correspondentes às sondagens 1 a 4, após retroanálise

Sondagem	Permeabilidade Real (m/s)	Número de Poços
S1	2,65E-03	16
S2	2,60E-03	16
S3	2,65E-03	16
S4	2,60E-03	16

5. CAPITULO 5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1. DIFICULDADES ENCONTRADAS

Ao longo dos 9 meses de desenvolvimento deste projecto foram vários os problemas que surgiram.

A primeira barreira a atravessar foi o facto da maioria da informação existente, como é perceptível pela bibliografia, só existir em língua estrangeira. Contudo, mais do que ser numa língua estrangeira trata-se de informação extremamente antiga. Sem se olhar aos autores de informação indirectamente associada, e ainda sem contar com um autor de língua portuguesa, cuja obra é totalmente ligada ao rebaixamento do nível freático, e é actual, o que se encontrou remonta por norma aos anos 60, 70, 80 e 90.

Outra barreira que foi necessário ultrapassar foi a linguagem de desenvolvimento do programa. Isto deve-se ao facto da exigência deste trabalho ser a combinação de duas áreas, por um lado a engenharia civil, por outro lado a informática. Ainda que sejam duas áreas intrinsecamente ligadas, não faz parte do estudo do engenheiro civil a formação em VBA e Macros. Contudo, também esta barreira foi ultrapassada com recurso a bibliografia bastante rica e, em grande quantidade em linguagem nacional.

5.2. OBJECTIVOS DEFINIDOS PARA O DESENVOLVIMENTO DA FERRAMENTA NUMÉRICA

Sobre a execução do programa é possível dizer que os objectivos propostos na primeira reunião de trabalho foram todos elaborados. Assim, faziam parte dos objectivos a execução de uma folha de cálculo completamente direccionada para a obtenção da permeabilidade. Foi decidido que a folha de permeabilidade devia servir para estratos com várias camadas de solo e de preferência que cada camada pudesse ter as suas próprias propriedades. Outro objectivo era o cálculo da permeabilidade equivalente por mais do que um método e que esses métodos pudessem ser comparados numericamente e graficamente. Daí a implantação do botão “*Gráficos (Camada1- Camada15)*”. De facto, a base de todo o trabalho desenvolvido é a determinação da permeabilidade equivalente. Para que os resultados obtidos para o dimensionamento de sistemas de

rebaixamento de nível freático tenham significado, é essencial que a determinação da permeabilidade seja adequada e realista.

O objectivo seguinte era a implantação da folha de entrada de valores que alimentava os métodos de cálculo, ou seja, houve a necessidade de uniformizar os métodos por forma a que os valores de entrada servissem aos dois métodos implantados, sem que para isso houvesse necessidade por parte do utilizador em voltar a repetir a entrada de valores. Nesta folha também devia existir a possibilidade de calcular factores que pudessem ser lidos em obra ou matematicamente calculados, e por isso a implantação do botão “*Actualizar*” e da questão inicial, já referida, associada a h_D e h_0 .

O terceiro objectivo era a implantação dos métodos de cálculo. Era necessário que se fizesse a implantação de mais do que um método, sendo que um devia ser direccionado com escavações profundas. Por isso se desenvolveu o método de Poços aplicados a escavações quadradas ou rectangulares profundas. O outro método deveria ser mais direccionado para escavações de dimensões mais pequenas e daí a escolha do método Fila de poços simples ou fila dupla. Esta escolha de métodos foi feita por se tratarem das soluções mais comuns, daí se tratarem de métodos directamente associados à bombagem. Por outro lado, era preciso que as soluções implantadas fossem de cálculo simples para que não tornassem o programa extremamente complexo.

Em ambos os métodos se encontraram problemas que tinham de ser ultrapassados para que a ferramenta de cálculo funcionasse. Os mais comuns foram por um lado a utilização de ábacos no dimensionamento. Assim, foi necessário transformar esses ábacos em equações, de forma a automatizar o mais possível o processo de cálculo. Além disso, foi necessário encontrar uma forma de distribuir os poços na área de escavação (para o Método II) e determinar a distância entre o centro de cada poço e o centro da escavação. Este processo teve que ser implementado de forma iterativa para minimizar o erro de cálculo associado.

O último objectivo proposto foi o da elaboração de um módulo de retroanálise. Assim, com a introdução do caudal real, medido em obra, pretendia-se determinar a permeabilidade equivalente correspondente do perfil de solo em causa. Este módulo permite analisar o realismo e a adequação com que a permeabilidade equivalente foi determinanda na primeira abordagem da obra. Por último, com esses valores corrigidos,

pretendia-se repetir o processo de dimensionamento do sistema de rebaixamento do nível freático, de forma a obter uma solução otimizada. Assim é possível dizer-se que esta valência do programa permite compreender melhor os resultados obtidos e sensibilizar, quem utiliza a ferramenta de cálculo, para a discussão de resultados.

Note-se ainda que se procurou que o utilizador da ferramenta numérica tivesse que intervir apenas para a introdução de informação relevante

Finalmente, pode afirmar-se que esta ferramenta de cálculo de dimensionamento de sistemas de rebaixamento do nível freático recorrendo a bombagem é uma mais-valia no dimensionamento geotécnico de intervenções deste tipo.

5.3. APLICAÇÃO A UM CASO REAL

Ao longo do desenvolvimento da ferramenta numérica de dimensionamento de sistemas de rebaixamento do nível freático a mesma foi sendo testada. Além disso, tal como foi descrito no Capítulo 4, esta ferramenta foi utilizada para analisar um caso de estudo, real, de uma obra em que o rebaixamento temporário do nível freático foi realizado à custa de bombagem.

Da análise dos resultados apresentados, é possível dizer que estes são em tudo parecidos com os obtidos no dimensionamento executado em projecto da obra em causa. Isto é verdade para a permeabilidade equivalente, e também para a solução de poços (número de poços em cada direcção, para um dado diâmetro e espaçamento entre eles). Além disso, a retroanálise executada foi em tudo coerente. Esta informação é visível na Tabela 7 e na Tabela 8.

É de salientar, uma vez mais, que este último módulo permite testar a ferramenta numérica e otimizar o processo de dimensionamento. De facto, o cálculo é rápido e simples e permite recorrer a informação de obras em zonas próximas ou realizadas em condições análogas.

5.4. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Após a conclusão do desenvolvimento desta ferramenta de cálculo compreendeu-se que o curto espaço de tempo disponível não permitiu desenvolver o programa mais profundamente. Embora se tenham cumprido todos os objectivos propostos, fica a

vontade de optimizar a ferramenta numérica. Assim, poderiam ser propostos novos objectivos para tornar a ferramenta ainda mais apelativa e indispensável.

Entre estes são de destacar: o desenvolvimento de módulos: para o cálculo dos assentamentos associados ao rebaixamento do nível freático; para o dimensionamento de sistemas de rebaixamento com a inclusão de redes de fluxo; para o dimensionamento das bombas, associadas aos métodos já incluídos no programa; para métodos de dimensionamento de sistemas de rebaixamento do nível freático adicionais; e para dimensionamento de filtros associados às bombas e sem os quais estas não podem funcionar de forma adequada. Por último, pode ainda referir-se a possibilidade de incluir um módulo de desenho das soluções dimensionadas.

Os assentamentos, discutidos de forma breve no Capítulo 1, podem ter consequências significativas para os edifícios vizinhos à obra, aquando do rebaixamento do nível freático. É, portanto, um assunto de elevada relevância e cuja análise não pode ser esquecida.

De forma análoga, as alterações associadas ao rebaixamento do nível freático, nomeadamente por efeitos de percolação, podem ser analisadas recorrendo a redes de fluxo. Estas incluem os percursos possíveis da água do subsolo, permitindo optimizar o dimensionamento da solução de rebaixamento do nível freático e identificar zonas com potenciais problemas de estabilidade hidráulica.

Sobre o dimensionamento das bombas, é necessário determinar a potência das mesmas, o seu rendimento, a necessidade de substituição e/ou reparação, duração da execução do rebaixamento e, desta forma, auxiliar o planeamento de toda o processo.

Outro objectivo futuro é o alargamento do número e do tipo de métodos de dimensionamento incluídos. Assim, refere-se a possibilidade de incluir o terceiro método que foi descrito neste trabalho (secção 2.4), e implementar um método completamente diferente, que não implique a bombagem de água.

No que diz respeito ao dimensionamento dos filtros associados às bombas, é de salientar que este é sem dúvida de extrema relevância. De facto, quer para garantir a estabilidade dos poços, quer para proteger as bombas que aí são colocadas, é essencial a inclusão de filtros (granulares e/ou artificiais). Assim, facilmente se compreende a necessidade da implantação de um módulo associado aos filtros.

Finalmente, e porque este objectivo é demasiado complexo para combinar com a ferramenta de cálculo e a sua linguagem de programação, fala-se na execução de um módulo de desenho. Note-se que, do ponto de vista da Engenharia Civil, este é o objectivo menos relevante. No entanto, com a sua introdução a ferramenta numérica ficaria mais completa. Note-se ainda que, para que se combinem o módulo de desenho com o Excel, seria necessária uma ligação entre um programa de desenho e o Excel, ou então todas as rotinas de cálculo deveriam ser escritas noutra linguagem programática, que não o VBA ou Macros.

Em suma a implantação destes novos objectivos no programa existente tornariam a ferramenta de dimensionamento do rebaixamento do nível freático um programa indispensável, mais completo e ainda mais interessante.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA

- Almeida, N.G.M.d. (2003). Técnicas de melhoramento de solos - Parte 1 Tratamentos Térmicos - congelamento artificial do terreno. Construlink Press.
- Alonso, U.R. (2007). *Rebaixamento temporário de aquíferos*, p. 152.
- Blake, L.S. (2001). *Civil Engineer's Reference Book*, (4 edn): Butterworth-Heinemann.
- Caputo, H.P. (1967). *Mecânica do Solo e suas aplicações*, Rio de Janeiro: Ao livro técnico S.A., Vol I, p. 187
- Caputo, H.P. (1966). *Mecânica dos Solos e suas aplicações*, Rio de Janeiro: Ao livro técnico S.A., Vol.II, p. 338.
- Cernica, John N. (1994). *Geotechnical Engineering Soil Mechanics*, (John Wiley & Sons, Inc)
- Corporation, C.T.G. (2002). River Close-off and Concrete Cut-off Wall Construction.
- Das, B.M. (1985). *Principles of geotechnical engineering*, (4 edn), p. 712.
- Department of the Army, t.N.a.t.A.F. (1983). *Dewatering and Ground Control*.
- Fernandes, M.M. (2006). *Mecânica dos Solos Conceitos e Principios Fundamentais*, (Feup edn), p. 451.
- FEUP, G.d.E. (2008). Ensaio in situ.
- Hazen, A. (1930). *Water supply*. American civil engineering handbook, John Wiley & Sons), New York, p1444-1518
- Ingold, T.S. (1994). *Geotextil and Geomembranes Manual*, (1 edn): Elsevier advanced technology, p. 515. Medeiros, H. (2008). Recalques indesejáveis. *Téchne*, No. 139.

Lambe, T. W., Whitman, R.V. (1979). *Soil Mechanics, SI Version*. (John Wiley & Sons), New York

Medeiros, H. (2008). Recalques indesejáveis. *Téchne*, No. 139.

Mendonça, A. (2010).

Murthy, V.N. (2003). *Geotechnical Engineering: principles and practices of soil mechanics and foundation engineering*, p. 1007.

Puller, M. (1996). *Deep Excavations a Practical Manual*, London: Thomas Telford publishing p. 437.

Rieke, H.H. & Chilingar, G.V. (1974). *Developments in sedimentology Compaction of argillaceous sediments*, p. 400.

Scott, J.H. (1991). *Dictionary of Civil Engineering*. Penguin books.

Tercero, L.P. (2005). El drenaje profundo en la estabilidad de taludes. Aplicación a un caso concreto. *Actas das 2ª jornadas Luso-Espanhlas de geotecnia*.

Transportation, S.o.F.D.o. (2007). *drainage handbook Exfiltration systems*.

Vitor, M. & Kimus, M. (2000). Rebaixamento temporário do lençol freático (aquíferos). Teresópolis.

Williams, C. (2009). Relief wells: history of use in Memphis district. p. 32.

Xanthakos, P.P., Abramson, L.W. & Bruce, D.A. (1994). *Ground Control and Improvement*.

ANEXOS

Anexo A

MÉTODO	SOLOS	UTILIZAÇÕES	VANTAGENS	DESVANTAGENS	LIMITES DE PROFUNDIDADE	
CONTROLO DA ÁGUA DE SUPERFÍCIE						
Valas	Todos os solos desde que em conjunto com uma folha de PVC	Escavações abertas	Método simplificado de direccionar a água da superfície	Pode causar obstrução ao tráfego de construção		
Paredes de contenção Encaixadas						
MANTER CONTROLADO O NÍVEL DE ÁGUA DO SUBSOLO						
BOMBAMENTO INTERNO						
Sump Pumping	Cascalho limpa, areia grosseira	Escavações abertas e únicas	Bombeamento simples a partir do solo	Finos rapidamente arrastados, levando à instabilidade da estrutura	Limite de escavação até 8m abaixo do nível de instalação da bomba	
Drenagem por gravidade	Solos impermeáveis	Escavações abertas em especial para zonas inclinadas	Equipamento básico de bombeamento			
REBAIXAMENTO DO NÍVEL DAS ÁGUAS DO SUBSOLO						
Sistema de poços com bombeamento por sucção	Cascalho arenoso a areia fina; Pode ser utilizado em areias siltosas, desde que seja feito o controlo apropriado	Escavação aberta incluindo a escavação progressiva em vala. Sistemas de drenos horizontais particularmente para tubagens de escavações vala em zonas urbanas	Para solos adequados, é rápido e simples de montar. Económico no caso de bombeamento por um curto período de tempo	Difícil de instalar em cascalho ou em solos com godo ou blocos. O bombeamento tem de ser contínuo e o barulho provocado torna-se incomodativo nas zonas vizinhas. A sucção é limitada de 4 a 5,5 m dependendo do tipo de solo. Se é necessário rebaixamento a maiores profundidades é necessário usar a instalação por fases	Sistema único de poços:	
					Areia Finas e Siltosa	3-4 m
					Outros solos	5-6 m
					Vários níveis de poços:	
					ilimitada	
					Poços horizontais:	
Limite abaixo do nível do solo	4m					
Maximo	6m					
Sistema edutor usando água a elevada pressão para criar vácuo e elevá-la	Siltos arenosos e areias siltosas	Escavações profundas tão confinadas que os poços por fases são impossíveis. Mais direccionado para solos de permeabilidade baixa	Não existem limitações para a quantidade de água a tirar; é possível herarquizar os furos	Instalação inicial é de veras cara. Elevado risco de inundação da escavação se houver rotura do sistema de alimentação de água a pressão elevada	Ilimitado mas para poços do tipo "drawdown" a restrição é normalmente 25m	
Poços superficiais com bombas por sucção	Siltos arenosos, areias siltosas e zona de formação de aquíferos. Contudo particularmente direccionado para solos de elevada permeabilidade	Mais apropriado para instalações que devem durar meses ou para uso em solos siltosos onde a filtragem correcta é importante	Mais barato por norma que a solução dos poços. Filtragem correcta torna-se mais simples do que a prevenção do desaparecimento dos finos dos solos siltosos	Instalação inicial é de veras cara. O bombeamento tem de ser contínuo e o barulho provocado torna-se incomodativo nas zonas vizinhas. Sucção é limitada de 4 a 5,5 m dependendo do tipo de solo. Se é necessário rebaixamento a maiores profundidades é necessário usar a instalação por fases	Limite de profundidade: 6-8m abaixo do nível de instalação da bomba	
Poços de filtro profundos, isto é com bombas submersíveis (bombas "line-shaft" com motor montado em "well head" utilizado em alguns países)	Cascalho a areia siltosa fina, e zona de formação de aquíferos	Escavação profunda dentro, entre ou por cima da formação da água	Não existem limitações na quantidade de água a tirar, como existe para bombeamento por sucção. Um poço pode ser construído para retirar água das várias camadas ao longo da profundidade. Pode aplicar-se vácuo para ajudar na drenagem de solos finos. Os poços podem ser colocados em zonas fora do tráfego da obra. Se houver electricidade não vão ocorrer problemas de barulho	Elevados custos de instalação	Utilizando bombas submersíveis, não existem restrições	
Electro-osmose	Siltos, argilas siltosas e turfas	Escavação aberta em solos apropriados ou então no caso de haver necessidade de bombear água rapidamente	Nos solos apropriados pode ser utilizado quando mais nenhum método é possível aplicar	Elevados custos de instalação e manutenção	Limite da escavação: 8m abaixo do nível de instalação da bomba	
Galerias de drenagem	Qualquer estrato que suporte água e de permeabilidade baixa. Muito usual em túneis	Retirada de grandes quantidades de água para os extremos de uma barragem, barreira impermeável	Uma elevada quantidade de água pode ser drenada para as galerias, formando assim uma espécie de grupo de bombas	As galerias levam a um gasto excessivo visto que provavelmente vão precisar de ser betonadas	Pode ser instalado a qualquer profundidade desde que o acesso seja possível	
Poço colector	Areia limpa e gravilha/cascalho	Secagem de aquíferos profundos e confinados	Número mínimo de zonas de bombagem	Só pode ser aplicado no caso de grandes escavações	Utilizando bombas submersíveis, não existem restrições	
MÉTODOS DE EXCLUSÃO						
MÉTODOS TEMPORÁRIOS						
Congelamento de Solos: Amónio ou refrigeração por água salgada (salmoura)	Todo o tipo de solos e rochas saturadas	Congelamento da água nos vazios estabilizando-a	Ganho de resistência mecânica temporária por parte do solo; tratamento eficaz desde a superfície; Melhor para trabalhos de longa duração	Demora algum tempo de preparação; a instalação inicial é cara; Implica controlo restrito; pode ocorrer levantamento hidráulico	Ilimitados porém o limite máximo registado foi de 900m abaixo do nível do solo. Depende do tipo de refrigeração: por exemplo o nitrogénio obriga a maiores profundidades	
Congelamento de Solos: Refrigeração por nitrogénio líquido	Todo o tipo de solos e rochas saturadas	Congelamento da água nos vazios estabilizando-a	Igual ao método anterior porém este serve também para aplicações de menor dimensão; Menor duração, onde o congelamento rápido é preciso	pode ocorrer levantamento hidráulico; Implica o controlo restrito; Material (nitrogénio) demasiado caro		
Ar comprimido	Todo o tipo de solos e rochas saturados	Espaços confinados como túneis, poços ou fundações superficiais	Permite a estabilidade lateral da câmara, por limitação da entrada de água; Reduz a bombagem ao mínimo	Custo demasiado elevado e existe a probabilidade de provocar riscos à saúde	Até 10m sem acompanhamento médico; A partir de 35m só com acompanhamento médico	
Vala impermeável com bentonite ou argilas	Siltos, areia cascalho e pedra tipo godo	Praticamente sem restrições; Parede-cortina extensiva a toda a escavação aberta	Instalação rápida; mais económico que uma parede diafragma; Pode ser instalado num estrato impermeável como as argilas ou solos moles	Precisa ter o suporte adequado; Os custos aumentam com a profundidade, ou seja fica caro atingir o estrato rígido; Limita a permeabilidade do solo a 5*10E-3 (m/s)	25m abaixo do nível do solo ou então até atingir a restrição descrita em planta	
Barreira de solo impermeável	Siltos, cascalho areia e pedra tipo godo	Praticamente sem restrições; Parede-cortina extensiva a toda a escavação aberta	Relativamente económico; Pode utilizar-se materiais locais	Tem de ser colocado a uma distância considerável da escavação; Profundidade da instalação é restrita	Normalmente 5m ou menos	
Cortina estanque (também é uma solução permanente)	Todo o tipo de solo com excepção de rochas de grande dimensão, e zonas de obstrução natural ou fora do natural existente	Sem restrições	Método bem entendido para as plantas certas; Instalação rápida; No caso de trabalhos permanentes pode incluir-se o aço	Difícil de conduzir e manter selado com rochas de grandes dimensões; Barulho e vibrações causam desconforto na vizinhança; Se a reutilização não for pensada, este método torna-se muito caro; Selagem pode ser mal executada	Recomenda-se um máximo de 26m abaixo do nível do solo; já foram utilizados 30m porém não se recupera o molde	
ELEMENTOS TIPO DIAFRAGMA						
Paredes diafragma - sistema de contenção estrutural	Para todo o tipo de solos incluindo os que contêm rochas de grande dimensão, por penetração de rocha, e blocos por penetração inversa utilizando bentonite líquida	Caves profundas; Parques subterrâneos; Estações subterrâneas de bombagem; passagens subterrâneas, docas secas, entre outros	Pode ser desenvolvida com o intuito de se tornar uma fundação permanente; Particularmente eficiente em escavações circulares; Provoca o mínimo de vibrações e barulho; É aplicável em zonas restritas; Possível de aplicar próximo de outras fundações	Pode tornar-se uma solução extremamente cara, a não ser que seja como solução permanente; O aço reforçado tem um limite máximo	Instalação abaixo do nível de solo normalmente de 40m, podendo ser atingido 100m	
Parede secante e pilares contíguos	Para todo o tipo de solo, contudo a penetração em rochas duras e de elevada dimensão pode tornar-se demasiado difícil e cara	Caves profundas; parques subterrâneos; estações subterrâneas de bombagem; passagens subterrâneas, docas secas, entre outros	Solução possível em zonas pequenas e confinadas; Aplicável em zonas com fundações nas proximidades; Vibrações e barulho mínimo; Solução permanente	Difícil manter a parede totalmente em contacto com o solo nas laterais, isto deve-se ao facto da parede não ser lisa e a direita; Juntas devem ser seladas por projecção exterior; Limite de aço reforçado é inferior ao limite das paredes diafragma	Profundidade de instalação máxima de 30m abaixo do nível do estrado duro	
MÉTODOS PERMANENTES - PROECÇÃO DE BARREIRA IMPERMEÁVEL OU "GROUTED CUT-OFFS"						
Membrana fina projectada	Areias e siltos	Praticamente sem restrições; Parede-cortina extensiva a toda a escavação aberta	Instalação rápida, logo mais económico que uma parede diafragma; Pode ser instalado num estrato impermeável como argilas ou solos moles	A direcção e a extração da cortina usada para formar os limites da membrana; A profundidade atingida e o tipo de solo; Precisa de ter o suporte adequado; Os custos aumentam com a profundidade, ou seja fica caro atingir o estrato rígido; Limita a permeabilidade do solo a 5x10E-3 (m/s)	Limites de instalação abaixo do nível do solo: 15m sem vibração; 25m com vibração	
Jet grouting	Todo o tipo de solos e rochas moles	Praticamente sem restrições	Instalação rápida; Mais económico que uma parede diafragma; Pode ser instalado num estrato impermeável como argilas ou solos moles	Caro	Não pode ser utilizado em rochas duras	
Cimentícios	Rochas fissuradas e de juntas	Preencher as fissuras de forma a que a água não saia	Equipamento simples; Pode ser usado em zonas confinadas; Solução permanente	O tratamento tem de ser extensivo para que seja efectivo		
Projecção de cimentícios ou de argila	Areias e cascalho	Preencher os vazios para excluir água; Formação de barreiras relativamente impermeáveis (horizontais ou verticais); Aplicável em soluções a longo prazo onde se pretende flexibilidade, por exemplo em barragens	Equipamento simples; Pode ser usado em zonas confinadas; Solução permanente; Projecção é feita com um tubo que limita o espalhamento do líquido; Pode ser selado num estrato irregular ou duro	É preciso construir em paralelo uma barreira comparativamente espessa, para assegurar a continuidade; Precisa de pelo menos 4m de cobertura natural (ou o equivalente)	Determinado pela profundidade para que o buraco de recepção possa ser perfurado e a presença de um estrato que não pode ser penetrado por injeção; Método de Joosten: 12m abaixo do nível do solo; Método de "Tube-à-manchete": superior a 250m (método de depósitos suaves)	
Silicates, Joosten, Guttman e outros processos	Areias médias, grosseiras ou cascalho	Preencher os vazios para excluir água; Formação de barreiras relativamente impermeáveis (horizontais ou verticais); Aplicável em casos de soluções a longo prazo onde não se pretende flexibilidade	Força mecânica superior em termos comparativos; Elevado grau de controlo de espalhamento do injectado; Tempo de vida indefinido; Meios simples de injeção por lances; Desejável para trabalhos a profundidades elevadas e abaixo do nível de água	Preço de químicos utilizados é comparativamente caro; Requer pelo menos 2 m de cobertura de terra natural ou o equivalente; O tratamento pode ser incompleto se feito com material silteoso ou havendo a presença de siltos ou argila		
Projecção de resinas	Areias finas e siltosas	Preencher os vazios para excluir água; Formação de barreiras relativamente impermeáveis (horizontais ou verticais); Aplicável em casos de soluções a longo prazo onde se pretende alguma flexibilidade	Pode ser utilizada em conjunto com argila projectada, para fazer o tratamento do estrato mais fino	Custos elevados; Só é económico quando integrado em grandes projectos de engenharia; Requer controlo restrito da zona de aplicação		
MÉTODOS PERMANENTES - RESISTÊNCIA DO SOLO						
Consolidação electromecânica	Argilas moles	Melhor resistência ao corte das argilas moles sem causar assentamentos		Instalação e custos de manutenção normalmente elevados	Não é crítico porém nunca superior a 8m.	

Tabela adaptada de Deep Excavation a practical manual, by Malcolm Puller 1996