



Universidade de Aveiro Departamento de Geociências
Ano 2016

**ANTÓNIO AUGUSTO
CORREIA MOTA**

**DIMENSIONAMENTO E EXECUÇÃO DE
CAPTAÇÕES DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS**



**ANTÓNIO AUGUSTO
CORREIA MOTA**

**DIMENSIONAMENTO E EXECUÇÃO DE
CAPTAÇÕES DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Geológica, realizada sob a orientação científica do Doutor Eduardo Anselmo Ferreira Silva, Professor Catedrático do Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro, e a supervisão do Senhor Jorge Cordeiro, Diretor da Empresa Sondalis – Captações de Água.

Dedico este trabalho a todos os que contribuíram para a realização do mesmo.

o júri

presidente

Prof. Doutor Jorge Manuel Pessoa Girão Medina
professor auxiliar do Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Eduardo Anselmo Ferreira Silva
professor catedrático do Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Manuel Augusto Marques da Silva
professor catedrático aposentado do Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro

agradecimentos

É com enorme sentimento de alegria que finalizo o meu percurso académico na Universidade de Aveiro. A presente dissertação é não só fruto do trabalho e esforço próprios, é também fruto do trabalho e apoio incondicionais de várias pessoas e instituições.

Quero em primeiro lugar agradecer aos meus pais e irmãs que à conta de muito esforço possibilitaram a minha formação e não tendo eu palavras que possam transmitir o meu profundo agradecimento, agradeço do fundo do coração com um sincero muito obrigado

Ao Professor Eduardo Ferreira da Silva pelo apoio e motivação inicial e final do trabalho, principalmente pela sua simpatia e proximidade necessária a este processo, à clareza nas exposições, aos esclarecimentos de dúvidas e à transmissão de conhecimentos, o meu muito obrigado.

A todos os meus amigos da vida e para a vida, que sempre me acompanharam e contribuíram, direta e indiretamente, para este trabalho, em especial a amigos como Beta, Fábio Matos, Joana Silva (Juni), Fábio Loureiro, Daniel Pinto, Susana Salgado, Tatiana Moreira, Cunha e André Ferreira o meu profundo agradecimento.

Quero agradecer a todos os professores e funcionários da Universidade de Aveiro que contribuíram não só durante a realização do presente trabalho, mas também na minha formação.

Um obrigado à empresa Sondalis, especialmente na pessoa do Sr. Jorge Cordeiro, por me darem a possibilidade de frequentar o estágio do qual resultou este trabalho.

Quero ainda deixar aqui o meu sincero agradecimento a todos que de uma maneira ou de outra contribuíram para o meu sucesso.

palavras-chave

Captação de água subterrânea, Dimensionamento; Execução; Exploração.

resumo

Apresentam-se, neste trabalho, os aspetos mais relevantes relativos à pesquisa e captação de águas subterrâneas bem como, o dimensionamento e execução destas obras.

Esta dissertação descreve o trabalho realizado durante o período de seis meses de estágio na Empresa Sondalis – Captações de Água Lda., que possibilitou ao estagiário participar ativamente nas atividades realizadas pela empresa neste setor de atividade.

É dado especial ênfase ao dimensionamento e construção de uma captação de água subterrânea, já que a empresa onde foi realizado o estágio tem uma vasta experiência neste domínio e possibilitou ao formando o acompanhamento de obras de execução de captações de água. Este estágio permitiu ainda o acompanhamento de obras, a execução de diagrfias, desinfecções de furos e ensaios de caudal.

Com base no histórico da empresa, assim como na experiência adquirida no acompanhamento de obras, foi possível ilustrar os vários procedimentos para a concretização de uma captação de água.

keywords

Water wells, Design, Execution, Exploration.

abstract

The main goal of this work is to set out the most relevant aspects of the design and construction of water boreholes for groundwater supply.

This thesis describes the work carried out during the six months of internship in a water well drilling company, named Sondalis – Captações de Água Lda, allowing the intern to participate actively in the daily projects of the company.

It's given special importance to the design and construction of these engineering projects, once these works are the principal aim and specialization of the company. The intern tasks included accompanying the field work, as construction, execution of well logs, pumping tests and maintenance of the boreholes.

The experience acquired with the practical knowledge of the company allowed the definition a set of procedures to locating water boreholes, design, construction, testing and monitoring water boreholes.

Índice

Capítulo 1 – Introdução.....	1
1.1. Natureza e âmbito.....	1
1.2. A Sondalis – Captações de água, Lda.....	1
1.3 Trabalho desenvolvido.....	2
1.4. Acompanhamento de Obras.....	2
1.5. Estrutura da dissertação.....	3
Capítulo 2 – Fundamentos Teóricos.....	5
2.1. A água.....	5
2.1.1 Ciclo Hidrológico.....	6
2.2. Ocorrências de Água Subterrânea.....	7
2.2.1. Aquíferos.....	7
2.2.2 Características dos aquíferos.....	10
2.3. Fluxo de água subterrânea.....	12
2.3.1. Fluxo radial em furos.....	13
2.3.1.1 Regime variável.....	14
2.3.1.2. Regime permanente.....	16
Capítulo 3 – Pesquisa de Águas Subterrâneas.....	17
3.1. Construção de um furo de captação.....	17
3.1.1 Etapas de construção.....	17
3.2 Pesquisa do local do furo.....	18
3.2.1 Estudo Hidrogeológico prévio.....	21
3.2.1.1 Hidrogeologia Regional.....	21
3.2.1.2 Hidrogeologia Local.....	24
3.2.2 Reconhecimento do terreno.....	26
3.2.3 Prospeção Geofísica.....	27
3.2.3.1 Sondagens Elétricas Verticais.....	28
3.2.3.2 Métodos eletromagnéticos.....	29
3.2.4 Furo de pesquisa.....	29
3.2.5 Definição da localização do furo.....	30
Capítulo 4 – Dimensionamento de Captações.....	31
4.1. Principais elementos de uma captação.....	31
4.2. Princípios gerais do dimensionamento.....	32
4.2.1 Captações em aquíferos fraturados e cársicos.....	34

4.2.2	Captações em aquíferos porosos	37
4.2.3	Considerações económicas sobre o dimensionamento	38
4.3.	Dimensionamento dos materiais de construção	38
4.3.1	Tubagem de Revestimento	38
4.3.1.1	Resistência mecânica	40
4.3.1.2	Durabilidade	41
4.3.2	Tipos de uniões	41
4.3.3	Tubo de proteção	42
4.3.4	Tubo Ralo	42
4.3.4.1.	Tipos de ralos e área aberta total	43
4.3.4.	Maciço filtrante	44
4.3.5.	Isolamento para proteção dos aquíferos.....	46
4.4.	Relatório de Pesquisa e Orçamento.....	46
4.5.	Licenciamento da Captação	47
4.5.1	Empresas executantes de furos de captação de água	48
Capítulo 5 –	Execução de Furos de Captação	49
5.1.	Métodos de perfuração	49
5.1.1	Sistema de perfuração rotopercussivo	49
5.1.1.1	Testes indicativos do caudal durante a perfuração rotopercussiva.....	51
5.1.2	Sistema de perfuração rotativo	51
5.1.2.1	Sistema de perfuração rotativo com circulação direta.....	52
5.1.2.2	Sistema de perfuração rotativo com circulação inversa	53
5.1.3	Seleção do método de perfuração e do bit.....	55
5.1.4	Diâmetro de perfuração	58
5.1.5	Verticalidade da perfuração.....	58
5.2.	Fluidos de Perfuração	59
5.3.	Identificação do material perfurado (Cuttings)	64
5.3.1	Observação do processo de perfuração	64
5.3.1.1	Observação do processo de perfuração (Método Rotativo)	64
5.3.1.2	Observação do processo de perfuração (Método Rotopercussivo).....	66
5.3.2	Amostragem do material perfurado.....	66
5.3.2.1	Caracterização da amostragem	68
5.4.	Diagrafias.....	69
5.5.	Métodos de instalação do revestimento e tubos ralo.....	73
5.6.	Limpeza e Desenvolvimento da captação	74
5.6.1	Métodos de desenvolvimento	76

5.6.2 Desinfecção do furo.....	77
Capítulo 6 – Exploração e Manutenção	79
6.1. Ensaios de caudal.....	79
6.1.1 Ensaios escalonados	80
6.1.1.1 Interpretação do Ensaio de caudal escalonado.....	81
6.1.2 Ensaio de bombagem	84
6.1.2.1 Interpretação do ensaio a caudal constante	84
6.1.3 Ensaio de recuperação.....	86
6.1.3.1 Interpretação do ensaio de recuperação	87
6.2. Colheita de amostras de água	87
6.3. Dimensionamento do equipamento de bombagem.....	88
6.4. Relatório final da obra	91
6.5. Monitorização e manutenção	92
6.5.1 Fatores que afetam o desempenho da captação	92
6.5.2 Métodos de monitorização do sistema de captação	94
6.5.2.1 Monitorização do desempenho hidráulico	95
6.5.2.2 Registo ótico do interior da captação.....	95
6.5.3 Manutenção e reabilitação	97
Capítulo 7 – Casos de Estudo	99
7.1. Pesquisa e Execução de captações.....	99
7.1.1 Captação SL1 Covões.....	99
7.1.2 Captação SL6 São Romão	101
7.2. Diagrafias CA3 - Colmeias.....	103
7.3. Ensaios de caudal (escalonado) SL1-Vila Nova de Santo André.....	105
Capítulo 8 – Considerações finais	111
Referências Bibliográficas.....	113
Anexos.....	115
Anexo nº1 – Coluna litoestratigráfica e esquema da captação SL1 – Covões.....	115
Anexo nº2 – Coluna litoestratigráfica e esquema da captação SL6 – São Romão	116
Anexo nº3 – Diagrafia da captação CA3 - Colmeias.....	117
Anexo nº3 – Registo dos rebaixamentos medidos no ensaio de caudal realizado na captação SL1 Vila Nova de Santo André.....	121

Índice de Figuras

Figura 1.1 - Instalações da Empresa Sondalis – Captações de Água Lda., localizada em Leiria.....	1
Figura 2.1 - Distribuição da água no planeta (extraído de Instituto Geológico e Mineiro, 2001)..	5
Figura 2.2 - Ciclo Hidrológico	6
Figura 2.3 - Zonas saturada e não saturada do subsolo	7
Figura 2.4 - Tipos de Aquífero	9
Figura 2.5 - Tipos de aquífero quanto à litologia (Instituto Português da Qualidade, 2012).....	9
Figura 2.6 - Cones de rebaixamento. A- Aquíferos confinados, B- Aquíferos Livres	13
Figura 2.7 - Evolução dos rebaixamentos ao longo do tempo.....	14
Figura 2.8 - Estabilização dos rebaixamentos após um certo tempo de bombagem	14
Figura 3.1 - Principais etapas para a construção de uma captação de água subterrânea.	18
Figura 3.2 - Diagrama de fluxo mostrando a sequência de tarefas a realizar durante o programa de prospeção de águas subterrâneas.....	19
Figura 3.3 - Exemplos de localizações de captações em diversos contextos hidrogeológicos.	20
Figura 3.4 - Distribuição dos recursos hidrogeológicos de Portugal continental. a – Unidades Hidrogeológicas; b – Sistemas Aquíferos (SNIRH).	23
Figura 3.5 – Exemplo de consulta de uma carta geológica 1/50.000.....	24
Figura 3.6 - Interpretação hidrogeológica dos lineamentos (adaptado de Waters et al., 1990)..	26
Figura 3.7 - Pormenor de uma linha de aquisição de resistividade elétrica.....	29
Figura 4.1 - Componentes de uma captação de água subterrânea.	31
Figura 4.2 - Informação hidrogeológica necessária para o dimensionamento da captação.....	33
Figura 4.3 – Esquema ilustrativo de uma captação de água em aquíferos fraturados.	35
Figura 4.4 - Captações de água em aquíferos porosos	37
Figura 4.5 - Tensões aplicadas na tubagem	40
Figura 4.6 - Tipos de uniões em tubagens de PVC-U. (a) união de encaixe; (b) união roscada...	42
Figura 4.7 - Tipos de ralos: (a) ralos em PVC-u; (b) Ralos com estrutura em ponte (Aço Inox)....	43
Figura 4.8 - Esquema para seleção da abertura dos tubos ralos e do maciço filtrante.....	45
Figura 4.9 - Compactonite, bentonite de alta expansividade em pellets.	46
Figura 5.1 - Exemplo de um bit de utilizado no método rotopercussivo.....	50
Figura 5.2 - Martelo em posição inoperante.....	50
Figura 5.3 - Método de furação à rotação com circulação direta. Instituto Português da Qualidade (2012).....	52
Figura 5.4 - Tricones utilizados na perfuração com o método rotativo.....	53
Figura 5.5 - Método de furação à rotação com circulação inversa, (Instituto Português da Qualidade (2012)).	54
Figura 5.6 - Esquema para seleção do bit de perfuração	56
Figura 5.7 - Principais diâmetros a ter em conta na construção de uma captação de água subterrânea.	58
Figura 5.8 - Funil de Marsh e copo graduado.	60
Figura 5.9 - Balança de lamas.....	61
Figura 5.10 - Espumas de sondagem ascendendo com os cuttings resultantes da perfuração..	62

Figura 5.11 - Exemplo do reboco gerado.....	63
Figura 5.12 - Fluido com elevada concentração de NaCl (1270 ppm), confirmação da presença do mesmo na amostragem.....	65
Figura 5.13 - Exemplo da disposição da amostragem das formações geológicas atravessadas e respetivas etiquetas. (a) Resultantes do método rotoperussivo; (b) Resultantes do método Rotativo por circulação direta.....	67
Figura 5.14 - Equipamento de registo de diagrfias (potencial espontâneo, resistência pontual, resistividade elétrica (normal curta e longa) e radiação gama natural).....	69
Figura 5.15 - Exemplo de uma diagrfia.....	72
Figura 5.16 - Centralizadores.....	73
Figura 5.17 - Ilustração do arranjo das partículas antes e depois dos processos de desenvolvimento.....	75
Figura 5.18 - Exemplo de verificação da limpeza da água.....	75
Figura 5.19 - Exemplo de uma ponteira de Jetting.....	76
Figura 6.1 - Exemplo de um caudalímetro e de uma sonda de nível.....	80
Figura 6.2 - Diagramas esquemáticos dos rebaixamentos em função do tempo nos ensaios escalonados, ilustrando a diferença de com recuperação e sem recuperação.....	81
Figura 6.3 - Curvas características teóricas (Instituto Português da Qualidade, I.P. (2012)).....	82
Figura 6.4 - Determinação do caudal crítico e do caudal máximo de exploração a partir da curva característica (Instituto Português da Qualidade, I.P. (2012)).....	83
Figura 6.5 - Ensaio de recuperação. Neste diagrama s corresponde ao rebaixamento, s_v ao rebaixamento virtual (rebaixamento se a bombagem continuasse), s' ao rebaixamento residual, τ ao tempo de bombagem e t ao tempo após cessação da bombagem.....	87
Figura 6.6 - Cálculo da altura manométrica (adaptado do manual Grundfos).....	89
Figura 6.7 - Curvas de desempenho típicas para vários modelos de uma bomba Grundfos SP 60. Seleção da bomba SP 60-4, para um caudal de 28m ³ /h e uma altura manométrica de 48 metros.....	91
Figura 6.8 - Corrosão da tubagem ocorrendo a perfuração da mesma.....	96
Figura 6.9 - Ralos em tubagem de plástico rasgados por corte. (a) Ralos Limpos; (b) Ralos bastante colmatados.....	96
Figura 6.10 - Ralos em tubagem de ferro com estrutura em ponte. (a) Ralos produtivos; (b) Ralos bastante colmatados.....	96
Figura 6.11 - Esquema do dispositivo das escovas de limpeza e fotografia de uma escova de limpeza.....	97
Figura 7.1 - Rebaixamentos medidos no furo em relação à duração do ensaio.....	106
Figura 7.2 - Caudal em função do rebaixamento gerado.....	107
Figura 7.3 - Rebaixamento específico vs Caudal.....	107
Figura 7.4 - Representação gráfica das curvas características da captação: perdas de carga lineares (BQ, a azul), rebaixamento (BQ+CQ2, a vermelho) em função de diversos caudais teóricos de exploração e a respetiva eficiência da captação (Ew, a verde).....	109

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 - Valores típicos para a capacidade de armazenamento	11
Tabela 2.2 - Valores hidráulicos típicos das diversas formações geológicas (Hipólito, 2014)	12
Tabela 3.1 - Métodos Geofísicos usados na prospeção de água subterrânea.....	28
Tabela 4.1 - Caudais possíveis de se captar tendo em conta o diâmetro do revestimento.	34
Tabela 4.2 - Vantagens e desvantagens dos materiais vulgarmente utilizados no revestimento de uma captação.....	39
Tabela 5.1 - Comparação entre os diversos métodos de perfuração	57
Tabela 5.2 - Velocidades de ascensão tendo em conta o tipo de fluido (Australian Drilling Industry Committe Limited, 1997)	60
Tabela 5.3 - Valores da viscosidade do fluido tendo em conta o tipo de material (Driscoll, 1986)	61
Tabela 5.4 - Diagrafias mais frequentemente utilizadas, a sua aplicação potencial e as condições do furo requeridas para a realização dessas mesmas medições.....	71
Tabela 7.1 - Amostragem e posicionamento dos tubos ralos na captação SL1 Covões.....	100
Tabela 7.2 - Parâmetros dos fluidos de sondagem medidos.....	102
Tabela 7.3 - Amostragem e posicionamento dos tubos ralos na captação SL6 São Romão.	102
Tabela 7.4 - Intervalos de profundidade dos tramos permeáveis.....	105
Tabela 7.5 - Resumo do caudal, rebaixamento e rebaixamento específico para os dois escalões testados	106
Tabela 7.6 - Cálculo da eficiência da captação para diferentes caudais teóricos de exploração.	108

Capítulo 1 – Introdução

1.1. Natureza e âmbito

A presente dissertação resulta de um estágio curricular realizado na *Empresa Sondalis – Captações de Água Lda.*, sediada em Leiria, Portugal, por um período de 6 meses (Figura 1.1).



Figura 1.1 - Instalações da Empresa Sondalis – Captações de Água Lda., localizada em Leiria.

Este estágio insere-se no âmbito da disciplina de Dissertação/Projeto/Estágio do 2º ano do 2º Ciclo em Engenharia Geológica, do Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro. Foi desenvolvido nas instalações da empresa sob a orientação científica do Senhor Jorge Cordeiro, Diretor da *Empresa Sondalis – Captações de Água Lda.*, e do Prof. Doutor Eduardo Anselmo Ferreira Silva, professor catedrático do Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro.

Durante os seis meses de estágio na *Empresa Sondalis – Captações de Água Lda.*, para além da vertente de aprendizagem académica, pretendeu-se adquirir experiência a nível profissional em ambiente empresarial, assim como uma familiarização com o modo de funcionamento do dia-a-dia de uma empresa no ramo das captações de água subterrânea.

1.2. A Sondalis – Captações de água, Lda.

A *Empresa Sondalis – Captações de Água, Lda.*, formou-se em 1989, sendo a sua atividade principal a execução de furos de captação de água e montagem de bombas, vindo ao

longo do tempo a diversificar a sua atividade para realização de furos de biogás, geotermia, piezometria e de rebaixamento do nível freático. Para além disto a *Empresa Sondalis – Captações de Água Lda* possui equipamento para a correta realização de ensaios de caudal, diagrfias e inspeções óticas ao interior das captações.

Graças à continua preocupação em garantir a qualidade dos serviços prestados a *Empresa Sondalis – Captações de Água Lda* obteve a certificação pela norma NP EN ISO 9001:2008, que certifica o Sistema de Gestão da Qualidade em Portugal tendo alcançado o seu maior objetivo, o aumento significativo do nível de confiança dos seus clientes.

1.3 Trabalho desenvolvido

Durante este estágio foram desenvolvidas várias tarefas integradas nos métodos de funcionamento da empresa, de forma a obter uma familiarização com as rotinas diárias da empresa, nomeadamente de logística com a aprendizagem do software de gestão PHC CS. Ainda no âmbito do estágio foi permitido ao estagiário, a elaboração dos processos de licenciamento relacionados com as captações de água bem como a renovação do alvará da empresa para a execução de captações de água subterrânea. A elaboração dos relatórios finais dos furos de captação, de ensaios de caudal, de inspeções óticas e de diagrfias bem como de notas explicativas. Foi também possível o acompanhamento das atividades diárias do Geólogo e técnico responsável da empresa durante a fase de pesquisa e prospeção de águas subterrâneas, bem como na identificação em obra da amostragem. Foi também permitido o acompanhamento do engenheiro responsável pela exploração, adquirindo conhecimentos no âmbito dos equipamentos de bombagem e seu correto dimensionamento, bem como nos processos de desinfeção dos furos.

Para ganhar experiência e crescimento a nível profissional, contribuíram largamente o acompanhamento de obras, participação na realização diagrfias e inspeções vídeo de captações, e a participação numa campanha de aquisição de perfis resistividade elétrica.

1.4. Acompanhamento de Obras

De modo a concretizar os objetivos definidos, foi adotada uma metodologia de trabalho que consistiu inicialmente no trabalho de escritório respeitante ao licenciamento e emissão dos relatórios de captações. Seguidamente, foi permitido ao estagiário o acompanhamento de obras tendo sido acompanhadas no total nove obras de execução de furos de captação de água, três inspeções óticas, duas montagens de bombas, uma diagrfia, um ensaio de caudal e uma desinfeção de uma captação.

Das obras de execução dos furos, 8 foram realizadas pelo método de circulação direta e um pelo sistema de martelo de fundo de furo. Na última obra acompanhada foi permitido ao estagiário dimensionar a coluna de revestimento com base no conhecimento previamente adquirido nas restantes obras.

1.5. Estrutura da dissertação

Para além deste capítulo introdutório e das referências bibliográficas, o presente relatório inclui mais seis capítulos, organizados da seguinte forma:

Capítulo 2: Fundamentos teóricos, no qual se introduzem os fundamentos teóricos deste relatório.

Capítulo 3: Pesquisa de Águas Subterrâneas, no qual se faz uma síntese das etapas de construção de uma captação, bem como um programa de pesquisa de águas subterrâneas

Capítulo 4: Dimensionamento de captações, no qual se analisam os conceitos gerais e específicos do dimensionamento de captações de água, bem como as questões legais inerentes às mesmas.

Capítulo 5: Execução de captações, no qual se apresentam os métodos de construção de captações de águas subterrâneas.

Capítulo 6: Exploração e Manutenção, no qual se apresentam os métodos de avaliação do desempenho das captações de forma a recomendar um plano de exploração sustentável. São também apresentadas as questões relativas à monitorização, manutenção e reabilitação da captação.

Capítulo 7: Casos de estudo, no qual são abordados diversos casos de estudo referentes a obras acompanhadas pelo estagiário.

Capítulo 8: Considerações finais, são apresentadas as principais conclusões da dissertação.

Capítulo 2 – Fundamentos Teóricos

Neste capítulo são apresentados os conceitos fundamentais relativos às águas subterrâneas, sendo feita a identificação dos diversos tipos de aquíferos, bem como uma análise sobre as equações de fluxo subterrâneo.

2.1. A água

A água é um recurso natural imprescindível para a vida, sendo a base de todos os ecossistemas e processos. Como tal, esta é um fator determinante no desenvolvimento económico e social da humanidade, estando grandes corpos hídricos relacionados com o estabelecimento dos impérios mais prósperos da história da civilização.

Apesar dos recursos hídricos serem abundantes no globo, só uma ínfima parte destes apresenta características apropriadas ao aproveitamento direto pelo ser humano. Na Figura 2.1, é possível observar graficamente a distribuição dos recursos hídricos no planeta.

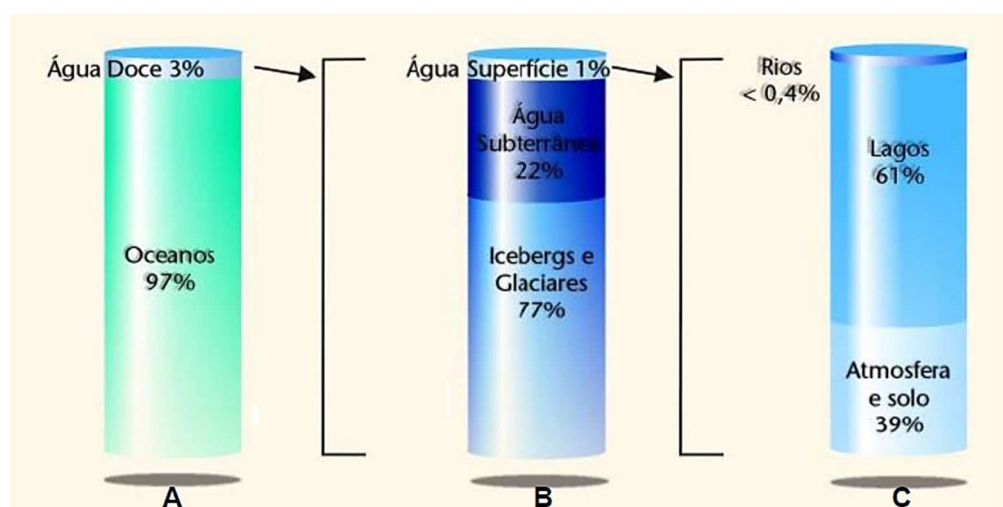


Figura 2.1 - Distribuição da água no planeta (extraído de Instituto Geológico e Mineiro, 2001)

Da análise da figura 2.1 é possível verificar que a água subterrânea representa a segunda maior reserva de água doce do planeta e a mais importante reserva explorável de água potável. Por esta razão a água subterrânea tem vindo a receber maior atenção, procurando-se aprofundar o conhecimento deste recurso para estabelecer melhores mecanismos de gestão. Dela dependem, em grande parte, as atividades agrícolas e industriais, constituindo uma componente fundamental no abastecimento público, estando mais de metade da população humana dependente de água desta proveniência.

2.1.1 Ciclo Hidrológico

O conceito de ciclo hidrológico (Figura 2.2) corresponde aos diversos caminhos através dos quais a água, na natureza, circula e se transforma, constituindo um sistema de grande complexidade.

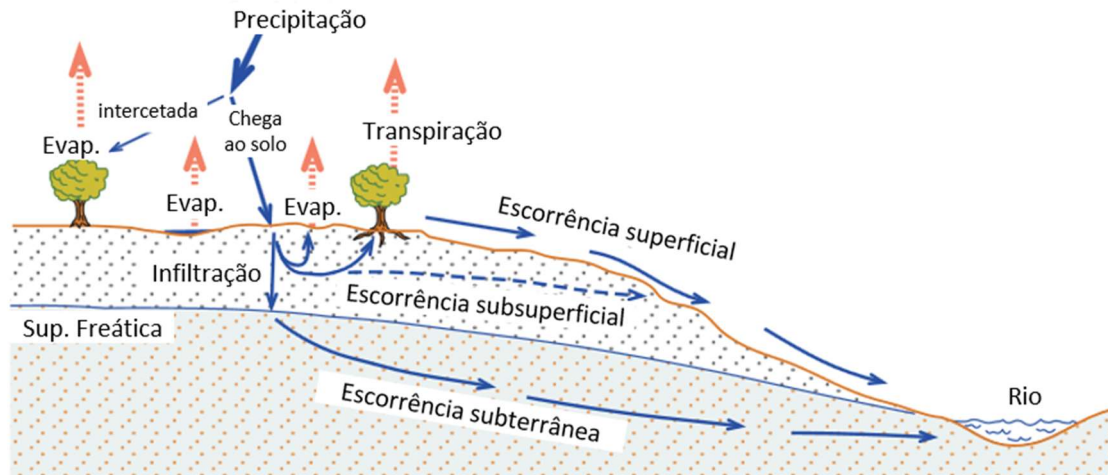


Figura 2.2 - Ciclo Hidrológico

Como se trata de um ciclo devemos considerar todas as suas fases a partir de um qualquer ponto, sendo que o mais intuitivo é partir da evaporação da água dos oceanos e a sua passagem para a atmosfera. De forma simplificada, o vapor de água resultante da evaporação nos corpos de água superficiais e da transpiração das plantas acumula-se na atmosfera e é transportado por massas de ar em movimento, por vezes a distâncias de milhares de quilómetros. Sob condições adequadas, o vapor de água condensa formando nuvens, que por sua vez podem dar origem à precipitação sob a forma de chuva ou neve. Adicionalmente, parte desta água evapora-se durante a queda. Parte da água que atinge a superfície terrestre origina os cursos de água que se reúnem em rios até atingir os oceanos num fenómeno que é conhecido como escoamento superficial. A água restante infiltra-se nos solos e nas rochas percolando para zonas mais profundas por ação da gravidade onde vai recarregar os reservatórios subterrâneos conhecidos como aquíferos.

A recarga, R , pode ser estimada aplicando a equação da continuidade para uma certa região durante um determinado período de tempo, sendo escrita em função das variáveis do ciclo hidrológico (Equação 2.1).

$$R = P - E_s - ET \pm \Delta s \quad (\text{Eq. 2.1})$$

onde R corresponde à recarga, P corresponde à precipitação, E_s ao escoamento superficial, ET à evapotranspiração e Δs à variação do volume de armazenamento

Posteriormente a água armazenada nestas formações, pode ressurgir à superfície e alimentar linhas de água ou ser escoada diretamente no oceano fechando-se assim o ciclo.

2.2. Ocorrências de Água Subterrânea

Dada a importância das reservas de água subterrânea, o conhecimento da sua ocorrência, fluxo e qualidade é importante para a gestão dos recursos hídricos e preservação do ambiente, para a projeção e operação de sistemas de abastecimento de água, de redes de drenagem urbana e agrícola ou de obras hidráulicas como barragens e diques. Esse conhecimento é também necessário na construção de grandes obras da engenharia como pontes, edifícios e túneis. Como tal, antes de se introduzirem os conceitos fundamentais sobre aquíferos, é necessário compreender como se distribui verticalmente a água nos materiais ou formações geológicas subterrâneas. Na descida vertical, durante a infiltração, parte da água fica retida pelas forças de capilaridade e por atração molecular, originando a zona não saturada ou de aeração (Figura 2.3) na qual os poros estão preenchidos por ar e água (Custódio e Llamas, 2001).

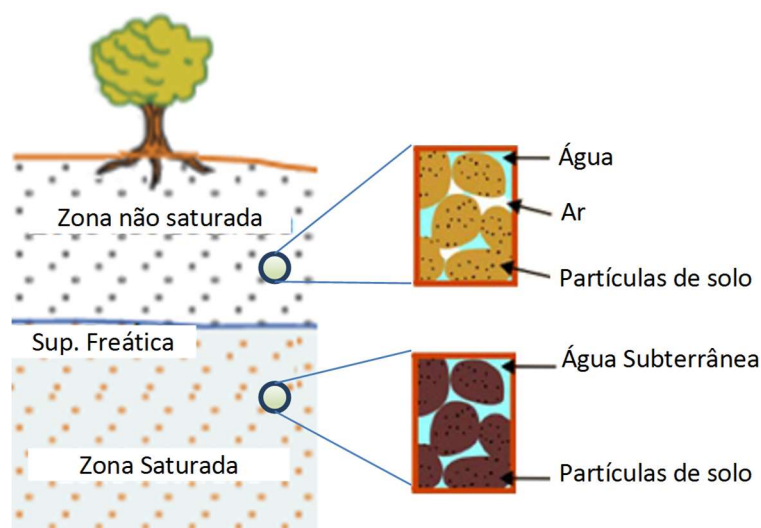


Figura 2.3 - Zonas saturada e não saturada do subsolo

A água que continua a percolar atinge a zona saturada (Figura 2.3) onde os poros estão preenchidos por água e entra na circulação subterrânea contribuindo para um aumento da água armazenada. Isto constitui o processo de recarga dos aquíferos (Custódio e Llamas, 2001).

2.2.1. Aquíferos

Na natureza existe uma ampla gama de formações geológicas com capacidades diferenciadas para armazenar e transmitir água. Em hidrogeologia, é usual dividir as

formações geológicas em quatro grupos (Fetter, 2001): (a) aquíferos, (b) aquíferos, (c) aquíferos e (d) aquíferos.

Denomina-se aquífero uma formação geológica que permite a circulação e o armazenamento de água em quantidade apreciável nos seus espaços vazios, bem como uma exploração economicamente rentável da mesma (Lencastre & Franco, 2003). A grande maioria dos aquíferos em exploração, ou com potencial para tal, é constituída por materiais de textura grosseira (areia, seixo, calhau), rocha calcária carsificada onde a água formou cavidades por dissolução do material, rocha fraturada ou com falhas preenchidas por material permeável.

Um aquífero é uma camada impermeável que não deixa passar água, embora possa contê-la, como acontece nos sedimentos com poros não interconectados ou sedimentos porosos muito pequenos (por exemplo, estratos de argila).

Um aquífero é uma formação geológica que contém água em quantidade apreciável, mas cuja transmissão é extraordinariamente lenta. Estes não servem, portanto, para a extração de água em condições economicamente rentáveis, mas podem desempenhar um papel importante na recarga dos aquíferos adjacentes. Como é possível de verificar trata-se de um conceito intermédio entre os dois anteriores (por exemplo, argilas siltosas ou arenosas).

Um aquífero corresponde a uma formação impermeável que não armazena nem transmite água como por exemplo o granito não fraturado e inalterado.

Devemos ter em conta que os conceitos acima descritos são relativos, visto que, numa região onde as reservas de água subterrânea são diminutas, podemos considerar como "bom" um aquífero que permita extrair um caudal 0,5 l/s. No entanto, numa região com bons aquíferos tal formação seria considerada um aquífero.

Os aquíferos podem ser classificados quanto à pressão a que está submetida a água nessas formações, considerando-se três tipos de aquíferos: (a) confinados, (b) semiconfinados e (c) livres. Existe ainda um caso particular de aquíferos livres, os aquíferos suspensos, que surge quando uma formação impermeável aparece entre a zona saturada e a superfície do solo, dando origem à retenção de águas de infiltração acima dessa formação (Figura 2.4).

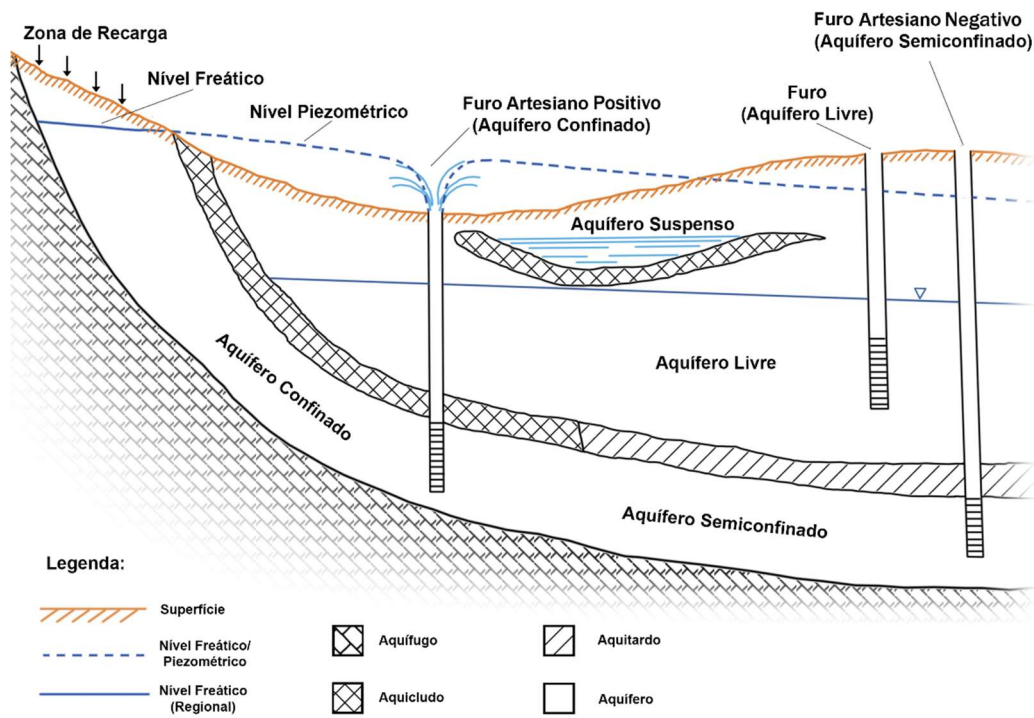


Figura 2.4 - Tipos de Aquífero

Do ponto de vista das captações de água e da engenharia é vulgar caracterizar-se um aquífero tendo em conta o tipo de porosidade (Figura 2.5), permitindo ter uma primeira ideia do seu potencial.

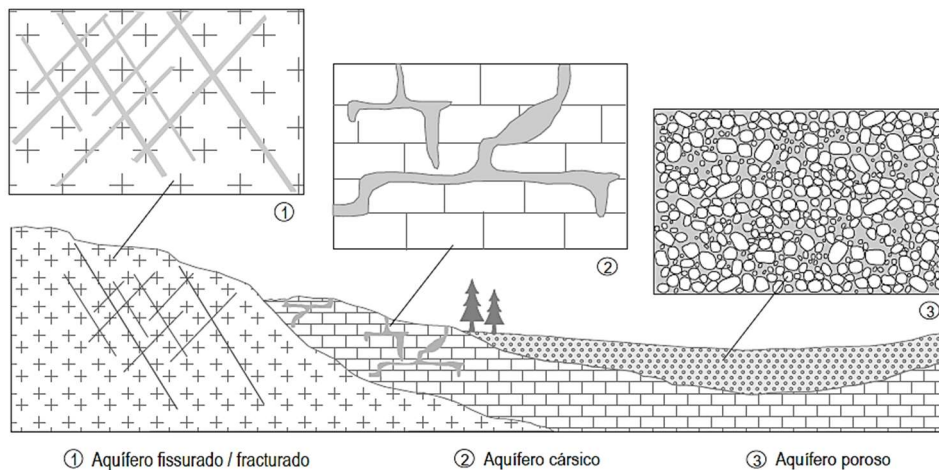


Figura 2.5 - Tipos de aquífero quanto à litologia (Instituto Português da Qualidade, 2012)

Os denominados aquíferos porosos, cuja permeabilidade se deve à porosidade intergranular, são constituídos por rochas sedimentares detríticas, permitindo que a água se armazene e circule pelos vazios intergranulares. Os vazios podem estar preenchidos por material fino, diminuindo as características hidrogeológicas do aquífero, ou por

material argiloso retendo a água e anulando o seu potencial de exploração. Estes tipos de aquíferos podem ser extensos, desde que sejam contínuos. A ocorrência de água subterrânea não é limitada às camadas superficiais, podendo encontrar-se aquíferos porosos até profundidades de 1000 m.

Os aquíferos cuja permeabilidade se deve a falhas ou fraturas de origem tectónica são designados por aquíferos fraturados. Este tipo de aquíferos é predominante nas litologias ígneas e metamórficas, que de outro modo são normalmente impermeáveis. Quando se procede à construção de um furo de captação neste tipo de aquíferos é de elevada importância o estudo do sistema de fracturação, visto que as falhas podem, ou não, ser meios produtivos num meio hidrogeológico. A sua produtividade depende fortemente da forma final das falhas, da sua abertura e material de enchimento. As falhas podem tornar-se barreiras ao escoamento subterrâneo no caso de estarem preenchidas por materiais de baixa permeabilidade. É de salientar que estes tipos de aquíferos são relativamente superficiais visto que as falhas raramente ultrapassam os 150 m de profundidade.

Por fim, temos os aquíferos cársicos que ocorrem em rochas carbonatadas nomeadamente, calcários e mármore por intermédio de carsificação. Este processo consiste na dissolução por ação da água em formações previamente fissuradas, permitindo um aumento da porosidade e permeabilidade.

2.2.2 Características dos aquíferos

Na caracterização de um aquífero interessam as propriedades relativas ao armazenamento e cedência de água bem como à forma como esta é escoada.

A porosidade (η) é a capacidade que uma formação geológica tem para armazenar água e pode ser definida como a relação entre o volume preenchível por fluidos (V_v), e o volume total do material geológico (V_T) (Equação 2.2). Esta depende da disposição dos grãos e da compactação, cimentação e recristalização podendo subdividir-se em porosidade primária e secundária.

$$\eta = \frac{V_v}{V_T} \quad (\text{Eq. 2.2})$$

A porosidade primária (P) resulta do período de constituição da rocha ou do solo e é determinante para as rochas sedimentares (areias, argilas, siltes), assim como para certas rochas vulcânicas. A porosidade secundária (S) é gerada após a constituição da rocha por fracturação, alteração e, no caso das rochas calcárias, por dissolução do carbonato de cálcio pela água (carsificação).

Apesar da porosidade indicar a quantidade de água que uma formação pode conter, é de salientar que nem toda essa água poderá estar disponível. A quantidade de água que um aquífero pode fornecer é definida pelo parâmetro “Cedência específica”, que se define como a razão entre o volume de água drenada por gravidade e o volume total de material geológico.

Sabemos que podemos calcular o volume de água extraído de um aquífero livre por intermédio da cedência específica. No entanto no caso dos aquíferos confinados e semiconfinados tal parâmetro não se aplica porque quando proporcionam água, todos os seus poros continuam saturados, ocorrendo só uma diminuição da pressão, de modo que a cedência específica não nos é indicativo da quantidade de água explorável. Como tal, o parâmetro que indica a água libertada ao diminuir a pressão do aquífero é o coeficiente de armazenamento (S). Este corresponde ao volume de água libertado por uma coluna de aquífero de secção transversal unitária para um abaixamento unitário da altura piezométrica (Equação 2.3). Na prática é o parâmetro que nos indica a quantidade de água que podemos obter dos aquíferos confinados e semiconfinados, visto que nos aquíferos livres este parâmetro é sensivelmente igual à cedência específica.

$$S = S_s \times b, \quad S_s = \rho g (\alpha + \eta \beta) \quad (\text{Eq. 2.3})$$

Onde, b corresponde à espessura do aquífero, ρ à densidade da água, g à aceleração gravítica, α à compressibilidade da matriz sólida do aquífero, η à porosidade e β à compressibilidade da água. O coeficiente de armazenamento é, tal como a cedência específica um parâmetro adimensional, e os valores são inferiores nos aquíferos confinados perfeitos que nos semiconfinados. Os valores típicos são apresentados na tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Valores típicos para a capacidade de armazenamento

<i>Tipo de aquífero</i>	<i>Capacidade de armazenamento</i>	<i>Cedência específica</i>
<i>Aquífero Livre</i>	-	0,3 a 0,01
<i>Aquífero semiconfinado</i>	10^{-3} a 10^{-4}	-
<i>Aquífero confinado</i>	10^{-4} a 10^{-5}	-

Por fim, é necessário definir o conceito de condutividade hidráulica (K) que se caracteriza por ser uma propriedade do meio permitir a passagem de um fluido, em maior ou menor caudal por unidade de área. Esta propriedade depende das características do meio (porosidade, tamanho, arranjo das partículas) e das propriedades do fluido (viscosidade e densidade). É uma constante de proporcionalidade linear entre o caudal e o gradiente

hidráulico (i). No entanto, o potencial de transmissão de água de um aquífero não depende só da permeabilidade, mas também da sua espessura (b). A característica que traduz esse potencial é a transmissividade (T), que se define como o produto da condutividade hidráulica pela espessura saturada (Equação 2.4).

$$T = Kb \quad (\text{Eq.2.4})$$

De forma sucinta, podemos dizer que a identidade hidrogeológica de qualquer rocha ou formação geológica está definida por dois fatores, a sua capacidade de armazenar água (cedência específica e coeficiente de armazenamento) e a sua capacidade de a transmitir (permeabilidade e transmissividade) (Tabela 2.2).

Tabela 2.2 - Valores hidráulicos típicos das diversas formações geológicas (Hipólito, 2014)

Litologia	Porosidade dominante*	Porosidade (%)	Cedência específica (%)	Permeabilidade (m/dia)
Areão	P	25 – 35	22 - 24	100 – 1000
Areia Grossa	P	30 – 40	27	20 – 100
Areia Média	P	-	26 – 28	5 – 20
Areia Fina	P	25 – 50	21 – 23	1 – 5
Silte	P	35 – 50	8	0,1 – 1
Calcário	S	0 – 35	14	0,2 – 3
Argila	P	40 – 60	2 – 3	10 ⁻⁸ – 0,2
Grés	P	5 – 30	21 - 27	0,2 – 3
Basalto	S/P	3 – 35	-	0,01
Granito	S	0 - 55	-	0,2 – 1,5

* P – Porosidade Primária

S – Porosidade Secundária

2.3. Fluxo de água subterrânea

A água subterrânea em condições naturais flui das áreas de recarga, normalmente a zona onde o aquífero aflora, para as zonas de descarga como por exemplo as nascentes, os rios ou os oceanos. O fluxo através da zona saturada pode ser quantificado pela equação de Henry Darcy:

$$Q = KAi \quad (\text{Eq. 2.5})$$

onde Q é o caudal, A é a área de secção perpendicular ao fluxo, K é a condutividade hidráulica e i é o gradiente hidráulico (adimensional). O parâmetro responsável por este deslocamento é o gradiente hidráulico, que é definido como a razão entre a diferença de cotas da recarga até à descarga sobre a distância entre elas. Este parâmetro é variável tanto verticalmente como lateralmente ao longo do fluxo.

Como o caudal numa conduta é o produto da velocidade pela secção, então é possível calcular a velocidade do fluxo subterrânea a partir da formula de Darcy, verificando que a velocidade é igual ao produto da condutividade hidráulica pelo gradiente hidráulico.

No entanto, esta velocidade não é real uma vez que só uma parte do material geológico é que permite a circulação de água. Deste modo é necessário calcular a razão desta velocidade pela cedência específica obtendo:

$$v = \frac{Ki}{\eta_e} \quad (\text{Eq. 2.6})$$

onde v é a velocidade média a que a água se move, K corresponde à condutividade hidráulica, i ao gradiente hidráulico e η_e é a cedência específica da formação. As equações fundamentais do fluxo de água subterrânea acima descritas são empíricas e baseadas nas experiências realizadas através de filtros de areia por Henry Darcy em 1856.

2.3.1. Fluxo radial em furos

As condições naturais de fluxo num aquífero são perturbadas quando um furo se encontra em extração. A ação de bombagem provoca um rebaixamento do nível da água no interior da captação criando, uma diferença hidráulica entre este e o nível de água no aquífero. Esta diferença força a água a fluir radialmente para o interior da captação provocando um rebaixamento da superfície piezométrica em redor do furo, formando um cone de rebaixamento que pode ser medido através piezómetros em redor da captação (Figura 2.6).

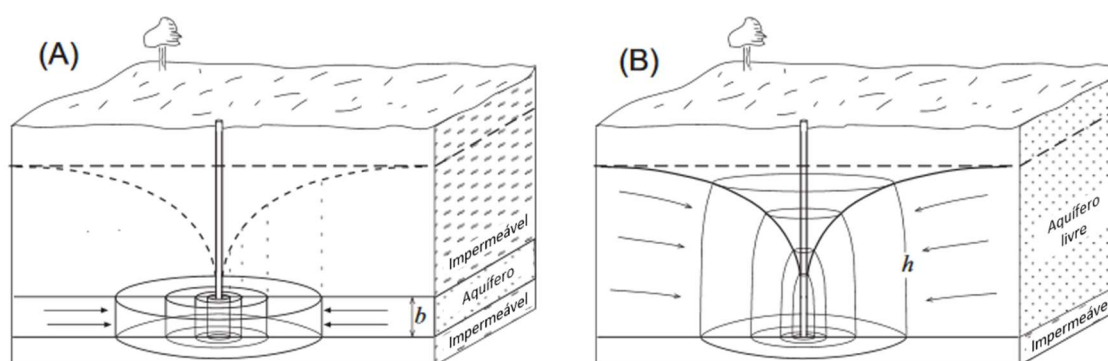


Figura 2.6 - Cones de rebaixamento. A- Aquíferos confinados, B- Aquíferos Livres

À medida que o tempo de extração decorre, o cone de rebaixamento vai aumentando tanto em profundidade como em extensão, encontrando-se a captação em regime variável. Se num piezómetro próximo do furo que está a ser bombeado medirmos os rebaixamentos (s) em função do tempo (t), observamos que a variação de nível é rápida nos momentos iniciais, e progressivamente mais lenta à medida que decorre a extração (Figura 2.7a). Este efeito deve-se ao facto de que à medida que o cone aumenta este necessita de um rebaixamento sucessivamente menor para libertar o mesmo volume de

água. Da observação da figura 2.7b, constata-se que entre períodos de tempo idênticos $[t_1, t_2]$ e $[t_3, t_4]$, para que o caudal seja constante, ou seja, o volume de água libertado seja o mesmo, os rebaixamentos são menores para o período $[t_3, t_4]$. Por outras palavras, a área compreendida entre $[t_1, t_2]$ é a mesma que entre $[t_3, t_4]$, no entanto a espessura da franja (rebaixamento gerado) é diferente.

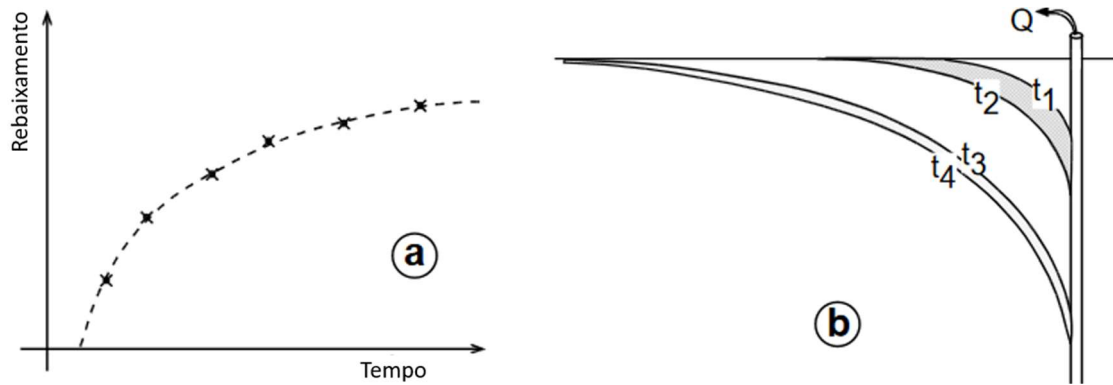


Figura 2.7 - Evolução dos rebaixamentos ao longo do tempo

Se o aquífero não estiver sujeito a recarga, o cone de rebaixamento aumentará indefinidamente em taxas sucessivamente menores. No entanto, em condições normais, o cone de rebaixamentos pode receber água de um rio, lago ou outro aquífero, provocando uma estabilização dos rebaixamentos e alcançando o regime permanente ou equilíbrio (Figura 2.8). Nestas condições, a forma e tamanho do cone são mantidas embora a bombagem siga interruptamente.

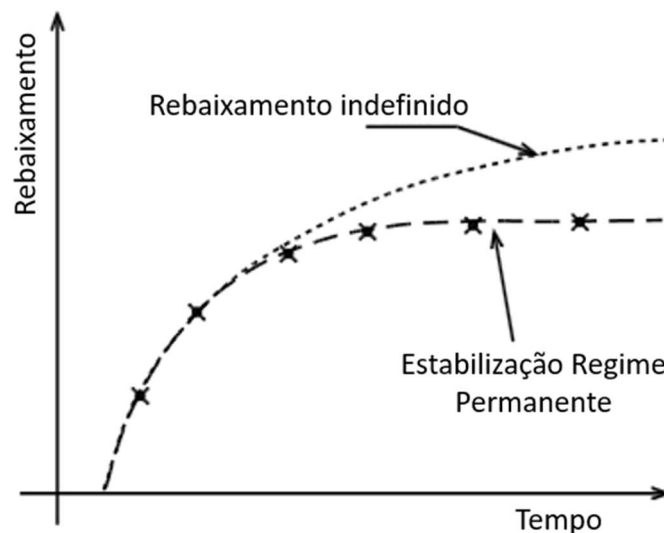


Figura 2.8 - Estabilização dos rebaixamentos após um certo tempo de bombagem

2.3.1.1 Regime variável

Considerando que o furo é de diâmetro praticamente nulo e atravessa completamente a formação permeável. Quando se inicia a bombagem, a cota piezométrica é constante em

todo o aquífero. Como o caudal resulta da redução do armazenamento de água no aquífero, a carga irá continuar a decrescer, mas cada vez mais lentamente, uma vez que a área de influência está continuamente a aumentar, até se chegar a uma situação em que tal decréscimo é negligenciável. Nessa altura, considera-se que se atingiu a situação de equilíbrio que será estudada no item seguinte. Até lá, o escoamento processa-se em regime variável, cuja análise tem interesse prático, principalmente para a determinação da permeabilidade (K) e coeficiente de armazenamento (S) através de um ensaio de bombagem. Deste modo a equação do escoamento radial em regime variável, aceitando que as velocidades não têm componente vertical é dada pela equação de Theis (1935) (Equação 2.7).

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u), \quad u = \frac{r^2 S}{4Tt} \quad (\text{Eq.2.7})$$

Onde, s corresponde ao rebaixamento, Q ao caudal, T à transmissividade, S ao coeficiente de armazenamento, r à distância radial do furo, t ao tempo decorrido desde o início da bombagem e $W(u)$ à função do poço que varia com o valor de u , sendo uma função auxiliar tabelada.

Este método pode também ser aplicado para o caso dos aquíferos livres, desde que se possa assumir que, tal como no caso do aquífero confinado, a água retirada do armazenamento é instantaneamente transformada em caudal. Esta hipótese é válida quando o rebaixamento é pequeno relativamente à espessura saturada do aquífero.

Quando o rebaixamento é grande, essa hipótese não se mantém inteiramente válida, porque, quando a superfície freática baixa, a drenagem por gravidade da água da zona não saturada dá-se com velocidade variável. Por isso Todd (1980) refere que o tempo mínimo de bombagem não deve ser inferior a 4 horas, para areia média a grossa e material mais grosseiro, 30 horas, para areia fina e 7 dias para silte e argila.

Segundo Walton (1962), para aquíferos semiconfinados em regime variável, normalmente referido como sem armazenamento no aquífero, a equação que permite relacionar os rebaixamentos (s), com o tempo de bombagem (t) é dada pela equação 2.8:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W\left(u, \frac{r}{B}\right), \quad u = \frac{r^2 S}{4Tt} \quad (\text{Eq. 2.8})$$

onde s corresponde ao rebaixamento, Q é o caudal extraído e T a transmissividade, $W(u,r/B)$ é função do furo varia com o valor de $u,r/B$, sendo uma função auxiliar tabelada,

S é o coeficiente de armazenamento, r é a distância do furo ao piezómetro, t o tempo e B o fator de gotejo.

2.3.1.2. Regime permanente

No que diz respeito aos aquíferos confinados em regime permanente, se assumirmos que o fluxo é horizontal, é possível calcular teoricamente a forma do cone de rebaixamento. Thiem (Thiem, 1906), desenvolveu uma fórmula (Equação 2.9) onde relaciona a forma do cone de rebaixamento em função da distância, do caudal e da transmissividade:

$$s_1 - s_2 = \frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (\text{Eq.2.9})$$

onde s_1 e s_2 correspondem aos rebaixamentos localizados a distâncias r_1 e r_2 respetivamente, Q é o caudal extraído e T a transmissividade.

A equação 2.9 não é válida para aquíferos livres, visto que a espessura (b) não é constante, isto deve-se ao facto de em aquíferos livres, a espessura saturada do aquífero diminuir à medida que se aproxima da captação. No entanto, o erro é aceitável se os rebaixamentos produzidos são desprezíveis em relação à espessura saturada do aquífero ou, podemos aplicar a chamada correção de Jacob (1946), obtendo o rebaixamento corrigido (Equação 2.10).

$$s' = s - \frac{s^2}{2h_0} \quad (\text{Eq. 2.10})$$

onde s' corresponde ao rebaixamento corrigido, s corresponde ao rebaixamento observado, h_0 é a espessura saturada inicial do aquífero.

Com já tínhamos visto, os aquíferos semiconfinados são aqueles que se encontram limitados por camadas semipermeáveis (aquitardos). Nas circunstâncias de regime permanente, o rebaixamento já não vai depender do coeficiente de armazenamento (S), nem do tempo (t). A expressão que nos permite relacionar os rebaixamentos (s) a qualquer distância do furo (r) é dada pela equação 2.11 (De Glee, 1930).

$$s = \frac{Q}{2\pi T} K_0 \left(\frac{r}{B} \right) \quad (\text{Eq.2.11})$$

Onde, s corresponde ao rebaixamento, Q ao caudal, T à transmissividade, r à distância ao piezómetro de observação e K_0 é uma função tabelada.

Capítulo 3 – Pesquisa de Águas Subterrâneas

Este capítulo descreve sucintamente as várias etapas de construção de um furo de captação, bem como um programa sistemático de pesquisa para definir as localizações mais adequadas para a realização dos furos de captação de água subterrânea.

3.1. Construção de um furo de captação

As captações de água subterrânea têm sido, desde as primeiras civilizações em África e na Ásia, um importante meio para extração de água. Na Europa, o desenvolvimento de várias vilas e cidades na idade média e durante o período industrial foi promovido pela possibilidade de abastecimento em captações realizadas em importantes massas de água subterrânea. Na atualidade, os furos de captação continuam a ter um papel fundamental na sociedade. Cerca de metade da água de abastecimento público na União Europeia é de proveniência subterrânea variando de 20% a 30% em países como Espanha e Reino Unido, até perto de 100% na Áustria, Lituânia e Dinamarca (Hiscock *et al.*, 2002). Nos últimos anos têm-se assistido a um incremento da utilização de água subterrânea na irrigação estando a agricultura cada vez mais dependente deste tipo de abastecimento.

Os furos de captação podem assim ser definidos como obras pontuais, de maior ou menor complexidade, que servem de ligação entre a água subterrânea e a superfície, com o objetivo de a captar, seja por exemplo para abastecimento populacional, industrial, agrícola ou para rebaixar o nível piezométrico em obras de engenharia. A sua execução é sempre de elevada dificuldade devido à obra desenrolar-se sempre fora da vista dos intervenientes, o que torna difícil avaliar o que acontece no decorrer dos trabalhos. Deste modo torna-se essencial estruturar a execução destas obras em etapas distintas.

3.1.1 Etapas de construção

A construção de uma captação de água subterrânea pode dividir-se em diversas fases como se ilustra na figura 3.1. Independentemente da finalidade e do tipo de captação a realizar, a construção inicia-se com a identificação do local adequado e termina com a sua implementação, operação e manutenção.

Na fase de pesquisa pretende-se definir o local potencialmente mais produtivo e obter o máximo de informação sobre a hidrogeologia da zona para se proceder a um correto dimensionamento da captação.

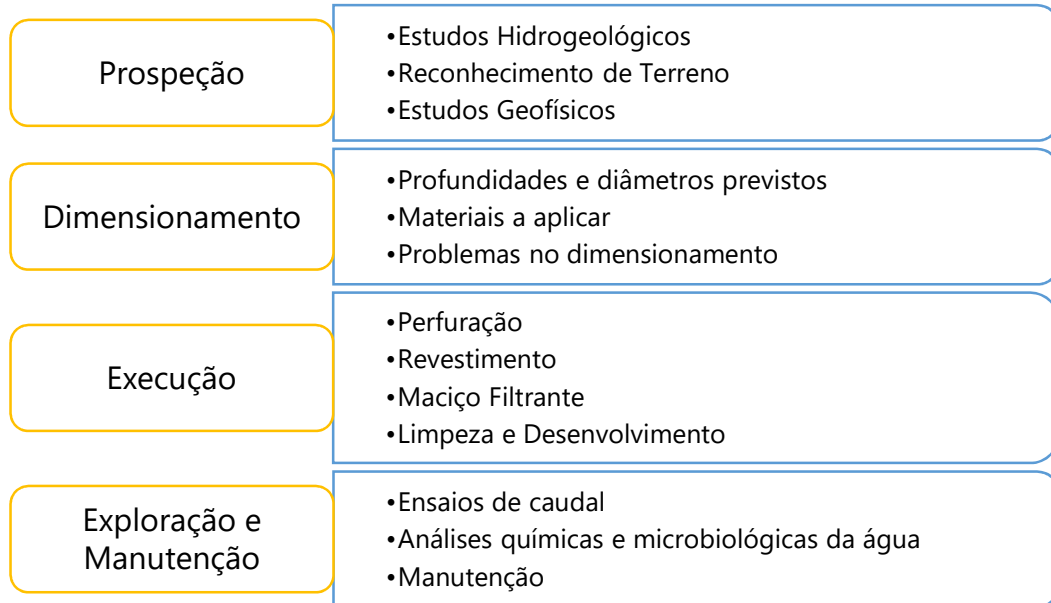


Figura 3.1 - Principais etapas para a construção de uma captação de água subterrânea.

O dimensionamento da captação tem como objetivo definir o método de furação a utilizar, os diâmetros de furação, as profundidades previstas e os materiais a aplicar. Esta etapa é totalmente dependente dos resultados da pesquisa e essencial para a definição do investimento necessário para a realização da captação.

A fase de execução engloba as operações de furação e, caso o furo se mostre produtivo para o fim a que se destina, procede-se à instalação da coluna de revestimento, do maciço filtrante e do isolamento. O último procedimento desta etapa consiste na limpeza/desenvolvimento da captação com o intuito de promover e facilitar o afluxo de água e ao mesmo tempo remover eventuais lamas ou detritos de furação.

Após a conclusão das obras de construção da captação, deverá realizar-se um ensaio de caudal que permitirá não só calcular os parâmetros hidráulicos do aquífero, mas também, o correto dimensionamento do grupo de bombagem.

É de salientar que, como em qualquer obra da engenharia, deve-se realizar a manutenção da captação realizando inspeções óticas e limpezas quando necessário. Análises químicas e bacteriológicas devem também ser realizadas de forma a monitorizar a qualidade da água extraída.

3.2 Pesquisa do local do furo

A definição do local para execução de um furo de captação de água subterrânea pode ser descrita por intermédio de um programa sistemático (Figura 3.2). O mesmo é

destinado essencialmente para captações com as finalidades de consumo humano, irrigação ou outros propósitos de abastecimento. No entanto pode-se aplicar um programa similar para definir a localização de outros tipos de furos, adaptando a abordagem para que se enquadre na finalidade pretendida (monitorização de águas subterrâneas, recarga artificial de aquífero entre outros).

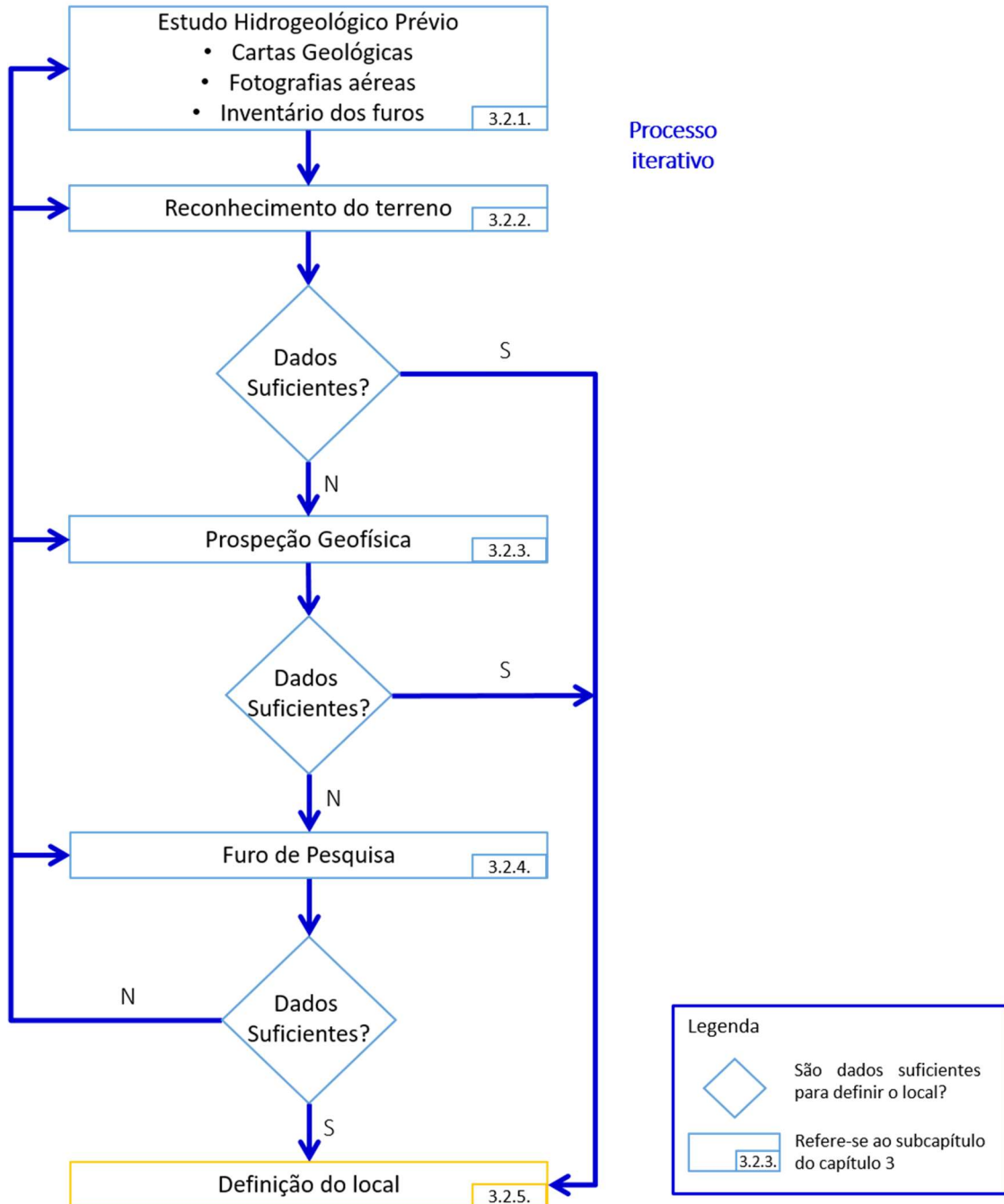
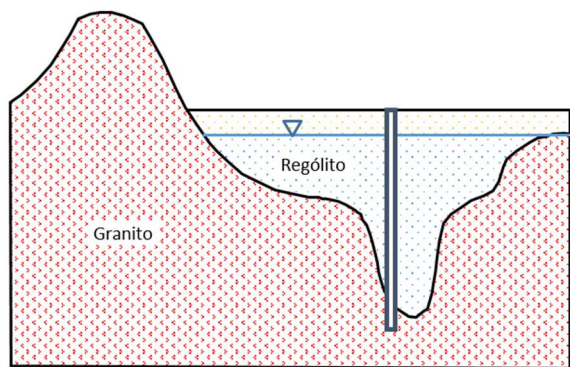


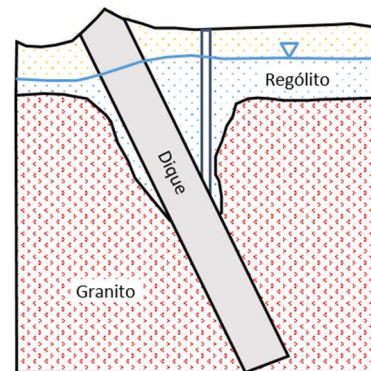
Figura 3.2 - Diagrama de fluxo mostrando a sequência de tarefas a realizar durante o programa de prospecção de águas subterrâneas.

O processo da figura 3.2 deve ser realizado até ser claro que existem dados suficientes para avançar com a definição do local. É de salientar que, em alguns casos, as únicas tarefas que são realizadas para seleção da localização são o estudo hidrogeológico prévio, seguido de um reconhecimento do terreno. Isto ocorre em casos onde os aquíferos são extensos e homogêneos, possuindo-se um grande nível de conhecimento dos recursos hídricos e da sua qualidade. Note-se que a realização das tarefas ilustradas na figura 3.2 deve sempre ser acompanhada por técnicos especializados, nomeadamente por hidrogeólogos de modo a garantir o sucesso da sua execução.

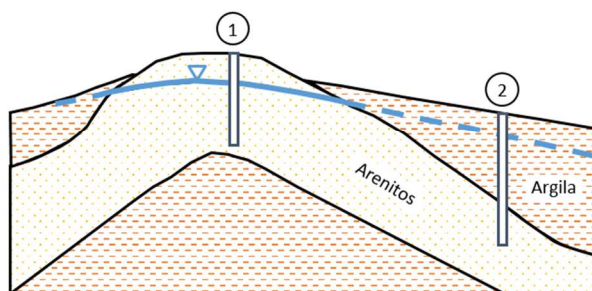
Exemplos de possíveis localizações de captações para uma grande variedade de aquíferos são ilustradas na figura 3.3.



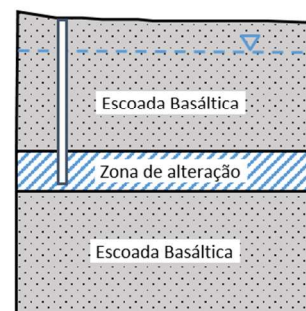
Captação localizada numa zona fraturada e alterada de uma formação cristalina. A zona profunda de alteração corresponde a uma falha vertical



Captação localizada numa formação cristalina onde o fluxo subterrâneo é bloqueado por um dique. Deste modo o nível freático está a menor profundidade do lado do maior gradiente.



Os dois furos estão a captar água dos arenitos. O furo 1, pode apresentar melhores características devido a uma maior fraturação perto do centro do anticlinal. No entanto, a captação 1 é mais vulnerável à poluição que 2, localizado mais abaixo no aquífero confinado.



As características dos aquíferos em sistemas vulcânicos são variáveis. Boas fontes de água podem ser encontradas em zonas de alteração entre escoadas

Figura 3.3 - Exemplos de localizações de captações em diversos contextos hidrogeológicos.

Estes são baseados em modelos conceptuais; na realidade a localização de uma fonte de água subterrânea é mais complicada, visto que requer conhecimento mais profundo da zona. O investimento monetário que deve ser feito na pesquisa de águas subterrâneas

vai depender da complexidade hidrogeológica, da informação pré-existente e da dimensão do projeto de exploração.

3.2.1 Estudo Hidrogeológico prévio

O primeiro passo a realizar pela empresa responsável pela construção da captação de água subterrânea, é proceder a um estudo hidrogeológico no gabinete, de modo a analisar remotamente os potenciais locais para a execução do furo. Durante esta investigação deve ser programado o reconhecimento de campo, identificando os elementos a ser analisados no terreno. Os estudos hidrogeológicos têm como objetivo identificar os locais onde os furos devem ser construídos de modo a extraírem a quantidade de água necessária com qualidade adequada para o uso pretendido.

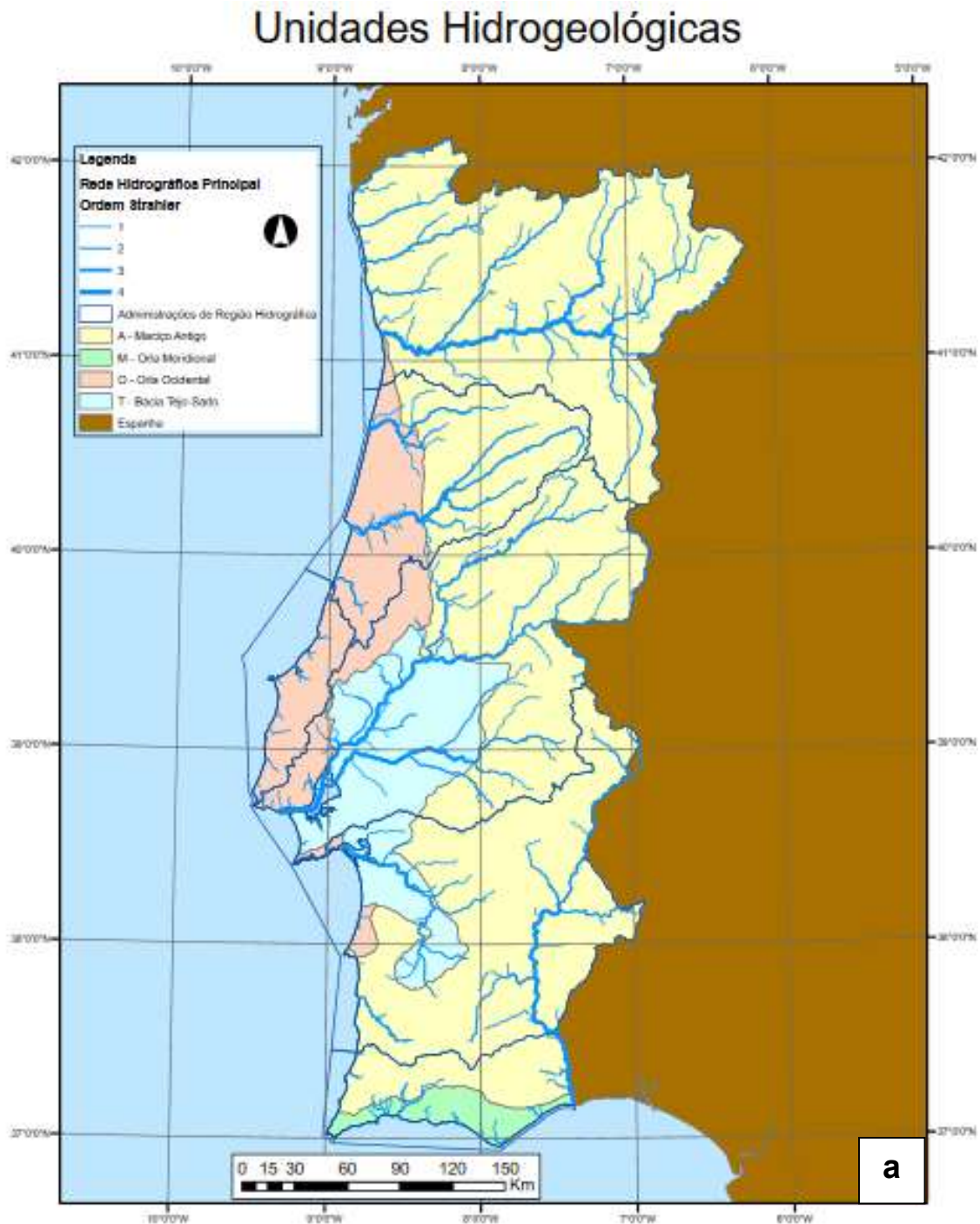
3.2.1.1 Hidrogeologia Regional

Caso o investigador tenha uma experiência limitada sobre a área de estudo, uma revisão da hidrogeologia regional pode revelar-se bastante útil. Assim, de um ponto de vista hidrogeológico, ocorrem em Portugal sistemas geológicos de vários tipos (poroso, fissurado e cársico) que condicionam o armazenamento e a transmissão da água subterrânea. Portugal Continental está dividido em quatro grandes unidades hidrogeológicas (INAG, 1997): (1) o Maciço Antigo, (2) a Orla Ocidental, (3) a Orla Meridional e a (4) Bacia do Tejo-Sado (Figura 3.4a). Nessas unidades estão delimitados 62 sistemas aquíferos (Figura 3.4b).

O Maciço Antigo é constituído essencialmente por rochas ígneas e metamórficas. Embora consideradas como impermeáveis, estas litologias têm alguma capacidade de armazenamento, quer na zona de alteração superficial, quer no sistema de fraturas que as afetam. Dada a elevada complexidade destas litologias, que se traduz em geral pela extrema dificuldade em estabelecer modelos conceptuais de circulação de água, o conhecimento destes meios hidrogeológicos é ainda muito limitado. É de salientar que nesta unidade surgem, contudo, sistemas aquíferos com um potencial hidrogeológico relevante associados a rochas carbonatadas, a gabros, a terraços e a cascalheiras que ocupam depressões do maciço.

Na Orla Ocidental existe uma grande variedade de formações que são constituídas essencialmente, por arenitos e calcários do Mesozóico e Cenozóico, bem como por areias e aluviões quaternários. No que diz respeito às formações do Mesozóico, as principais unidades aquíferas são constituídas por calcários jurássicos que apresentam uma elevada irregularidade, sendo as captações neles efetuados muito aleatórias. Os depósitos calcodetríticos do cretácico podem igualmente constituir unidades aquíferas, mas de extensão

e permeabilidade menor que as formações jurássicas. No Cenozóico as formações detríticas podem fornecer elevados caudais por captação, normalmente no miocénico onde são mais regulares.



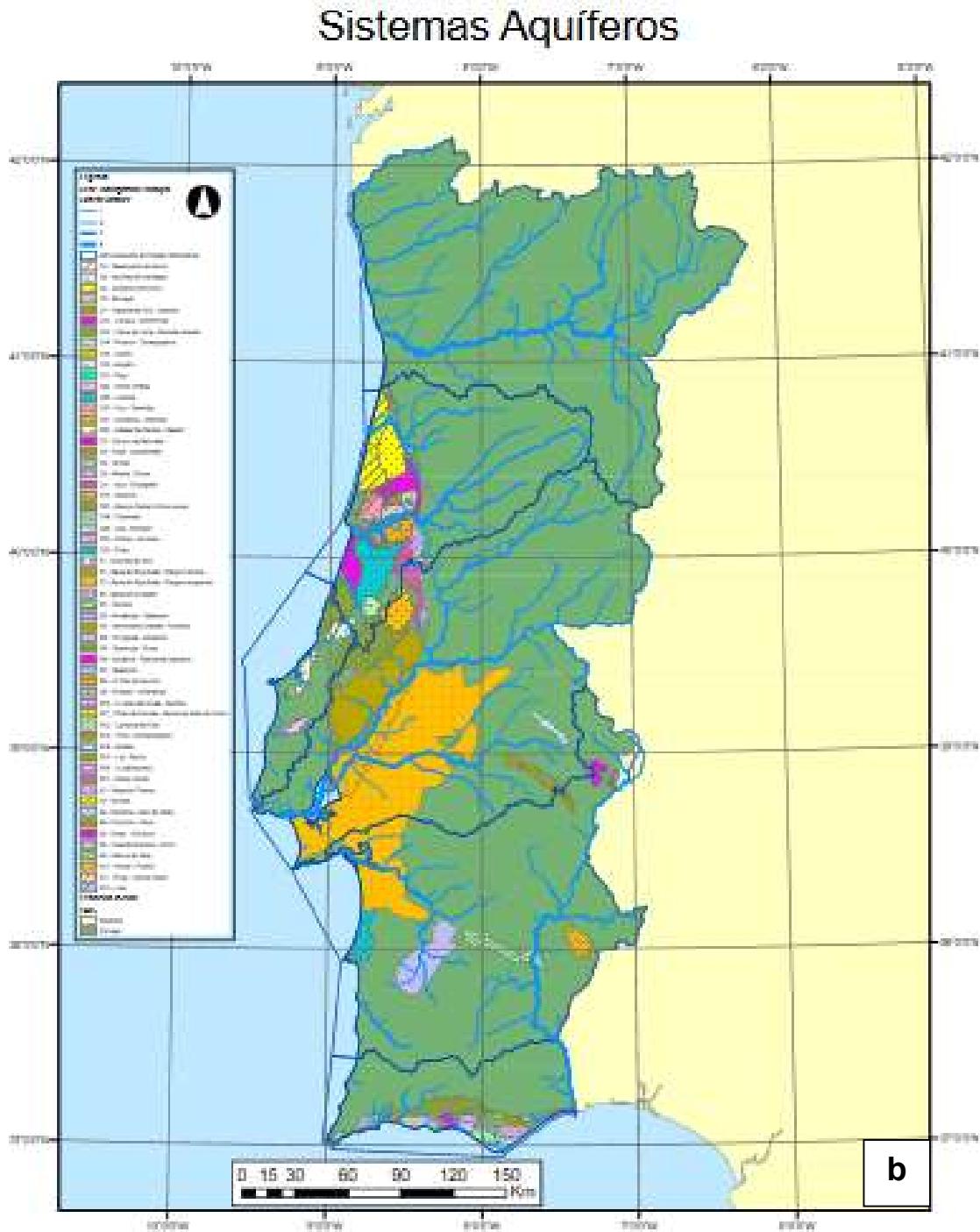


Figura 3.4 - Distribuição dos recursos hidrogeológicos de Portugal continental. a – Unidades Hidrogeológicas; b – Sistemas Aquíferos (SNIRH).

Por sua vez a Orla Meridional é constituída por formações detríticas e carbonatadas de um modo geral muito produtivas. Esta unidade hidrogeológica é caracterizada pela grande homogeneidade litológica de características cársicas ou parcialmente cársicas.

Finalmente a Bacia do Tejo-Sado é constituída por formações detríticas de idade terciária e quaternária. É aqui que se situa o mais extenso sistema aquífero da Península Ibérica, o Sistema da Bacia do Tejo-Sado, constituindo um importantíssimo fator de desenvolvimento pois tem assegurado numerosos abastecimentos urbanos, industriais e agrícolas. Nesta Unidade podem ocorrer captações a extrair caudais na ordem das dezenas de litros por segundo.

3.2.1.2 Hidrogeologia Local

A consulta de cartas geológicas, nomeadamente na escala de 1/50.000, é o aspeto basilar para selecionar as áreas mais favoráveis à pesquisa de águas subterrâneas (Figura 3.5).

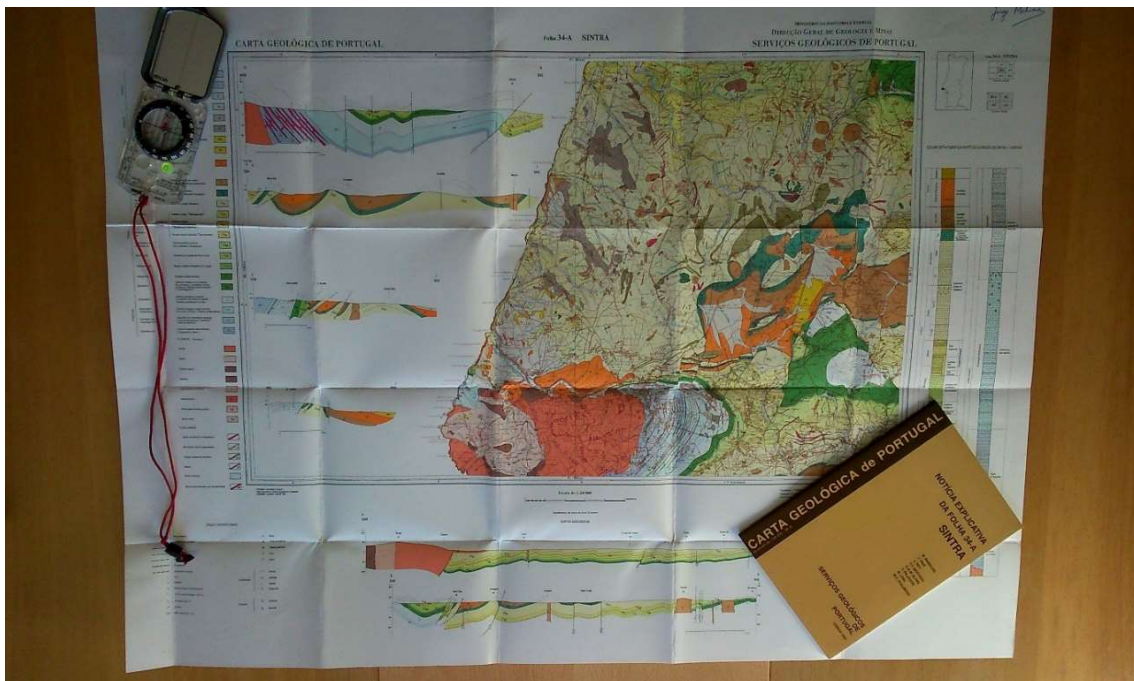


Figura 3.5 – Exemplo de consulta de uma carta geológica 1/50.000

Tais documentos permitem-nos prever os tipos de rochas que se encontram em profundidade e qual a sua atitude, dando indicações sobre a possível existência e situação de reservatórios naturais, pelo que são indispensáveis no estabelecimento de qualquer projeto de furos de captação. A identificação litológica com recurso a estes mapas permite inferir os tipos de aquíferos espectáveis, as suas propriedades hidrogeológicas, a espessura das camadas produtivas e a estrutura e fracturação do subsolo. O tipo de rochas onde circulam essas águas subterrâneas e o das que afloram à superfície, condicionam também a vulnerabilidade dos aquíferos a substâncias

poluentes, em especial pela sua permeabilidade e fracturação. O conhecimento destas características é essencial para o estabelecimento de quaisquer planos que visem evitar possíveis contaminações nesses aquíferos. Um estudo sobre os furos existentes deverá também ser feito com vista a corroborar ou refutar os tipos de litologia expectável obtidos a partir da análise da cartografia geológica.

Para além da litologia, a análise dos relatórios técnicos dos furos previamente existentes na área permite obter informações sobre níveis piezométricos, níveis hidrodinâmicos, caudais possíveis de explorar e, por vezes, a qualidade da água subterrânea. Estes dados podem ser obtidos pelo inventário de furos da empresa ou consultados na plataforma do Sistema Nacional de Informação dos Recursos Hídricos (SNIRH). É de salientar que os dados que se encontram na plataforma do SNIRH podem não ser verdadeiramente representativos do regime hidrogeológico do sistema aquífero. Furos secos normalmente não são incluídos e a informação relativa aos ensaios de bombagem tende a ser proveniente dos melhores furos.

O recurso à deteção remota e fotointerpretação (fotografias aéreas, imagens de satélite) é uma ferramenta que permite obter informações sobre a topografia do local, padrões de drenagem e a distribuição da vegetação ajudando na identificação da zona de recarga e de descarga dos aquíferos. No entanto, a deteção remota tem uma especial importância na seleção de áreas potencialmente favoráveis à pesquisa de águas subterrâneas, em aquíferos fraturados e alguns aquíferos porosos. Nestas situações as áreas com maior potencial encontram-se vulgarmente associadas a lineamentos que por vezes são observados por fotografia aérea. Estes lineamentos podem corresponder a zonas de fratura, falhas ou outras características hidrogeológicas com significado, como é o caso, de contactos litológicos (Figura 3.6).

Contudo, é de salientar que nem todas as fraturas são zonas com grande potencial para as águas subterrâneas visto que algumas podem estar preenchidas por material de alteração ou por argilas de baixa permeabilidade derivadas da alteração hidrotermal (Missteat *et al.*, 1980). Deste modo, a deteção destes lineamentos nas fotografias aéreas ou em imagens de satélite deve sempre ser procedida de investigações de campo tais como reconhecimento do terreno ou geofísica.

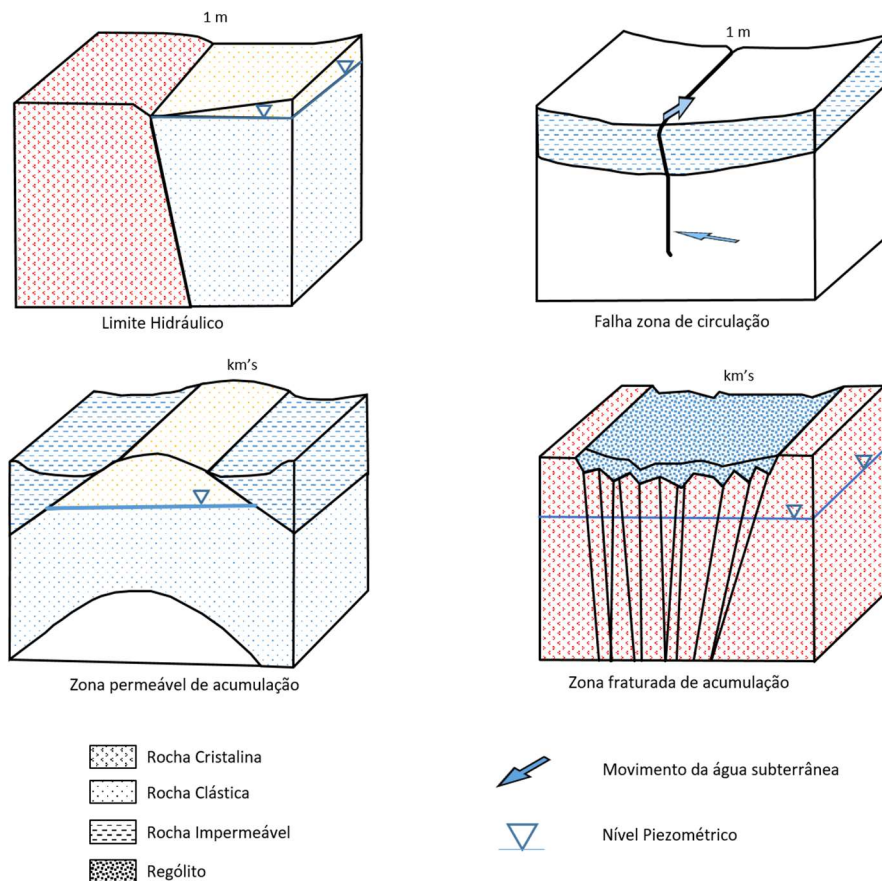


Figura 3.6 - Interpretação hidrogeológica dos lineamentos (adaptado de Waters *et al.*, 1990)

3.2.2 Reconhecimento do terreno

Com o estudo hidrogeológico de gabinete é obtida muita informação, no entanto é sempre de grande utilidade realizar-se estudos de terreno de forma a ter contacto com a realidade geológica.

Os estudos de terreno permitem uma melhor compreensão da hidrogeologia da área através da observação de afloramentos, aspetos geomorfológicos e padrões de drenagem. A observação de possíveis ligações entre a água superficial e subterrânea bem como a identificação de poços e furos preexistentes é também um dos aspetos a ter em conta. Nesta fase deve-se sempre falar com o requerente e com a população local a fim de perceber possíveis problemas com caudais de água e com a quantidade e qualidade da mesma. No que diz respeito à qualidade, deve-se procurar potenciais fontes de contaminação que possam afetar a captação a realizar.

Caso se preveja a realização de ensaios geofísicos dever-se-á proceder à inventariação dos níveis de ruído que possam afetar estudos sísmicos de baixa profundidade ou cabos elétricos que poderão condicionar o uso de métodos eletromagnéticos. No caso da

presença de cabos elétricos é necessário prever se durante as manobras com as máquinas iram ser respeitadas as distâncias de segurança recomendadas a manter entre os condutores elétricos e qualquer componente da máquina.

Embora os sítios para se realizar os furos de exploração sejam selecionados previamente com base nos estudos hidrogeológicos, o reconhecimento de campo torna-se imprescindível para identificar possíveis problemas em realizar a captação no local definido. Os problemas descritos são nomeadamente canalizações enterradas no local, os acessos para a entrada dos equipamentos necessários à execução do furo e a má condição do terreno para a circulação de equipamentos pesados. Este parâmetro tem especial importância em caso de terrenos argilosos saturados onde pode ocorrer assentamentos diferenciais. Feito o reconhecimento do local, poderemos avançar para os trabalhos de prospeção. A prospeção deverá ser iniciada por trabalhos de geofísica, que nos permitem esclarecer algumas dúvidas levantadas pelos trabalhos de reconhecimento e nos irão fornecer dados complementares para uma eventual prospeção mecânica.

3.2.3 Prospeção Geofísica

A realização de uma campanha de prospeção geofísica pode fornecer informação sobre a geologia, a geometria do aquífero e sobre a qualidade da água. A realização destes estudos é executada por vezes sem o planeamento devido, mas sim na expectativa de que este apresente algum resultado útil. Esta abordagem raramente dá resultados positivos à pretensão. A melhor abordagem é identificar a natureza do problema físico a ser investigado, selecionar o método geofísico adequado e finalmente planear o programa de investigação.

Os principais métodos geofísicos usados na prospeção de águas subterrâneas encontram-se sumarizados na tabela 3.1.

Diferentes métodos proporcionam dados distintos sobre propriedades geofísicas do solo, desta forma a melhor prospeção é alcançada recorrendo a mais que um método. Os métodos elétricos e eletromagnéticos são os mais usados neste tipo de investigações sendo de seguida descritos de forma sucinta.

Os estudos geofísicos são suscetíveis a várias interpretações possíveis, levando deste modo a vários modelos geológicos. Desta forma, torna-se essencial correlacionar estes dados com furos preexistentes e com o conhecimento litológico da zona de modo a reduzir o número de modelos geológicos possíveis.

Tabela 3.1 - Métodos Geofísicos usados na prospeção de água subterrânea

Método Geofísico	Principal Aplicação
Sondagens elétricas Verticais	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Espessura dos depósitos superficiais ➤ Profundidade do nível freático ➤ Profundidade da zona de alteração em rochas cristalinas, água nas fraturas ➤ Detecção da interface da água salina/água doce em aquíferos costeiros ➤ Detecção de plumas de contaminação subterrânea.
Eletromagnético	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Aplicação similar ao método elétrico, mas usado frequentemente para profundidades superiores.
Sísmica de refração	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Espessura dos depósitos superficiais ➤ Profundidade do nível freático ➤ Profundidade da zona de alteração em rochas cristalinas ➤ Localização de zonas de fratura
Magnético	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Localização de diques ígneos ➤ Localização de zonas de fratura
Georadar	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Profundidade dos aquíferos porosos ➤ Profundidade da rocha mãe ➤ Localização da superfície freática ➤ Profundidade da zona de alteração em rochas cristalinas ➤ Localização de fraturas subhorizontais ou cavidades em aquíferos cársicos.
Gravimétrico	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Geometria e extensão dos aquíferos porosos, localização de cavidades em aquíferos cársicos (microgravimetria)

Confrontando os dados do reconhecimento com os obtidos na campanha de geofísica, estaremos em condições de poder projetar os eventuais trabalhos de prospeção mecânica, ou seja, de realização dos furos de pesquisa.

3.2.3.1 Sondagens Elétricas Verticais

Existem diversas técnicas geofísicas elétricas e eletromagnéticas que medem a resistividade dos materiais, e em alguns casos a condutividade. Algumas destas técnicas são mais modernas e precisas, mas as sondagens elétricas verticais continuam a ser as mais utilizadas devido à sua simplicidade e ao seu baixo custo de realização.

A resistividade elétrica do terreno depende essencialmente das propriedades do material geológico, do grau de saturação e da natureza do fluido. Solos secos e rochas cristalinas apresentam resistividade elétrica elevada, areias saturadas e aquíferos porosos têm baixa resistividade enquanto que os materiais argilosos ou formações contendo água salgada

têm uma resistividade muito baixa. O método da eletrorresistividade é deste modo essencial à investigação da geometria do aquífero e da sua qualidade.

As sondagens elétricas verticais são realizadas injetando uma corrente elétrica na superfície do solo e medindo a diferença de potencial entre dois elétrodos medidores. O valor da resistividade é multiplicado pelo fator geométrico relacionado com a configuração dos elétrodos para calcular a resistividade do subsolo. Existem várias configurações de elétrodos sendo os mais comuns as disposições Wegner e Schlumberger (Figura 3.7).



Figura 3.7 - Pormenor de uma linha de aquisição de resistividade elétrica

3.2.3.2 Métodos eletromagnéticos

Os métodos eletromagnéticos medem a condutividade do terreno, que é o inverso da resistividade, tendo deste modo uma aplicação similar aos métodos elétricos. A grande diferença entre os dois métodos de prospeção prende-se com o facto de os métodos eletromagnéticos não necessitarem de um bom contacto físico com o terreno, tornando-os mais rápidos de realizar e menos dispendiosos.

O método eletromagnético consiste em aplicar uma corrente alternada a um solenoide (solenoide transmissor), gerando um campo eletromagnético primário que é modificado à medida que atravessa o terreno. Se existir um bom condutor, tal como uma zona saturada, o campo primário vai produzir correntes parasitas que geram um segundo campo. Este campo secundário é detetado pela corrente alternada que induz no segundo solenoide (solenoide recetor). A diferença entre os campos eletromagnéticos recebidos e transmitidos produz informação sobre a natureza e geometria do condutor (Keary *et al.*, 2002)

3.2.4 Furo de pesquisa

O principal objetivo do furo de pesquisa é confirmar a interpretação resultante da análise conjunta dos estudos hidrogeológicos prévios, do reconhecimento de campo e da

geofísica. A definição da localização destes furos deve ser realizada com vista a fornecer dados sobre a possível existência de algum aquífero, sobre a sua espessura e a espessura dos materiais de cobertura. Estes furos de sondagem são realizados com um diâmetro reduzido em relação aos furos de exploração com vista a reduzir o custo da perfuração. Posteriormente, os mesmos podem ser alargados e utilizados como furos de exploração caso a pesquisa revele potencial.

A realização desta etapa é pouco usual. Tal afirmação deve-se ao facto de o preço por metro de furação de um furo com o diâmetro reduzido ser, sensivelmente idêntico ao da realização de um furo de exploração. Deste modo, este processo só é realizado em grandes obras públicas onde ocorrem grandes investimentos de capital e que justifiquem a realização deste tipo de furos.

3.2.5 Definição da localização do furo

Após concluídas todas as fases de pesquisa, a empresa deve elaborar um modelo hidrogeológico conceptual que melhor se adapta aos dados recolhidos. Os técnicos especializados devem também estabelecer o grau de confiança nas suas previsões. Se a área tem sido alvo de extensos estudos e já apresenta vários furos, não justifica a realização de furos de pesquisa nem de estudos geofísicos. Com as análises destes modelos os técnicos devem definir os vários locais possíveis, e indicar qual o que teoricamente apresenta maior viabilidade de execução. A definição dos vários locais, deve ser economicamente viável de forma a causar o menor impacto possível aos restantes usuários e aos ecossistemas aquáticos. Para além disto, deve também ter em conta a possível necessidade de realizar mais que uma captação. Caso essa necessidade se verifique deve ser feita uma avaliação económica. Quanto mais próximos estão os furos maior é a sua interferência mútua e o rebaixamento resultante, aumentando o custo de exploração. Deste modo, as distâncias entre furos devem ser otimizadas para permitirem um equilíbrio entre os custos de exploração e os custos da tubagem.

Por fim, elabora-se um relatório da pesquisa, indicando profundidades previstas, litologias e caudais expectáveis. Este documento será fundamental no dimensionamento da captação e conseqüentemente na elaboração do orçamento do furo.

Deve-se ter em mente que nenhum programa de pesquisa oferece garantia plena de sucesso, na implantação de uma captação. Todavia, é certo que contribui para reduzir o risco de insucesso, e por consequência, o risco do investimento.

Capítulo 4 – Dimensionamento de Captações

Neste capítulo é feita uma introdução inicial aos conceitos gerais relativos ao dimensionamento de furos de captação. Aspectos específicos, incluindo os materiais de construção, tipos de revestimento, tubos ralo e maciço filtrante são abordados em detalhe. Por fim, são descritas sucintamente as questões legais relativamente à execução deste tipo de construções hidráulicas.

4.1. Principais elementos de uma captação

Os principais constituintes de uma captação de água subterrânea apresentam-se ilustrados na figura 4.1.

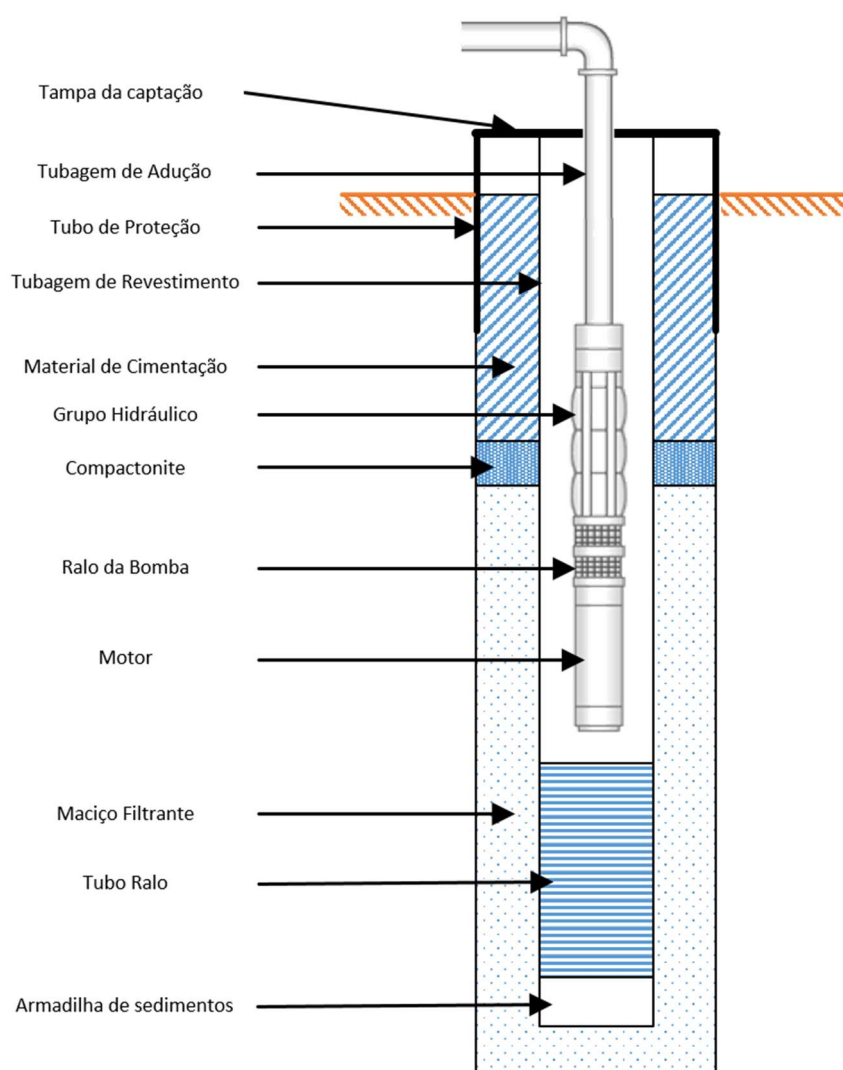


Figura 4.1 - Componentes de uma captação de água subterrânea.

No caso do tubo de revestimento, este previne o colapso das paredes de perfuração, protege o equipamento de bombagem e permite isolar os níveis cujo aproveitamento não interessa. O tubo ralo, permite o afluxo de água para a captação, sendo possível deste modo captar as formações mais interessantes.

Os centralizadores que são instalados, essencialmente na zona dos tubos ralos, permitem alinhar o eixo do tubo de revestimento com o eixo do furo, permitindo criar um espaço anelar regular para os materiais usados no preenchimento. Estes materiais podem ser isolantes ou filtrantes. Para o caso dos isolantes (material de cimentação, compactonite), temos materiais que, juntamente com o tubo de proteção, permitem isolar o tubo contra a intrusão de águas superficiais, que são indesejadas. A compactonite é o nome comercial para bentonite em *pellets*, uma argila de alta expansividade. Esta, ao entrar em contacto com a água, aumenta o seu volume e preenche poros e aberturas, permitindo um melhor isolamento. No caso do maciço filtrante este tem como principal objetivo a retenção das partículas que afluem à captação, permitindo em simultâneo a entrada de água. No que diz respeito à armadilha de sedimentos, esta consiste numa ponta de tubo de pouco comprimento instalado depois do último tubo ralo que funciona como uma armadilha para os sedimentos. De modo a providenciar estabilidade às formações superficiais durante a perfuração, bem como a proteção contra as águas superficiais após a mesma, é instalado um tubo de proteção de grande diâmetro, normalmente em ferro.

4.2. Princípios gerais do dimensionamento

O dimensionamento do furo deve ser realizado antes da execução da captação, uma vez que vai definir a escolha do tipo de construção e os elementos necessários para a execução do orçamento e licenciamento. Deste modo, o dimensionamento tem de se basear em informação existente, sendo que quanto mais compreensível for esta informação, melhor será o mesmo. O investimento numa pesquisa detalhada de águas subterrâneas (Capítulo 3) irá ter retorno numa captação de longa duração. A informação hidrogeológica necessária para a realização do dimensionamento de uma captação é resumida pelo esquema da figura 4.2.

Antes de se realizar o dimensionamento do furo de extração é necessário ter em conta uma consideração. A captação não deverá ter um impacto significativo nos furos vizinhos nem no meio ambiente, de modo a cumprir as obrigações legais que serão abordadas mais adiante.

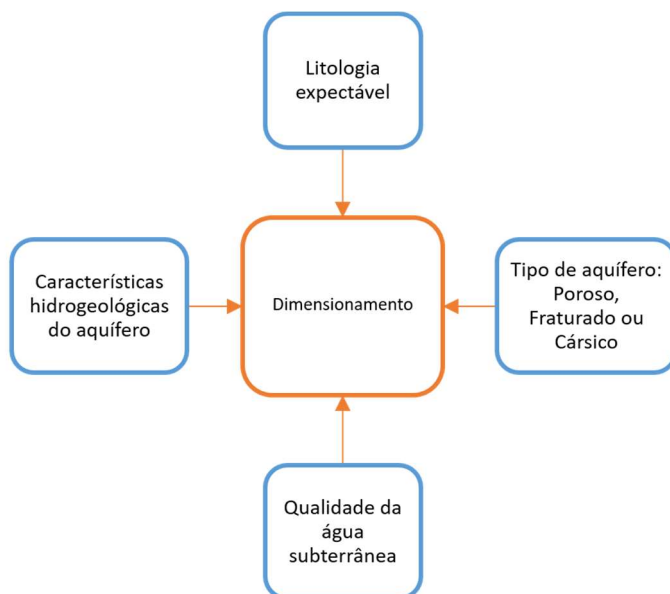


Figura 4.2 - Informação hidrogeológica necessária para o dimensionamento da captação.

Após isto, são de seguida apresentados os princípios básicos do dimensionamento de furos de extração de água subterrânea:

1. A localização do furo deve ser definida após a execução da fase de pesquisa descrita no Capítulo 3 do presente documento. Não tem sentido investir tempo e dinheiro a aplicar os princípios abaixo descritos se a definição do local não foi realizada cuidadosamente;
2. O furo deve ter diâmetro suficiente, profundidade e verticalidade para a instalação do grupo submersível;
3. O furo deve ser estruturalmente estável;
4. Deve impedir a entrada na captação de material do aquífero (areias ou argilas);
5. Os materiais de construção devem resistir a corrosão e incrustação, reduzindo desse modo a manutenção e a reabilitação, sem que isto afete adversamente a qualidade da água;
6. A captação deve ser protegida da contaminação vinda essencialmente da superfície, mas evitando também a contaminação entre aquíferos.
7. A profundidade, diâmetro e materiais de construção devem ser selecionados de forma a que o custo da captação seja razoável.

As principais condicionantes no dimensionamento de furos de exploração de águas subterrâneas são o caudal de exploração requerido e o tipo de aquífero a ser explorado. O caudal de exploração previsto deve ser decidido antes de se proceder ao dimensionamento, visto que o mesmo vai condicionar o diâmetro do grupo submersível e conseqüentemente os diâmetros de perfuração e do tubo de revestimento.

O caudal necessário para satisfazer as necessidades hídricas do cliente, pode ser estimado tendo em conta a finalidade da captação. No caso de furos para fins agrícolas, existem tabelas da Direção Geral de Agricultura e Desenvolvimento Rural que permitem calcular os volumes e caudais de água necessários para cada cultura, tendo em conta a região do país. No que diz respeito aos furos para abastecimento de habitações é usual adotar-se uma capitação de 100l/dia.hab.

Após estimado o caudal de exploração previsto, é possível, estimar o diâmetro da tubagem de revestimento. A tabela 4.1 ilustra os caudais possíveis de se captar, em furos equipados com tubagens de revestimento a diversos diâmetros, com bomba elétrica submersível.

Os valores referidos variam, como é evidente, em função das características do grupo submersível. Os diâmetros referidos têm em consideração a cablagem e um espaçamento suficiente entre o diâmetro interno da tubagem de revestimento e o exterior do grupo submersível para que ocorra refrigeração do mesmo.

Tabela 4.1 - Caudais possíveis de se captar tendo em conta o diâmetro do revestimento.

Diâmetro interior		Caudal	
Polegadas	milímetros	m ³ /h	l/s
5 1/2"	140	10	2.8
6 1/2"	160	20	5.6
7"	180	35	9.7
8"	200	60	16.8
10"	250	150	42

Conforme já se referiu na Secção 2.2.1, os aquíferos podem ser divididos quanto à sua litologia para os fins de dimensionamento em aquíferos fraturados, cárscicos e porosos. Desta forma apresentam-se as características das captações inseridas neste tipo de aquíferos.

4.2.1 Captações em aquíferos fraturados e cárscicos

Em litologias cristalinas a água subterrânea encontrara-se armazenada em porosidade secundária, que é criada por alteração e fracturação (Figura 4.3).

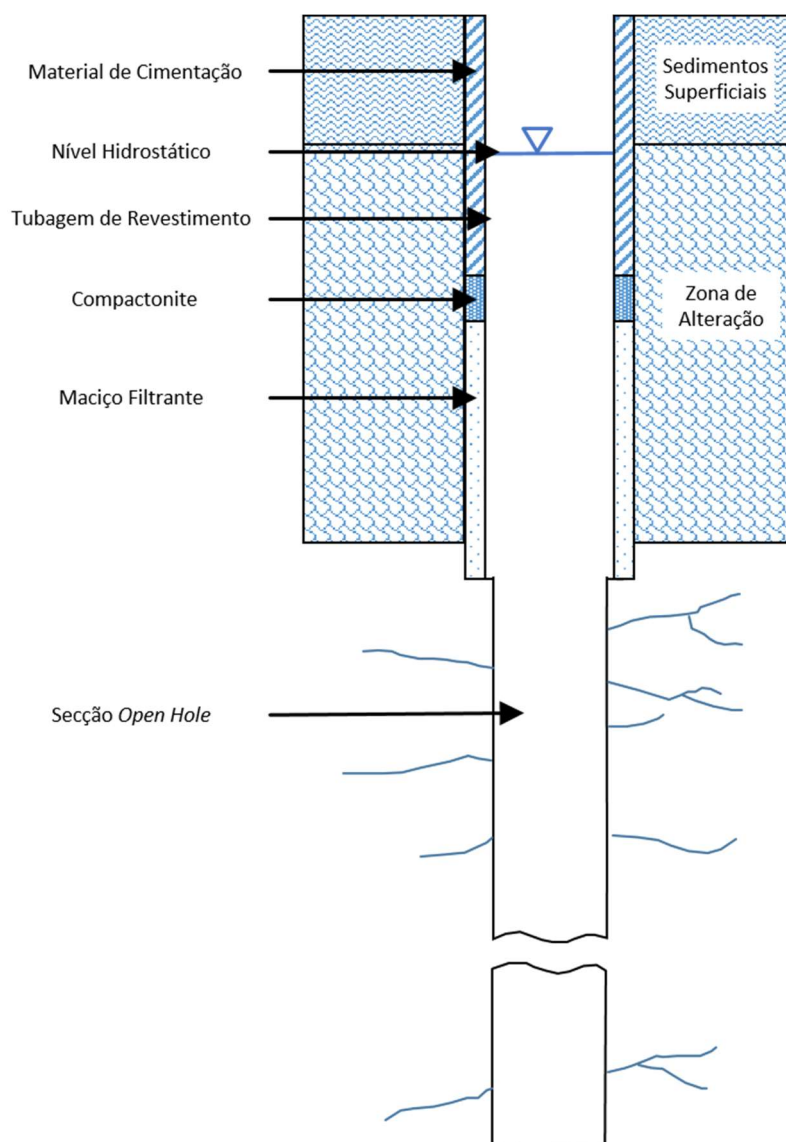


Figura 4.3 – Esquema ilustrativo de uma captação de água em aquíferos fraturados.

Ambas, a fracturação e a alteração, diminuem com a distância à superfície, existindo uma profundidade para a qual o custo da perfuração supera a probabilidade de aumentar significativamente o caudal da captação. Esta profundidade máxima vai variar de local para local dependendo da geologia da área onde vai ser localizada a captação. No entanto, a não ser que se encontre um aspeto estrutural importante, a profundidade máxima de perfuração raramente excede os 100 m, sendo usual considerar uma profundidade inferior. Em Portugal as perfurações neste tipo de aquíferos são abandonadas aos 80 m caso não se atinga o caudal pretendido. A profundidade ótima em qualquer local deve ser determinada com base em experiência prévia no local, ou através de métodos geofísicos, que podem indicar a profundidade da zona de alteração e fracturação (Secção 3.2.3).

O caudal neste tipo de aquíferos é baixo, com valores médios de entre $10\text{-}20\text{m}^3 \text{ dia}^{-1}$ e raramente excedendo $250 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1}$ (Gustafson, 2002). Deste modo não são necessários grandes diâmetros de perfuração. Furos com um diâmetro de tubagem de revestimento de 140 mm conseguem extrair na grande maioria das vezes o caudal máximo explorável da captação.

De forma a proteger o furo contra possíveis focos de contaminação existente à superfície, especialmente de origem biológica, a secção superficial da captação deve ser revestida e cimentada de forma a prevenir a entrada de água superficial. O restante segmento do furo desde que haja estabilidade das paredes da perfuração, pode ficar sem revestimento designando-se "*open hole*". O revestimento nestes furos deve atingir a rocha pouco alterada e, preferencialmente, até abaixo da zona de colocação do grupo submersível de forma a evitar o posicionamento do mesmo na secção *open hole*. Na construção de captações neste tipo de aquíferos é necessário ter em conta que ao selar as camadas mais superficiais (zona de alteração) podemos estar a selar também camadas bastante produtivas, no entanto vulneráveis à poluição. Deste modo, ao dimensionar a captação deve-se fazer um balanço entre a qualidade e a quantidade de água.

Relativamente aos aquíferos cársicos, o dimensionamento é bastante similar ao dos aquíferos fissurados. Nestes a água flui por intermédio de fraturas, que vai dissolvendo os minerais carbonatados. Este processo de carsificação pode produzir grandes condutas com fluxos de água subterrânea que podem atingir velocidades de várias centenas de metros por hora. A construção de captações neste tipo de aquíferos pode ser problemática. Não só é difícil prever as localizações das fraturas principais antes da perfuração, mas se grandes cavidades forem encontradas (algares ou cavernas) então a perfuração e a amostragem vão sofrer problemas de perda de circulação. Mesmo que a captação seja concluída com sucesso, ela pode ser vulnerável a uma rápida infiltração de poluentes provenientes da superfície.

Outro fator que deve ser considerado, essencialmente nos aquíferos cársicos, é o facto de ocorrer durante o fluxo de água alteração de material nas fraturas, sendo o material resultante transportado. Estes sedimentos ao afluírem à captação podem danificar o equipamento de bombagem. Deste modo, as captações neste tipo de aquíferos devem ser dimensionadas de forma a incorporar tubo ralo e maciço filtrante como se o aquífero fosse não consolidado.

4.2.2 Captações em aquíferos porosos

As captações em sistemas aquíferos porosos (Figura 4.4) são normalmente realizadas com um revestimento total do tubo, colocando tubo ralo nas zonas com potencial.

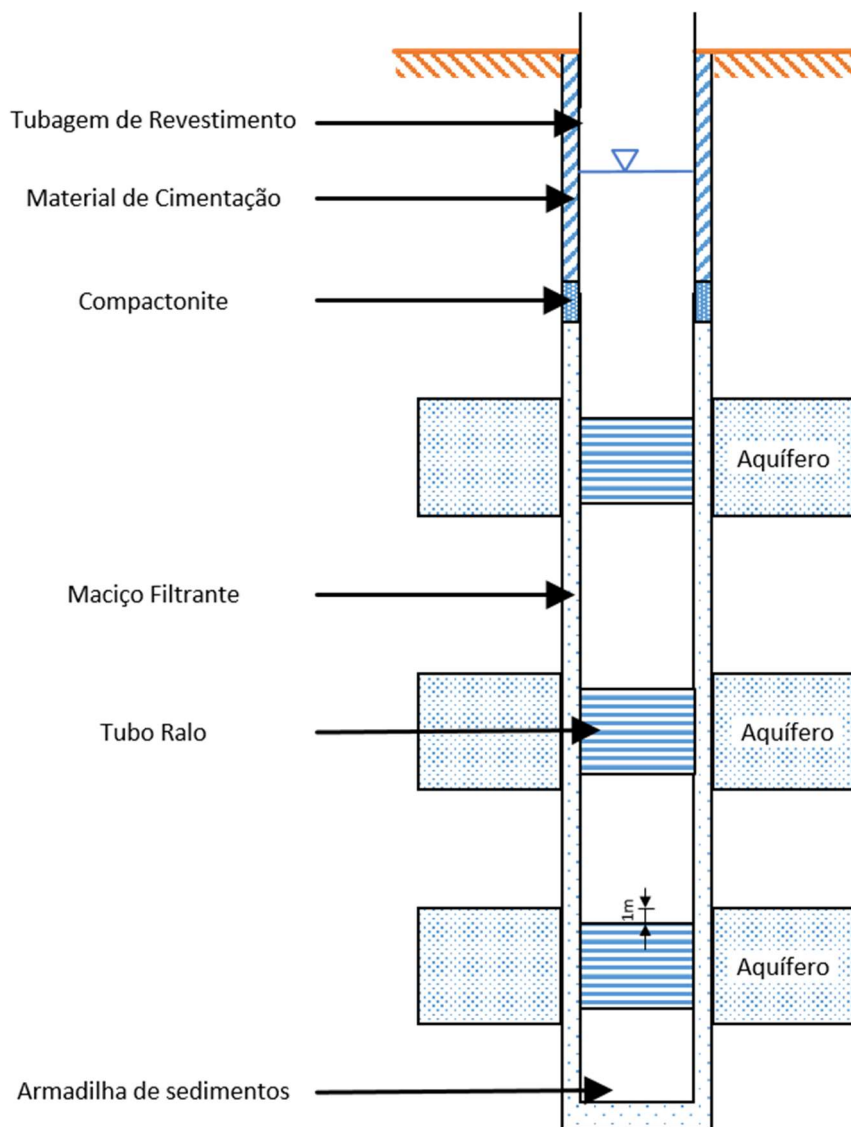


Figura 4.4 - Captações de água em aquíferos porosos

Na teoria, se os aquíferos estão realmente consolidados então, o dimensionamento do tubo ralo não é muito importante. No entanto, na prática, para reduzir o risco de entrada de partículas de areia na captação, os ralos devem ser dimensionados assumindo que o material do aquífero não se encontra consolidado. Deve-se ter em conta que os ralos devem ser dimensionados de forma a terminarem, pelo menos, um metro antes do topo e da base de cada aquífero para evitar invasão de material do aquífero. O dimensionamento do tubo ralo neste tipo de aquíferos é essencial e, em alguns casos, deve-se realizar diagrfias para determinar a posição exata dos ralos (Secção 5.4). O

espaço anelar à volta do revestimento deve ser preenchido por um maciço filtrante de forma a estabilizar as paredes do furo e proporcionar um efeito adicional de filtragem. É de salientar a necessidade de colocar uma camada de bentonite de alta expansividade (compactonite) no espaço anelar de forma a realizar um isolamento extra face às águas superficiais ou para isolamento entre aquíferos.

As captações nestes aquíferos são usualmente muito produtivas visto que em algumas situações os aquíferos encontram-se conectados hidraulicamente com rios que os abastecem permanentemente. Deste modo é usual, contrariamente aos aquíferos fissurados, instalarem-se tubagens de revestimento de elevado diâmetro.

4.2.3 Considerações económicas sobre o dimensionamento

A questão económica no dimensionamento depende, na maioria das situações, de diretrizes de senso comum, de forma a evitar o sobredimensionamento. Algumas dessas diretrizes simples incluem:

1. Não furar mais que o necessário
2. Não furar um diâmetro superior ao necessário
 - a. Não dimensionar um maciço filtrante mais espesso que o necessário
 - b. Não dimensionar um revestimento de um diâmetro superior ao necessário
3. Não usar materiais dispendiosos onde os baratos têm o mesmo efeito
4. Não usar mais tubo ralo que o necessário

Em aquíferos fraturados efetuar dois furos de pouca profundidade, tem mais sentido economicamente, que um furo profundo, visto que as probabilidades de encontrar água são superiores.

As necessidades hídricas para uma habitação particular raramente excedem 1m dia^{-1} , desta forma normalmente não é necessário dimensionar um furo de grande capacidade para tal casa. O tubo de revestimento normalmente aplicado em tal situação apresenta o diâmetro de 140 mm. A aplicação de tubos de revestimento com diâmetro superior a 200 mm seria injustificável.

4.3. Dimensionamento dos materiais de construção

4.3.1 Tubagem de Revestimento

Para o revestimento do furo de captação de água subterrânea existem diferentes tipos de materiais, destacando-se entre os mais utilizados, o PVC-U (policloreto de vinilo não plastificado), o aço norma DIN 2458 e o aço inoxidável.

O aço foi o material tradicionalmente usado na construção de captações de água principalmente pela sua robustez. Mesmo que um material alternativo, como o PVC-U seja aplicado na coluna principal, o aço é quase sempre escolhido como tubo de proteção devido à sua resistência mecânica. O revestimento é vulgarmente produzido em folhas de aço que posteriormente são enroladas e soldadas (Tubo com costura). No entanto, é possível produzir tubos sem costura que são fabricados sob a forma cilíndrica e aplicados também nas captações de água.

Os tubos de PVC-U são os mais utilizados na construção de captações de água subterrânea, sendo constituídos, em peso, por 57% de cloro (derivado do cloreto de sódio) e 43% de eteno (derivado do petróleo).

Os tubos em aço inox AISI 304/316 definem-se por serem tubos em aço inoxidável austenítico, ou seja, têm na sua composição cromo e níquel em concentrações superiores a 7%, que lhes confere resistência particular à corrosão.

Algumas das principais vantagens e desvantagens dos materiais vulgarmente utilizados são apresentados na tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Vantagens e desvantagens dos materiais vulgarmente utilizados no revestimento de uma captação.

Material	Vantagens	Desvantagens
Aço Carbono	Forte, rígido e pouco dispendioso	Passível de ser corroído libertando constituintes metálicos
Aço Inox	Forte, Resistente à corrosão e boa inércia química	Muito dispendioso.
PVC-U	Rígido, leve, pouco dispendioso e boa inércia química	Não é tão forte como o aço; Sensível à temperatura; Não recomendado onde ocorrem líquidos não aquosos

O aço inox (tipo 306 e 316) é bastante apropriado para todas as aplicações, no entanto, deve ser feita uma análise bastante rigorosa quanto à sua necessidade por apresentar um custo bastante elevado. O PVC-U apresenta um bom equilíbrio entre o manuseamento, o desempenho e o custo. No entanto este material não deve ser aplicado em captações de águas termais ou onde fluidos não aquosos estejam presentes.

No caso das captações se destinarem ao consumo humano ou a tratamentos termais, é importante que os materiais usados não libertem químicos para a água em quantidades capazes de afetar adversamente a qualidade da água.

Deste modo, a escolha destes materiais depende de vários fatores, incluído a sua resistência mecânica, durabilidade, inércia química e facilidade de manuseamento. A importância relativa destes fatores irá ser diferente de acordo com o propósito da captação a ser dimensionada. Um furo construído para efetuar o rebaixamento hidráulico, não necessita da mesma qualidade e durabilidade que um furo permanente de abastecimento. No entanto, um furo para captação de águas termais, por exemplo, necessitará de materiais mais resistentes e que possuam uma interferência mínima na qualidade da água.

4.3.1.1 Resistência mecânica

Os vários tipos de resistência mecânica que se devem considerar na secção da tubagem de revestimento são a tração uniaxial, compressiva uniaxial e a compressiva radial (Figura 4.5).

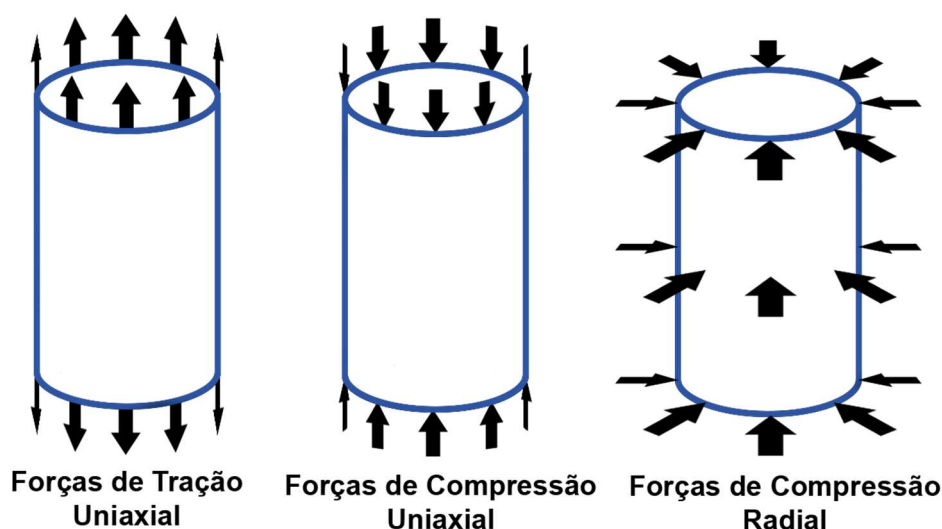


Figura 4.5 - Tensões aplicadas na tubagem

A resistência radial às forças de compressão, é provavelmente o parâmetro mais importante. Tal afirmação deve-se ao facto de este parâmetro controlar a profundidade máxima a que a tubagem pode ser instalada sem que ocorra o seu colapso ou rotura. Deste modo, a tubagem de revestimento deverá apresentar uma resistência mecânica que permita suportar, sem deformação significativa, a pressão exercida pelas formações geológicas circundantes e a pressão resultante da diferença hidráulica entre o interior e o exterior da tubagem.

No que diz respeito à pressão hidráulica esta é de aproximadamente 10kPa por cada metro de tubagem abaixo do nível freático, assumindo o cenário em que o furo está completamente vazio enquanto a água no exterior permanece ao nível estático. A este

valor devem ser adicionadas as pressões adicionais terrestres, nomeadamente se a captação atravessar argilas de alta expansividade.

A resistência à tração uniaxial é requerida para suportar o peso total do revestimento durante a instalação. Esforços adicionais podem ocorrer caso seja necessário remover o revestimento durante a instalação. Esta situação pode ocorrer quando a determinada profundidade, o furo colapsa antes de ter sido totalmente entubado, sendo assim necessário remover toda a tubagem, voltar a perfurar, e reinstalar a tubagem.

Por fim, a tubagem de revestimento deve apresentar uma resistência à compressão uniaxial tal que permita suportar o peso da própria tubagem.

4.3.1.2 Durabilidade

Para a maioria das captações de água é necessário selecionar materiais que resistam à corrosão. A corrosão eletroquímica envolve perda de metal na solução como resultado de fluxo de correntes entre áreas com diferente potencial da captação. Microrganismos que operam sob condições anaeróbias contribuem também para o processo de corrosão.

Este processo leva a:

- Alargamento dos ralos nos tubos e conseqüente entrada de areia que danifica o grupo de bombagem e o próprio revestimento;
- Incrustações resultantes do processo de corrosão que colmatam os ralos impedindo a entrada de água e conseqüentemente reduzindo o caudal de exploração;
- Roturas na tubagem e nas uniões, levando à potencial entrada de água poluída na captação;
- Redução da resistência estrutural da tubagem devido à progressiva remoção de material, levando eventualmente ao colapso da captação.

4.3.2 Tipos de uniões

Os tipos de uniões são importantes quando se seleciona o tipo de material de construção porque afeta tanto a resistência do material como a facilidade com que este é instalado ou removido. As uniões são normalmente a componente mais débil do revestimento, ainda assim devem ser fortes o suficiente para suportar o peso total da coluna de revestimento. As uniões devem garantir o alinhamento da tubagem, impedir infiltrações de água e apresentar bastante durabilidade. As uniões entre os diferentes troços de tubagem podem ser roscadas, rebitadas ou soldadas (Figura 4.6).

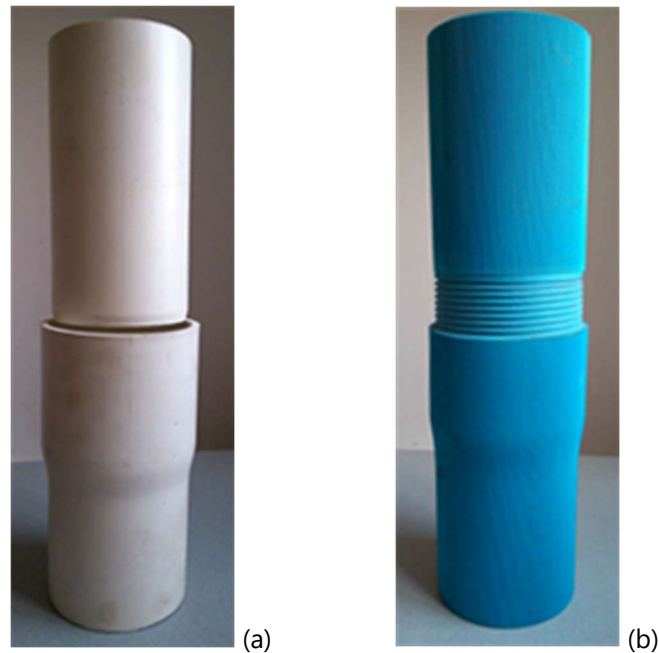


Figura 4.6 - Tipos de uniões em tubagens de PVC-U. (a) união de encaixe; (b) união roscada

4.3.3. Tubo de proteção

Alguns furos requerem, por razões construtivas e ocasionalmente protetivas, a instalação de tubo de proteção ou de serviço. A profundidade de aplicação deste tipo de tubagem varia entre os 6 e os 15 metros, no entanto pode ser requerido que atinja uma profundidade maior para atingir um estrato impermeável. Usualmente, estes tubos apresentam um diâmetro 6" superior ao da tubagem de revestimento. Os tubos de proteção impedem a infiltração direta de águas superficiais contaminadas para o interior da captação e estabilizam durante a perfuração as formações mais superficiais, que são usualmente não consolidadas.

4.3.4. Tubo Ralo

Na coluna de revestimento, há ainda que definir o tubo ralo (Figura 4.7). Estes correspondem a tubos com aberturas, *slots*, rasgos, ranhuras ou fendas existentes na parede do tubo.

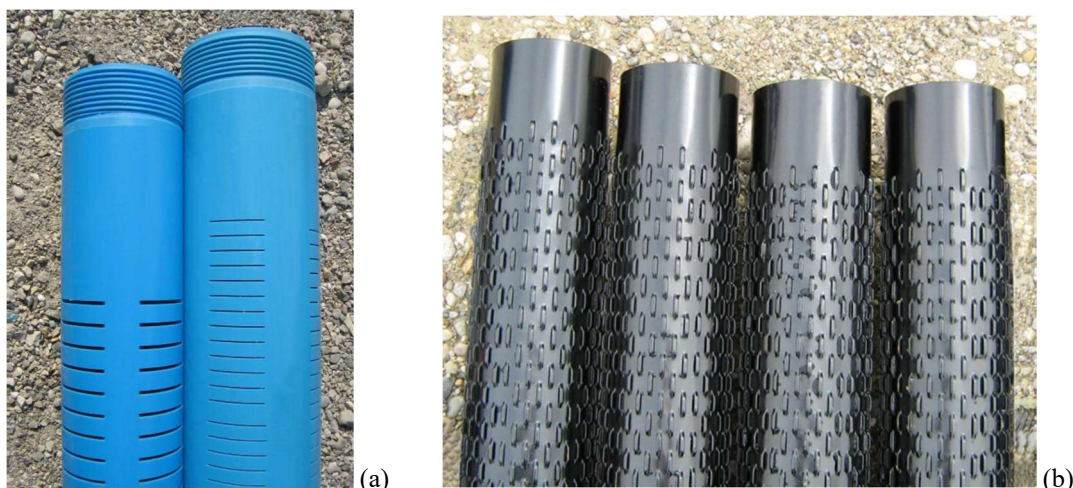


Figura 4.7 - Tipos de ralos: (a) ralos em PVC-u; (b) Ralos com estrutura em ponte (Aço Inox)

A finalidade dos ralos é permitir eficientemente o afluxo de água para o interior da captação, e prevenir, juntamente com o maciço filtrante (secção 4.2.4), a entrada de areias e outros materiais finos.

A escolha do tipo de ralo para a captação vai depender de uma combinação de fatores: (a) a resistência física e química, (b) a abertura dos ralos e (c) o custo. O primeiro fator é em função dos materiais usados para construção dos ralos, nomeadamente, aço carbono, inox e PVC-U.

Deve ser dada uma atenção particular ao tubo ralo, pois o rendimento da captação depende de uma correta seleção do seu tipo e posicionamento. Além das características que são comuns aos tubos cegos ou não abertos (em termos de composição, diâmetro e espessura da tubagem), há ainda outras, a ter em conta, tais como a área aberta total, o tamanho e o tipo das ranhuras.

4.3.4.1. Tipos de ralos e área aberta total

Os tipos de perfurações nos tubos ralos (*slots*) apresentam uma grande variedade de formas e métodos de produção. No entanto, neste trabalho irão só ser apresentados os mais utilizados em Portugal.

Os ralos realizados por máquina de serrar são vulgarmente utilizados em revestimentos de PVC-U (Figura 4.7a), apresentando tipicamente uma área aberta entre 7% e 12%, embora áreas de 15% possam ser alcançadas. Para se atingir estas percentagens os cortes costumam ter entre 0,6 mm e 3 mm.

O tipo de ralos mais utilizado em tubagens de aço, seja ele carbono ou inox, são os que apresentam estrutura em ponte (Figura 4.7b). Este tipo de ralo é fabricado numa prensa, que por pressão cria os ralos. As chapas com os ralos são posteriormente enroladas em

cilindros e soldadas. Este tipo de ralos apresenta uma grande área aberta superior a 13%, e um custo relativamente baixo. Uma importante desvantagem deste tipo de ralos é a perda de resistência à compressão radial devido ao elevado número de ralos orientados verticalmente. O processo de fabrico é limitado no que diz respeito à espessura da parede, sendo 6mm, normalmente o máximo disponível.

A abertura dos ralos deve ser selecionada tendo em conta a granulometria do maciço filtrante (secção 4.2.4).

4.3.4. Maciço filtrante

Entre a tubagem de revestimento e as paredes do furo deve ser colocado um maciço filtrante, dimensionado de forma a cumprir as seguintes funções:

- Evitar a passagem para dentro do furo de areias finas e de argilas que podem colmatá-lo e provocar avarias na bomba, por vezes irremediáveis, durante a fase de exploração da captação;
- Envolver a coluna de revestimento, protegendo-a e conferindo-lhe resistência;
- Proporcionar um bom suporte ao material isolante que reveste o furo em determinadas profundidades e serve de proteção contra contaminações superficiais ou de outros níveis aquíferos cuja exploração não é conveniente.

A espessura deste maciço deverá ser entre 3 a 6 polegadas, não sendo recomendada a utilização de espessuras superiores ou inferiores a este intervalo, pois maciços filtrantes mal dimensionados podem não filtrar corretamente os materiais finos.

Quanto à composição dos materiais a aplicar, quando a granulometria dos terrenos atravessados nos níveis aquíferos é grosseira e extensa, podem ser utilizados os materiais da formação provenientes desses níveis, sendo o arraste das frações mais finas feita na fase de desenvolvimento, constituindo assim um maciço natural. A aferição da aptidão dos materiais provenientes desses níveis para a utilização na construção do maciço filtrante é feita com recurso a um ensaio granulométrico e a consequente análise das curvas obtidas.

Se os detritos dos níveis aquíferos do furo não cumprirem os requisitos anteriores, opta-se pela instalação de um maciço filtrante artificial. Este maciço deve ser construído por seixo de natureza siliciosa, devidamente lavado, calibrado e com esfericidade e arredondamento elevados.

O volume de seixo a aplicar deverá ser sempre igual ou superior à diferença entre o volume cilíndrico correspondente à perfuração e o volume cilíndrico da coluna de revestimento no troço definido para o maciço filtrante. Em algumas situações é natural

que o volume teórico assim calculado seja ultrapassado pelo volume efetivo de areão necessário, o que significa, dadas as características das formações geológicas atravessadas, que o diâmetro nominal da perfuração desenvolveu lateralmente mais espaço ou que existem zonas ou níveis de perda (e.g. cavidades). Já quando o volume de areão colocado é inferior àquele volume teórico, significa que pode ter havido algum colapso das paredes de perfuração ou qualquer outro fenómeno, como a expansão de alguns dos materiais litológicos atravessados (e.g. argilas expansivas). Em resumo, o tamanho dos elementos do maciço filtrante e a sua gradação são seleccionados de forma a conseguir a estabilização das formações aquíferas e a permitir que durante as operações de desenvolvimento da captação (ponto 6.6.5) somente a fração fina (siltes e areias finas) seja arrastada para o interior da captação e depois removida, por exemplo, através da injeção de ar comprimido no fundo do furo. A figura 4.8, ilustra uma carta para a seleção do maciço filtrante e da abertura dos ralos, tendo em conta a análise da amostragem.

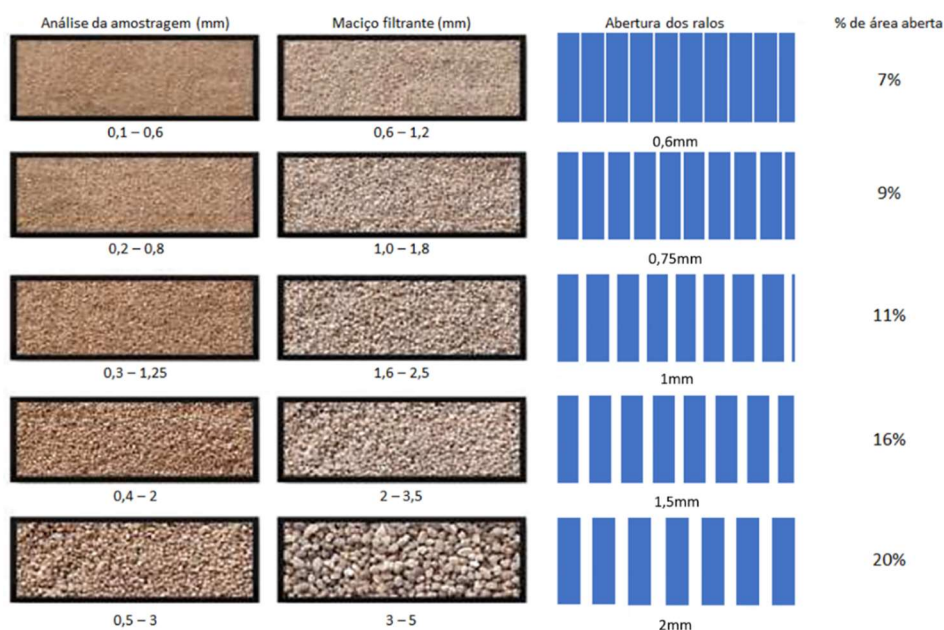


Figura 4.8 - Esquema para seleção da abertura dos tubos ralos e do maciço filtrante.

Importa ainda salientar a existência, no comércio especializado, de areão separado por classes granulométricas pré-definidas, adequadas às diferentes granulometrias dos aquíferos.

4.3.5. Isolamento para proteção dos aquíferos

O isolamento do troço superior do furo, entre o terreno e o revestimento é obrigatório por lei. Esta operação destina-se a evitar a contaminação dos aquíferos atravessados pelo furo por substâncias poluentes (fertilizantes, produtos fitofarmacêuticos, efluentes humanos ou animais, etc.) que se encontram frequentemente no solo e que tendem a penetrar nos furos desprotegidos a partir da superfície. A construção do isolamento do troço superior do furo entre o terreno e a coluna definitiva pode conseguir-se do seguinte modo:

- Preenchendo o espaço anelar (espaço entre a tubagem de revestimento do furo e as paredes de perfuração) com material argiloso entre o topo do maciço filtrante e a cota inferior da selagem superficial com material isolante. Em alternativa ao material argiloso, podem ser usadas outras substâncias isolantes próprias, à base de argilas expansivas (compactonite), existentes no mercado (Figura 4.9);
- A selagem superficial com calda de cimento deve sempre ser feita desde a superfície do terreno até uma certa profundidade, no mínimo igual à indicada no processo de licenciamento;
- Em geral, a selagem de um furo deve estender-se até à profundidade de uma formação compacta ou impermeável.



Figura 4.9 - Compactonite, bentonite de alta expansividade em pellets.

4.4. Relatório de Pesquisa e Orçamento

Após o dimensionamento a empresa deverá elaborar um relatório de projeto de pesquisa onde deverá ser feita referência ao método de furação, à profundidade a atingir, aos tipos e diâmetros das tubagens de revestimento e ao caudal que se espera extrair, permitindo assim ao dono da obra uma avaliação do custo benefício. Deve-se ter em conta que no decurso da perfuração poderá ser necessário proceder a alterações ao projeto pré-definido, de modo a adapta-lo às realidades hidrogeológicas que vão sendo reveladas à medida que se prossegue em profundidade, as quais poderão, ou não, corroborar o modelo interpretativo inicial.

Após estes dados e com a obra adjudicada, procede-se ao pedido de licenciamento de pesquisa da captação.

4.5. Licenciamento da Captação

A execução e exploração de captações destinadas a aproveitamento de águas subterrâneas do domínio privado (sejam águas de nascente ou destinadas a abastecimento público, agrícola ou industrial) carecem de autorização prévia ou título de utilização, que se encontra previsto no nº 1 do artigo 62º da Lei nº 58/2005, de 29 de dezembro, desde que os meios de extração da água sejam superiores a 5 cavalos-vapor. Quando os meios de extração não excedam os 5 cavalos-vapor, salvo se a referida captação vier a ser caracterizada pela autoridade competente para o licenciamento como tendo um impacte significativo no estado das águas, a captação de águas particulares exige a simples comunicação do utilizador à entidade competente para a fiscalização de utilização de recursos hídricos. A nível de Portugal Continental, a entidade responsável pelo licenciamento dos recursos hídricos é a Agência Portuguesa do Ambiente, através dos Departamentos de Administração de Região Hidrográfica territorialmente competentes (artigo 8.º da Lei n.º 58/2005, de 29 de dezembro, alterado pelo Decreto-lei n.º 130/2012, de 22 de junho)

As notificações e os pedidos de licença são apresentados pelos interessados à Agência Portuguesa do Ambiente através de correspondência, ou através da plataforma de Sistema Integrado de Licenciamento do Ambiente (SILiAmb).

Segundo o Art.º 23.º do Decreto-Lei n.º 46/94, de 22 de fevereiro, a pesquisa e captação de águas subterrâneas estão sujeitas a obtenção de licença, respeitando o licenciamento a duas fases: Pesquisa e Exploração.

A pesquisa e captação de águas subterrâneas, que consiste no conjunto de operações de sondagem ou escavações executadas com a finalidade de determinar a existência de águas subterrâneas, bem como o conjunto de obras e procedimentos técnicos tendentes a possibilitar a sua exploração. A empresa que executa a pesquisa deve estar devidamente licenciada de acordo com os termos descritos na seção 4.5.1 do presente documento.

A exploração de águas subterrâneas, traduz-se na faculdade de proceder ao aproveitamento de águas subterrâneas de acordo com as condições fixadas na respetiva licença.

4.5.1 Empresas executantes de furos de captação de água

Relativamente ao regime de licenciamento das empresas que realizem furos de prospeção, pesquisa e captação de água subterrânea encontra-se definido no Decreto-Lei nº 133/2005 de 17 de agosto, alterado pelo Decreto-Lei nº 84/2011 de 20 de junho. Para exercerem a sua atividade estas empresas, de acordo com os referidos Decretos-lei, estão sujeitas à obtenção de uma licença para efeitos de proteção do ambiente e preservação dos recursos hídricos subterrâneos.

No sentido de promover um incremento da qualificação técnica, a mesma legislação obriga as empresas licenciadas a possuírem um técnico com habilitações académicas adequadas ao exercício das suas funções, entenda-se com uma formação numa área técnico-científica tal como Engenharia Geológica, Geologia, Engenharia de Minas ou Engenharia dos Recursos Hídricos, com conhecimentos de Hidrogeologia.

Capítulo 5 – Execução de Furos de Captação

A execução de furos de captação inclui normalmente a perfuração, a instalação do revestimento, a colocação do maciço filtrante e isolante e a limpeza e desenvolvimento da captação. A realização destes é sempre de elevada dificuldade visto que as obras se desenrolam sempre fora da vista dos intervenientes, o que torna difícil avaliar o que acontece no decorrer dos trabalhos.

5.1. Métodos de perfuração

Os métodos de perfuração utilizados na construção de captações de água subterrânea evoluíram desde a utilização de ferramentas manuais simples até à atualidade, onde se utilizam equipamentos sofisticados. Atualmente, os principais métodos utilizados neste tipo de obras, que se caracterizam por serem todos destrutivos, ou seja, implicam a destruição das formações atravessadas, são essencialmente dois:

- Método de perfuração rotopercussivo;
- Método de perfuração rotativo
 - Circulação Direta
 - Circulação Inversa

Apesar de muito difundido na literatura o método percussivo encontra-se atualmente em desuso devido ao facto de apresentar baixo rendimento quando comparado com os métodos acima mencionados. O método consiste no impacto sucessivo de um trépano que, por esmagamento, vai fraturando as formações geológicas. Os detritos originados são posteriormente removidos por intermédio de uma limpadeira. Este método apresenta bons resultados para aluviões grosseiros.

5.1.1 Sistema de perfuração rotopercussivo

O método de perfuração rotopercussivo, também designado por percussão pneumática com martelo de fundo de furo, consiste na combinação de um movimento de rotação transmitida pelas varas de sondagem com um movimento de percussão de alta frequência e de pequeno curso transmitido por um martelo. O martelo possui um pistão no interior que é acionado pelo ar comprimido produzido a partir de um compressor, batendo no final do seu curso sobre o bit. Por sua vez, o bit (Figura 5.1), constituído por um corpo de uma liga de aço dotado de “botões” de carboneto de tungsténio, vai fragmentando a rocha

através de sucessivos impactos, sendo novos pontos de rocha são expostos à medida que o bit roda.

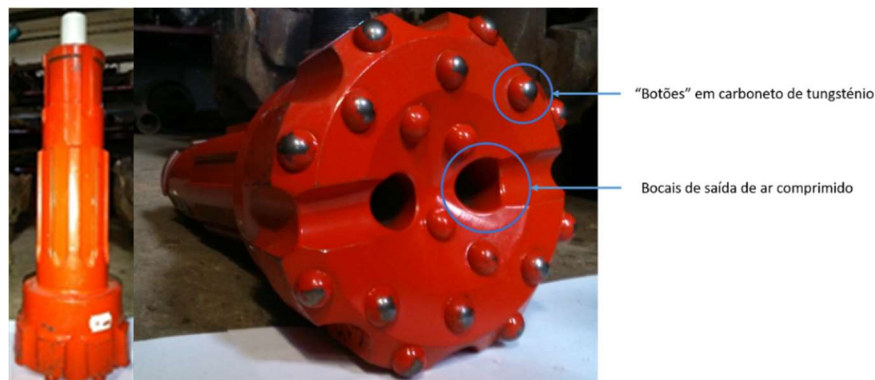


Figura 5.1 - Exemplo de um bit de utilizado no método rotopercussivo.

Após acionar o pistão, o ar comprimido injetado é expelido através de orifícios no próprio bit, retornando à superfície pelo espaço anelar com os *cuttings* resultantes da perfuração. A remoção contínua dos *cuttings* permite uma exposição permanente da rocha ao bit, reduzindo a energia necessária para desgastar os *cuttings*, resultando numa perfuração mais rápida.

Um efeito especial de limpeza poder ser alcançado ao colocar o martelo em posição de retirada (Figura 5.2), impedido o contacto com o fundo do furo e ficando o bit inoperante. Isto permite que o ar flua livremente expelindo os *cuttings* mais grosseiros ou aliviando a coluna de água. Como complemento à utilização de ar comprimido podem ser adicionadas “espumas” visando melhorar capacidade de transporte dos detritos e a eliminação de poeiras, de modo a melhorar a limpeza do furo.



Figura 5.2 - Martelo em posição inoperante

Este método aplica-se essencialmente a rochas cristalinas e competentes, como por exemplo granitos, basaltos e calcários, apresentando taxas de perfuração muito superiores ao método de rotação com tricône para a mesma litologia.

As principais restrições na utilização deste método são litologias sedimentares detríticas, visto que absorvem o impacto de percussão do bit, podendo atolar o mesmo. Para além disso, debaixo de água, o ar tem de vencer a pressão hidrostática antes de acionar o martelo, deste modo a profundidade de penetração abaixo do nível freático é limitada. Porém, em rochas cristalinas, as taxas de afluxo de água são normalmente baixas, havendo baixa probabilidade de o furo encher de água durante a perfuração.

5.1.1.1 Testes indicativos do caudal durante a perfuração rotopercussiva

Com a utilização do método rotopercussivo por martelo de fundo de furo é possível ter uma ideia do caudal durante a perfuração, visto que qualquer água encontrada será expulsa para fora do furo juntamente com os *cuttings*. Algumas fraturas podem conter água, ainda que não estejam interconectadas. Deste modo é expelida alguma quantidade de água que diminui ao longo da perfuração. Quando se trata de uma boa rede de fraturas conectadas entre si, um caudal contínuo de água e sedimentos é expelido. Este caudal pode ser medido com um balde e um cronómetro, registando o tempo que o balde demora a encher. Além disso, quando a perfuração é interrompida (ex. pausa para o almoço, ou noturna Δt), o sondador mede o nível da água inicial (h_1) no final da perfuração, e o nível da água (h_2) no final da pausa. O caudal aproximado (Q) pode ser estimado a partir da equação 5.1, onde r_w é o raio do poço, de acordo com a seguinte expressão:

$$Q = \frac{\pi(h_2 - h_1)r_w^2}{\Delta t} \quad (\text{Eq. 5.1})$$

Este cálculo apresenta bons resultados para espaços de tempo relativamente curtos (Δt), à medida que a taxa de afluxo de água diminui aproximando-se do nível estático. Este é um cálculo empírico que permite ter uma ideia do caudal possível de ser extraído. Para maior rigor deverá ser realizado um ensaio de caudal.

5.1.2 Sistema de perfuração rotativo

A perfuração rotativa também, designada por *rotary* na terminologia inglesa, consiste em desgastar e triturar as formações litológicas por intermédio de um efeito combinado de peso e rotação sobre o *bit*. O peso aplicado sobre o *bit* é resultante da própria coluna de perfuração e da força descendente aplicada pela máquina de perfuração. A rotação é transmitida para o *bit* através da rotação da própria coluna de perfuração utilizando uma cabeça rotativa.

Em complemento à rotação e ao peso aplicado no *bit*, estes métodos utilizam fluidos de perfuração. Estes fluidos para além de sustentarem as paredes de perfuração durante a execução do furo, permitem também alcançar profundidades superiores às atingidas pelo método rotopercussivo. O fluido normalmente é constituído à base de lama bentonítica ou simplesmente água, dependendo das propriedades requeridas para estabilizar o furo e trazer os *cuttings* para a superfície. A principal diferença entre os sistemas de perfuração à rotação reside no circuito efetuado por estes fluidos.

5.1.2.1 Sistema de perfuração rotativo com circulação direta

A configuração típica de um sistema de perfuração rotativo com circulação direta de fluidos de sondagem, nomeadamente lamas bentoníticas, é ilustrada na figura 5.3.

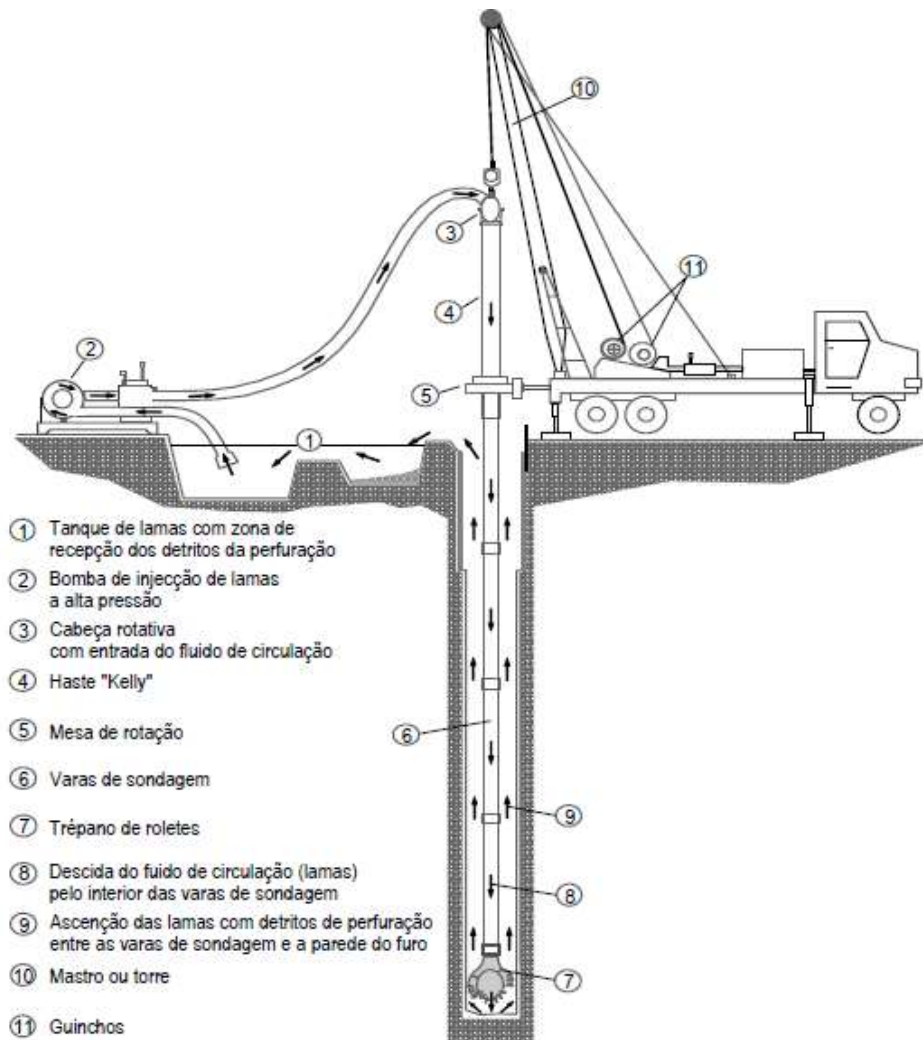


Figura 5.3 - Método de furação à rotação com circulação direta. Instituto Português da Qualidade (2012).

O estaleiro de perfuração é constituído por um gerador, um tanque e uma bomba de lamas para circular o fluido, um guincho para elevar ou baixar a coluna de perfuração e um mastro

que sustenta o equipamento de furação. A coluna de perfuração é constituída pelo *bit* (Figura 5.4) de perfuração que se encontra enroscado no fim das varas de sondagem. Estas são constituídas por tubos em aço bastante resistentes possuindo dimensões tipicamente de 3 ou 6 metros. Todos os elementos da coluna de perfuração são unidos por intermédio de roscas cónicas estandardizadas.

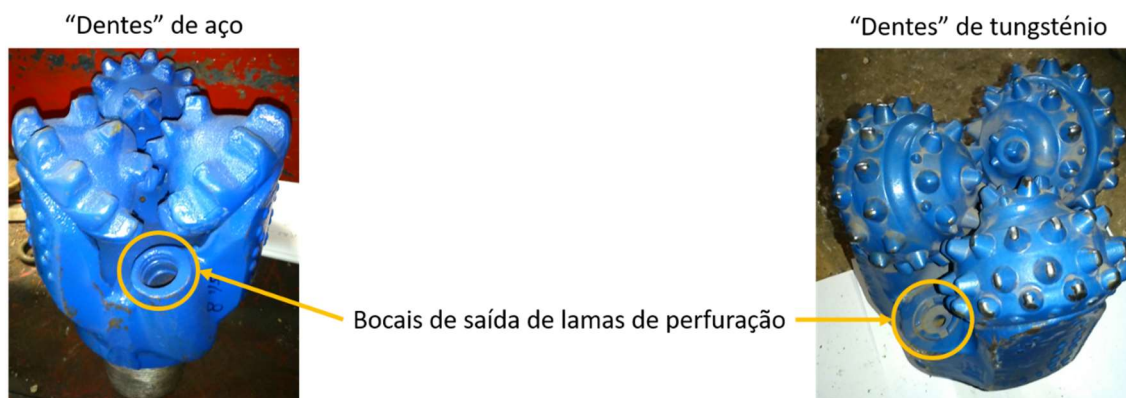


Figura 5.4 - Tricones utilizados na perfuração com o método rotativo

A lama de sondagem, é misturada num tanque ou numa fossa e posteriormente bombeada por uma bomba de alta pressão por dentro das varas de sondagem, saindo por bocais no bit, arrefecendo-o (Figura 5.4). De seguida o fluido ascende pelo espaço anelar compreendido entre a parede exterior das varas de perfuração e as paredes do furo, arrastando consigo os *cuttings* resultantes da perfuração. Ao chegar à superfície o fluido de perfuração volta para o tanque, denominado barroca das lamelas, onde os *cuttings* depositam permitindo que o fluido seja reinjetado. A barroca das lamelas é normalmente constituída por duas câmaras, a primeira possibilita a deposição dos *cuttings* e a segunda como um coletor para a bomba de lamelas. A barroca deve ter normalmente um volume cerca de três vezes superior ao volume do furo previsto. Os *cuttings* normalmente são difíceis de interpretar pois encontram-se remexidos e atrasados em relação ao avanço da perfuração, o que pode levar a medições deficientes das profundidades para dimensionamento dos tubos ralo.

5.1.2.2 Sistema de perfuração rotativo com circulação inversa

No caso do sistema por circulação inversa, em vez do fluido circular para baixo por dentro das varas e para cima pelo espaço anelar, a circulação dá-se no processo inverso. O esquema geral de um estaleiro de obra com este sistema é apresentado na figura 5.5.

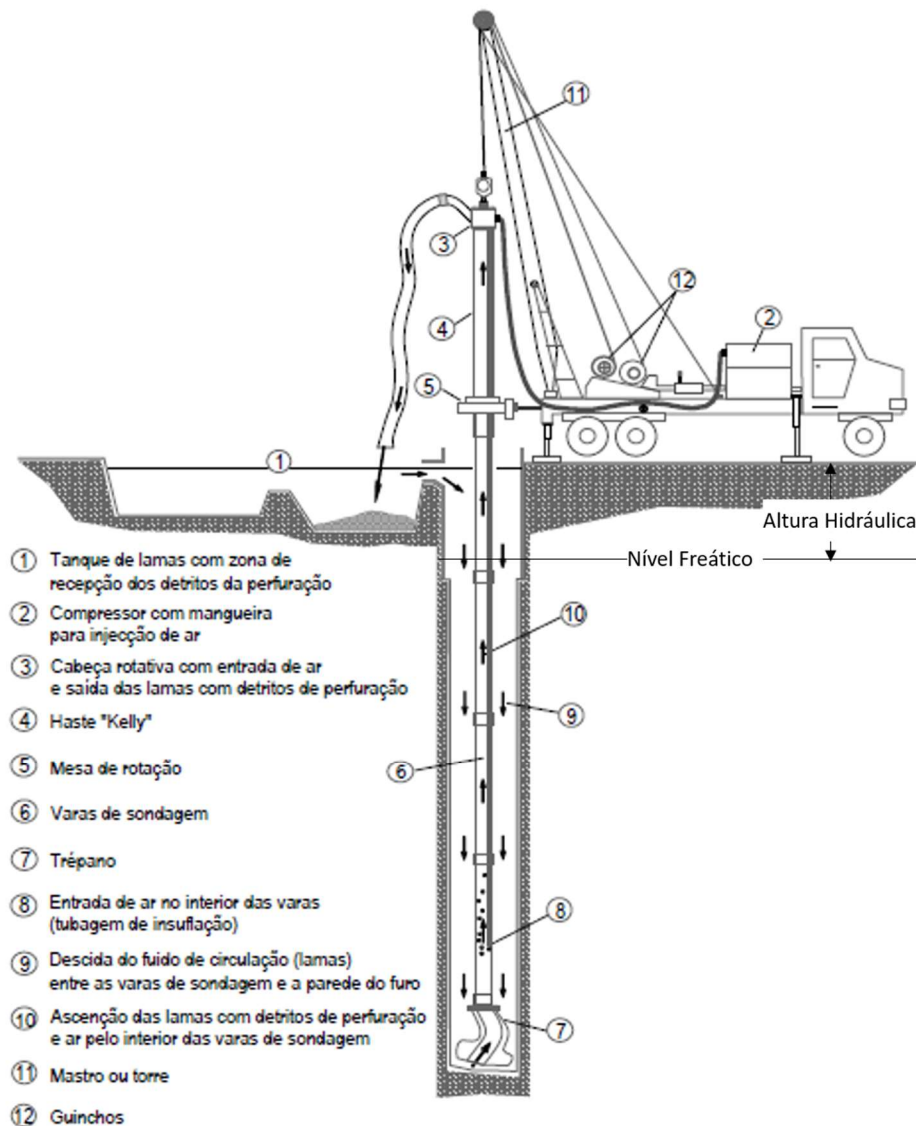


Figura 5.5 - Método de furação à rotação com circulação inversa, (Instituto Português da Qualidade (2012)).

Este é muito similar à configuração da circulação direta com a exceção que muitos dos componentes são de maiores dimensões. As varas de perfuração apresentam um diâmetro interno muito maior, usualmente de 150 mm, para permitir o fluxo de detritos e água. Os bits de perfuração apresentam diâmetros superiores e possuem um bocal centralizado para permitir a entrada dos *cuttings*.

As paredes do furo são suportadas pela pressão hidrostática exercida pela coluna de água no espaço anelar do mesmo, bem como pelo fluxo positivo de água do furo para as formações, ao invés das lamas densas.

O fluido, geralmente água, flui por gravidade da barroca das lamas para o furo através do espaço anelar compreendido entre a parede exterior das varas de perfuração e a parede do furo. Posteriormente, a ascensão da água e dos detritos efetua-se pelo interior do bit e das varas que constituem a coluna de perfuração, por intermédio de uma bomba centrífuga com auxílio de ar comprimido, formando-se uma emulsão ar-água de menor densidade. É de particular importância o facto de este método usar um fluido menos denso e menos viscoso para furos de grande diâmetro, ao contrário do que acontece na perfuração por circulação direta em que o fluido provoca, por vezes, a selagem de formações produtivas de água.

Para sustentar as paredes de perfuração, o nível da água no furo deve ser mantido ao nível da superfície garantindo uma pressão hidráulica suficiente para o furo não colapsar. A altura hidráulica requerida é normalmente de 3 metros (Figura 5.3). O facto de termos uma altura hidráulica positiva implica uma constante perda de água para as formações, e esta tem que ser repostada por uma cisterna. A quantidade de água aumenta com a espessura e permeabilidade das formações atravessadas, mas geralmente excede os $50 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. O abastecimento de água necessária para a execução deste método pode ser um grave problema em zonas áridas.

O método de circulação inversa proporciona uma amostragem bastante boa, com pequenos tempos de atraso entre os *cuttings* perfurados e os que chegam à superfície.

5.1.3 Seleção do método de perfuração e do bit

Dos métodos acima descritos a escolha do método mais adequado para cada caso depende essencialmente do contexto geológico em que se vai perfurar bem como das profundidades espectáveis. Conforme o contexto geológico pode-se tornar necessário utilizar mais que um método de perfuração.

O método de furação por rotoperfuração (Martelo fundo de furo) só é adequado em formações compactas e rochas competentes, cujas paredes não precisem de sustentação durante os trabalhos de furação. Permite a realização de furos de pequeno diâmetro de forma rápida e económica, estando a profundidade de execução limitada pela potência do compressor utilizado (Figura 5.6).

Por sua vez os métodos de furação à rotação, por utilizarem lamas de estabilização, permitem a furação em formações incoerentes, muito fraturadas ou, decompostas ou com alternâncias litológicas. A escolha do *bit* depende de propriedades como a dureza e a composição das formações que se espera encontrar, podendo o mesmo ter de ser alterado

durante a perfuração. Existem essencialmente dois tipos de *bits*: os tricones com dentes de aço para formações pouco coerentes e os tricones com dentes de carboneto de tungsténio para litologias competentes (Figura 5.6).

Seleção do Método de Perfuração			
Litologia	Ígnea e Metamórfica	Sedimentar	
Exemplos	Granito Quartzito Basalto Gneisse Xisto	Calcário Arenito Argilito	Argila Areia Cascalho
Dureza	Muito Duro a Duro	Duro a Brando	Desagregado
Métodos de Perfuração			
Profundidade	Limitada à potência do compressor	≈ 1000m	

Figura 5.6 - Esquema para seleção do bit de perfuração

No método de furação à rotação, a eleição pelo sistema de circulação direta e inversa reside no facto de o mesmo permitir obter uma amostragem de melhor qualidade em relação à circulação direta (minimiza-se o risco de obtenção de amostragem com contaminação cruzada na ascensão pelo furo). Outra vantagem é a perfuração de furos de grande diâmetro (mesmo com lamas de estabilização menos densas) e que possibilitam por sua vez a instalação de equipamentos de bombagem que permitem extrair caudais elevados. Como desvantagem em relação à circulação direta, o método de circulação inversa necessita de mais meios humanos durante os trabalhos de sondagem e apresenta consumos de combustível e água superiores (Tabela 5.1).

Tabela 5.1 - Comparação entre os diversos métodos de perfuração

Método de Perfuração	Diâmetros e profundidades típicas ¹	Vantagens	Desvantagens
Rotativo com circulação direta¹	Diâmetro: 100--750mm ¹ Profundidade: > 1000m ¹	<ul style="list-style-type: none"> • → Possível atingir grandes profundidades¹ • → Aplicável a uma grande gama de litologias¹ • → Não necessita de revestimento temporário¹ 	<ul style="list-style-type: none"> • → Equipamento dispendioso¹ • → Precisa de uma ampla área de trabalho para o equipamento de perfuração e para o tanque das lamas¹ • → Caracterização da amostragem difícil pela mistura de materiais e pelo atraso em relação à perfuração¹ • → Pode induzir impermeabilização das formações produtivas¹
Rotativo com circulação inversa¹	Diâmetro: 400mm--1200mm ¹ Profundidade: até 300m ¹	<ul style="list-style-type: none"> • → Permite a execução de furos de grande diâmetro¹ • → Elevada capacidade de remoção dos <i>cuttings</i> o que permite avanços rápidos¹ • → Boa qualidade de amostragem¹ 	<ul style="list-style-type: none"> • → Usa grandes volumes de água¹ • → Necessidade de um maior número de operadores¹ • → Utiliza uma maior área de estaleiro¹ • → Risco de Entupimento das varas por detritos de grandes dimensões¹
Rotopercussivo (Martelo-fundo-de-Furo)¹	Diâmetro: 100--450mm ¹ Profundidade: > 500m em formações secas ¹	<ul style="list-style-type: none"> • → Elevada eficácia em rochas duras e consolidadas¹ • → Não necessita de água¹ • → Não provoca impermeabilização das zonas produtivas¹ • → Permite estimar a produtividade das formações aquíferas durante a perfuração¹ 	<ul style="list-style-type: none"> • → Só é eficaz em formações consolidadas¹ • → Profundidade de perfuração limitada pela pressão hidráulica¹ • → Trata-se de um método destrutivo relativamente à amostragem¹

¹ Os diâmetros e profundidades variam muito com a geologia, deste modo os valores referidos são meramente indicativos

5.1.4 Diâmetro de perfuração

A escolha do diâmetro de perfuração depende, em primeira análise, do diâmetro da bomba que se irá instalar, que depende por sua vez do caudal de exploração e profundidade do nível hidrodinâmico previsto. Caso não se disponham de elementos que permitam avaliar, com uma razoável aproximação, os caudais espectáveis e a profundidade do nível hidrodinâmico, dever-se-á optar por uma sobrestimação. A partir do diâmetro da bomba que se espera instalar, extrapola-se o diâmetro interno para a coluna de revestimento definitivo do furo (Tabela 4.1). Deve-se ter em conta o espaço anelar para a colocação do maciço filtrante (entre 3 a 6") e só por fim o diâmetro de perfuração (Figura 5.7).

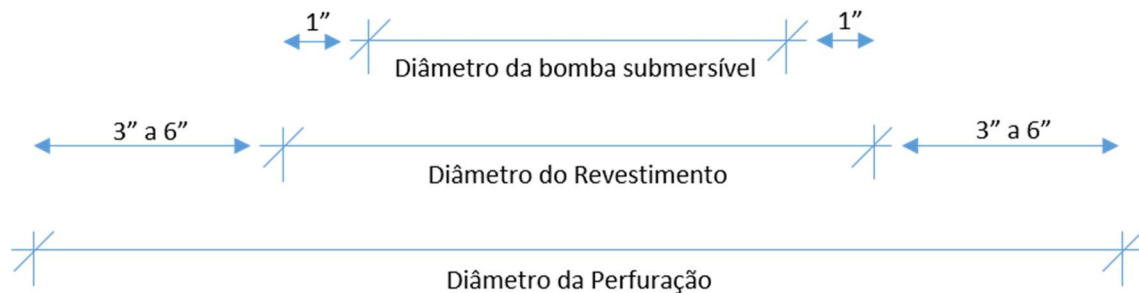


Figura 5.7 - Principais diâmetros a ter em conta na construção de uma captação de água subterrânea.

De acordo com estas condicionantes, a escolha do diâmetro inicial de furação é um fator crucial a ter em conta na construção de captações de água subterrânea.

5.1.5 Verticalidade da perfuração

Ao longo de um furo existem fatores associados às características do maciço rochoso que tendem a originar um desvio do mesmo em relação à vertical, por vezes muito significativo, assim como a alterar a sua linearidade. Este desvio pode ser originado devido à presença dos seguintes elementos:

- Superfícies de estratificação entre camadas com diferente dureza;
- Sectores muito fraturados;
- Xistosidade das formações;
- Zonas de falha, muito tectonizadas;
- Ocorrência de blocos não alterados em maciços alterados a decompostos.

Se as variações de direção forem grandes, surgirão dificuldades na colocação da coluna de revestimento abaixo da profundidade definida pelo ponto de inflexão. Para averiguar o desvio procede-se à introdução de uma sonda específica no furo, sendo medido o desvio em relação à verticalidade, podendo o mesmo ser corrigido quando detetado numa fase inicial pela utilização, por exemplo, por varas de sondagem retificadoras.

5.2. Fluidos de Perfuração

Um importante fator na execução dos furos é a seleção dos fluidos de perfuração a utilizar. O fluido pode ser à base de ar ou água se as formações são estáveis e duras, como é o caso de aquíferos fissurados ou à base de lamas no caso de as paredes do furo necessitarem de suporte. Qualquer que seja o fluido de perfuração utilizado, é essencial que a sua qualidade seja controlada de forma a evitar a introdução de poluentes no aquífero. Por exemplo, a água utilizada nos fluidos não deve conter bactérias nocivas, e deste modo a água superficial não tratada não deve ser aplicada.

Um sistema de fluidos de perfuração devidamente concebido e projetado executa várias funções essenciais durante o processo de perfuração de um furo:

1. Manter o furo limpo removendo os *cuttings* transportando-os para superfície;
2. Limpar, arrefecer e lubrificar o *bit* e a coluna de perfuração;
3. Suportar e estabilizar as paredes do poço;
4. Manter os *cuttings* em suspensão quando a perfuração é interrompida, para adicionar varas de perfuração;

Um controlo inapropriado do fluido pode causar desmoronamentos e selagem das formações produtivas. As principais propriedades físicas dos fluidos de sondagem que devem ser controladas durante a perfuração para uma perfuração eficiente e segura são a viscosidade, a tixotropia e a densidade. Para além destes parâmetros a velocidade de ascensão do fluido deve também ser controlada.

Os *cuttings* de maiores dimensões tendem a afundar na lama, deste modo a velocidade de ascensão do fluido tem de ser superior à velocidade com que os *cuttings* se depositam. A velocidade de deposição da fração grosseira dos *cuttings* em água é de aproximadamente 0.15 m s^{-1} mas será muito inferior em lama viscosa. Deste modo a velocidade de ascensão depende da capacidade da bomba de lamas e da área de secção correspondente ao espaço anelar, entre as varas e as paredes de perfuração. As velocidades de ascensão recomendadas encontram-se ilustradas na tabela 5.2, para as lamas estas variam 0.3 m s^{-1} (lamas muito viscosas) até 0.6 m s^{-1} (lamas pouco viscosas) (Australian Drilling Industry Committee Limited, 1997). Velocidades superiores são desaconselhadas tendo em conta que poderão promover a erosão excessiva das paredes do furo.

Relativamente à viscosidade, este parâmetro controla a taxa a que os *cuttings* se depositam, se esta for muito elevada então os *cuttings* podem não se depositar na barroca de lamas. Isto leva a uma recirculação dos *cuttings* que provoca um desgaste excessivo da bomba de lamas e do bit de perfuração. A viscosidade pode aumentar naturalmente através da adição

de argilas das formações geológicas ou diminuir com o influxo de água. A viscosidade pode ainda ser aumentada com a adição de argilas, nomeadamente bentonite e diminuída com a utilização de dispersantes.

Tabela 5.2 - Velocidades de ascensão tendo em conta o tipo de fluido (Australian Drilling Industry Committee Limited, 1997)

Tipo de Fluido	Velocidade de Ascensão ($m s^{-1}$)
Ar	15-25
Água	0,6
Lama	0,4
Lama Viscosa	0,3
Espuma	0,2

O controlo da viscosidade é realizado com recurso ao cone de Marsh (figura 5.8) através de um ensaio de fluidez. O teste baseia-se na velocidade de escoamento de um determinado volume de lamas no referido cone. Deste modo, enche-se o funil com 1 litro de fluido e deixa-se esvaziar para um copo graduado. O tempo é medido em segundos até o copo encher até à marca de 0.946 litros. A viscosidade corresponde a esse tempo.



Figura 5.8 - Funil de Marsh e copo graduado.

A viscosidade deve ser ajustada de acordo com granulometria do material perfurado, variando desde 30 a 45 s para areia fina, e entre 75 a 85 s para cascalho grosseiro (Tabela 5.3) (Driscoll, 1986). A viscosidade deve ser mantida o mais fina possível enquanto se

assegura que o fluido retém a capacidade de estabilizar a formação e limpar o furo adequadamente.

No que diz respeito à densidade do fluido de sondagem esta vai influenciar a pressão hidrostática que o fluido exerce no aquífero e a capacidade com que o mesmo transporta os cuttings.

Tabela 5.3 - Valores da viscosidade do fluido tendo em conta o tipo de material (Driscoll, 1986)

Material Perfurado	Viscosidade de Marsh (segundos)
Areia Fina	30 - 45
Areia Média	40 - 55
Areia Grosseira	50 - 65
Cascalho	60 - 75
Cascalho grosseiro	75 - 85
Perdas de Circulação	85 - 120

A densidade requerida do fluido vai depender da pressão hidrostática (produto da densidade do fluido e a altura da coluna) necessária para superar a pressão dos poros do aquífero.

A determinação da densidade das lamas é realizada por uma balança de lamas (figura 5.9) especificamente destinada para este fim, esta permite a pesagem do fluido num recipiente de volumetria conhecida.



Figura 5.9 - Balança de lamas

A densidade da típica da lama varia entre 1.0 e 1.2 kg L⁻¹, no entanto poderão ser necessárias lamas mais densas em aquíferos confinados. É de salientar que o controlo da densidade e viscosidade da lama é realizado de acordo com normas internacionais (ISO 10414 – 1:2008). A tixotropia, muitas vezes referida como a força do gel, é a capacidade que o fluido tem de

formar um gel quando o fluxo é interrompido. Esta propriedade é de elevada importância para que o fluido sustente os *cuttings* quando a perfuração é interrompida para a adição de varas de perfuração. Em fluidos com pouca tixotropia existe o perigo de os *cuttings* depositarem por cima do bit, impedindo a rotação do mesmo. Este parâmetro também influencia a estabilização do furo, visto que a lama forma um gel estável na formação

Por fim, as propriedades como o pH, temperatura e condutividade também devem ser controladas de modo a auxiliar na identificação das litologias que se encontram a ser perfuradas.

O fluido à base de ar comprimido é normalmente utilizado no sistema rotopercussivo. Este método permite a perfuração na ausência de água, o que é altamente vantajoso quando se executam sondagens em áreas áridas. O facto de o ar apresentar baixa densidade significa que a velocidade de ascensão tem de ser elevada para conseguir trazer os *cuttings* para a superfície, sendo as velocidades recomendadas na ordem dos 25 m s^{-1} , comparativamente às velocidades de 0.3 a 0.6 m s^{-1} para as lamas bentoníticas (Tabela 5.2). No que diz respeito a furos secos este fluido apresenta poucos problemas, no entanto debaixo de água, a pressão do ar tem de vencer a pressão hidrostática e ser suficiente para trazer a água e os *cuttings* para a superfície. Para auxiliar na remoção dos detritos podem ser adicionadas espumas (Figura 5.10).



Figura 5.10 - Espumas de sondagem ascendendo com os *cuttings* resultantes da perfuração

Estas para além de proporcionarem um efeito extra de limpeza, permitem também o preenchimento de cavidades em situações onde ocorrem perdas de circulação, permitindo que a mesma seja reposta. A situação de perdas de circulação é frequente na perfuração de

aquíferos cársicos, sendo este o fluido de eleição para este tipo de aquíferos. O fluido à base de água com argila, consiste numa suspensão parcialmente coloidal de água e bentonite. A água, sob pressão hidrostática da lama, é forçada a sair da suspensão para as formações adjacentes, deixando um reboco de bentonite. Este reboco permite suportar as paredes do furo e apresenta maior espessura nas formações permeáveis (Figura 5.11).

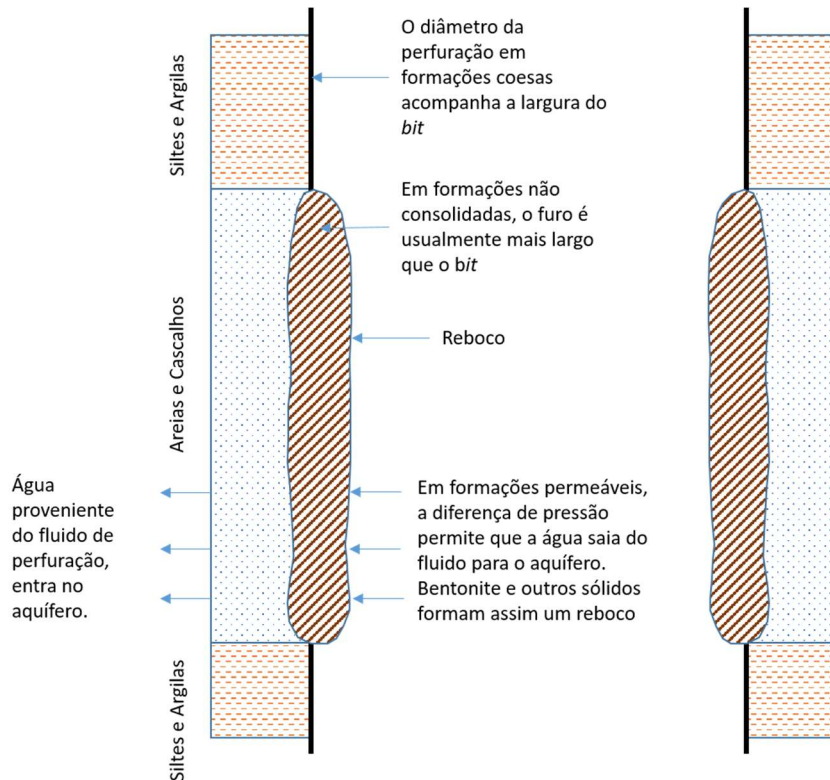


Figura 5.11 - Exemplo do reboco gerado.

Deve-se ter muito cuidado de forma a evitar um reboco muito espesso, pois o mesmo pode reduzir o diâmetro da captação e impedir a retirada do equipamento e perfuração. Este reboco pode ser difícil de remover depois da perfuração, especialmente quando se aplica o maciço filtrante. Para além disto o fluido que invade a formação aquífera produtiva pode reduzir substancialmente a sua permeabilidade.

O maior problema na utilização deste tipo de fluidos em aquíferos extremamente porosos ou cársicos, é o das perdas de circulação. Nos aquíferos cársicos, todo o fluido pode desaparecer numa fratura de grande expressão ou cavidade. Isto resulta numa perda de amostragem, mas mais importante, numa perda de lubrificação para o bit e uma perda de suporte das paredes do furo. Este problema pode ser ultrapassado aumentando a viscosidade da lama e colocando palha e restos de madeira de pequenas dimensões, ou cimentando zona de perda de circulação. Infelizmente, ao realizar-se este processo pode

estar-se a selar uma zona produtiva para além do gasto associado à injeção de grandes quantidades de cimento para encher cavidades de tamanho considerável. De modo similar, o entubamento destas zonas de perda de circulação pode bloquear um potencial aquífero.

5.3. Identificação do material perfurado (Cuttings)

O sondador que executa o furo elabora um relatório de perfuração onde regista as suas observações sobre a construção e a hidrogeologia. A utilidade deste registo vai depender da experiência e competência do sondador. Deve estar presente um Engenheiro Geólogo durante a perfuração, continuamente ou a intervalos regulares, de modo a completar o relatório de perfuração ou para produzir o seu próprio relatório definitivo.

A identificação do material perfurado tem como objetivo definir os níveis a captar e o consequente posicionamento e dimensionamento dos tubos ralo a intercalar na coluna de revestimento definitivo. Permite também definir os intervalos de profundidades em que seja conveniente a aplicação de isolamentos intercalares e a escolha do tipo de maciço filtrante a aplicar.

5.3.1 Observação do processo de perfuração

Os métodos de furação, abordados anteriormente neste trabalho, definem-se por serem todos destrutivos, deste modo todos os elementos que se possa obter para além da amostragem são de grande importância. O Sondador ou o Engenheiro Geólogo podem obter muita informação sobre a geologia do furo e o seu potencial através das observações no decorrer do processo de perfuração.

5.3.1.1 Observação do processo de perfuração (Método Rotativo)

No caso do método de perfuração por rotação existem essencialmente três parâmetros que devem ser tomados em conta para auxiliar posteriormente na identificação da amostragem. Estes parâmetros são:

- Velocidade de perfuração;
- Comportamento do equipamento de perfuração;
- Comportamento dos fluidos de perfuração.

No que diz respeito à velocidade de perfuração, esta fornece uma simples indicação da geologia. Geralmente, quanto mais dura a rocha, mais lenta é a velocidade de perfuração. Isto é uma simplificação, e não existem velocidades absolutas para cada tipo de litologia. Este parâmetro é influenciado por diversos fatores incluído o tipo de equipamento, a profundidade e diâmetro do furo, o tipo e o peso aplicado no bit. Existem também diferenças na taxa de perfuração dependendo do tipo de litologia e a sua compactação. Por

exemplo, velocidade é usualmente superior em argilitos do que em arenitos, mas pode ser mais baixa em argilas do que em areias porque, a argila pode prender no bit.

O comportamento do equipamento de perfuração é importante para identificar mudanças de litologias. Normalmente, a perfuração é muito mais suave em argilas do que em areias e cascalhos, especialmente se estes últimos forem de grandes dimensões. De facto, a mudança de litologia de argilas para cascalhos pode ser frequentemente detetada pelo início de uma vibração na coluna de perfuração. Outro tipo de comportamento da coluna de perfuração, é quando a mesma encontra grandes fraturas ou cavidades e cai sobre o seu próprio peso. Como já se verificou a perda de fluidos de perfuração pode indicar a presença de fraturas ou cavidades e este é só um exemplo da importância da observação do fluido de sondagem. A perfuração de formações permeáveis pode ser identificada por perdas de circulação temporárias enquanto não se forma o reboco na parede do furo. Deste modo o nível das lamas na barroca deve ser monitorizado e qualquer descida deve ser anotada. A presença de um bom aquífero também pode ser detetada pela diluição da lama de sondagem enquanto não forma o reboco. Assim, o Sondador deve monitorizar a densidade e viscosidade da lama de forma a assegurar que o fluido se encontra em condições adequadas. É também recomendável que se monitorize os valores de pH e resistividade, visto que estes parâmetros fornecem bons indicadores na mudança da qualidade da água à medida que a perfuração decorre. A título de exemplo, a condutividade pode identificar litologias que contenham halite (NaCl). Visto que este mineral aumenta a condutividade os valores deste parâmetro serão elevados. A figura 5.12 ilustra uma medição da concentração de cloreto de sódio (NaCl) do fluido de sondagem num furo onde se suspeitava a presença de formações contendo de cloretos na sua constituição.



Figura 5.12 - Fluido com elevada concentração de NaCl (1270 ppm), confirmação da presença do mesmo na amostragem.

Como é possível observar, o fluido apresentava valores de 1270 ppm de Cl^- , concentrações muito superiores à água utilizada com 600 ppm. Após análise da amostragem verificou-se a presença de sal, corroborando os dados resultantes da medição da concentração.

5.3.1.2 Observação do processo de perfuração (Método Rotopercussivo)

Relativamente, à utilização do método rotopercussivo, este resulta na libertação de um fluxo contínuo de rocha pulverizada e ar comprimido. Neste tipo de método é importante reconhecer as seguintes características: (a) Mudanças na litologia; (b) Zonas de fracturação ou alteração e (c) Zonas de afluxo de água.

As mudanças na litologia podem ser reconhecidas por alterações na cor das poeiras resultantes, mudanças na velocidade de perfuração ou em mudanças na granulometria dos detritos resultantes.

As zonas de fracturação ou alteração podem ser identificadas como intervalos de uma maior velocidade de perfuração. As mesmas (a pouca profundidade) encontram-se normalmente com alteração resultante da oxidação de minerais de ferro presentes nas rochas. Zonas com potencial podem ser reconhecidas deste modo, pela alteração de cor de cinzento (rocha fresca) para vermelho de oxidação.

No que concerne às zonas de afluxo de água estas são reconhecidas por um visível fluxo de água juntamente com os sedimentos e ar comprimido. Pequenos fluxos podem também manifestar-se como humidade nos *cuttings*, que emergem frequentemente como grandes aglomerados de material, ao invés das características poeiras secas.

5.3.2 Amostragem do material perfurado

Durante a realização da sondagem são recolhidas amostras que permitem estabelecer a sucessão litológica do local e avaliar as características hidrogeológicas dos aquíferos. As amostras devem ser recolhidas em intervalos regulares, geralmente de 3 em 3 metros, ou sempre que o terreno atravessado varie significativamente. Estas deverão ser colocadas em lugar protegido da passagem de viaturas ou pessoas e da chuva, separadas por um pequeno espaço para evitar que se misturem. A cada amostra deve corresponder uma etiqueta identificando o intervalo de perfuração a que foi obtida (Figura 5.13).



Figura 5.13 - Exemplo da disposição da amostragem das formações geológicas atravessadas e respectivas etiquetas. (a) Resultantes do método rotopercussivo; (b) Resultantes do método Rotativo por circulação direta.

Na utilização do método rotopercussivo a amostragem está limitada a *cuttings* de pequena dimensão (Figura 5.13a). Estes apresentam dimensões granulométricas por vezes na ordem dos siltes e argilas, sendo a sua identificação de elevada dificuldade. Deste modo para auxiliar nesta identificação deve-se proceder a um bom controlo das operações de perfuração (secção 5.3.1.2).

No que diz respeito ao método de furação por rotação com circulação direta, este permite amostras de melhor qualidade face ao método anterior (Figura 5.13b). Os *cuttings* resultantes deste método podem ser sedimentos desagregados ou fragmentos de rocha. A análise destes não é tarefa fácil e requer especialistas, nomeadamente engenheiros geólogos, com conhecimento e experiência na sua análise. Deve-se ter em conta que neste método os *cuttings* demoram um certo tempo a ascender, ou seja as amostras que chegam à superfície correspondem a um nível acima do que está a ser perfurado. Deste modo deve-se corrigir a profundidade a que se encontra determinada litologia, tendo em conta a

velocidade de ascensão do fluido de sondagem. Para além disto, é necessário ter em conta que os *cuttings* vão sendo contaminados pelo próprio fluido de perfuração. Adicionalmente, durante a ascensão pode ocorrer erosão das paredes do furo o que provoca uma contaminação da amostragem.

Nos métodos rotativos, deve-se ter em conta que a viscosidade do fluido deve ser devidamente controlada. Viscosidades elevadas vão impedir a deposição dos *cuttings* na barroca das lamas, sendo reinjetados no furo, contaminando os novos *cuttings* e levando a erros de interpretação da amostragem muito elevados se o técnico não estiver a par do problema. As amostras derivadas do método de rotação por circulação inversa apresentam melhor qualidade face ao sistema de circulação direta. Neste sistema os *cuttings* não entram em contacto com as paredes do furo, diminuindo a contaminação proveniente da erosão destas. A velocidade de ascensão neste método, é mais elevada o que permite uma amostragem em tempo real, sem atrasos. Este fato permite o transporte de *cuttings* de maiores dimensões, facilitando a caracterização da amostragem.

5.3.2.1 Caracterização da amostragem

A caracterização da amostragem é um processo que requer alguma experiência e conhecimento. Com base nestas amostras é possível identificar os aquíferos e os aquíferos, e pode ser feita, por vezes, uma avaliação das propriedades hidrogeológicas. A visão e o tato serão primordiais na identificação das amostras. De forma a auxiliar a identificação das amostras deverá ser usada uma lupa. As características que devem ser avaliadas são: Cor; Grau de humidade; Textura; Dureza dos detritos; Grau de Cimentação; Mineralogia; Granulometria; Grau de calibração; Grau de arredondamento.

Caso as amostras obtidas não sejam de qualidade ou suscitarem dúvidas quanto ao intervalo de profundidade de proveniência, em complemento à amostragem realizada deve recorrer-se a diagrfias de forma a atingir os objetivos referidos no início desta secção.

5.4. Diagrafias

As diagrafias, consistem em registos geofísicos contínuos, em função da profundidade, das variações naturais ou induzidas, de determinadas características das formações geológicas, medidas a diferentes profundidades através de uma sonda. Os registos geofísicos mais vulgarmente realizados no âmbito das captações de água são: o potencial espontâneo, resistividade eléctrica e radiação gama natural) são registados em gráfico em função da profundidade. (Figura 5.14).



Figura 5.14 - Equipamento de registo de diagrafias (potencial espontâneo, resistência pontual, resistividade eléctrica (normal curta e longa) e radiação gama natural).

As diagrafias eléctricas (electrical well log - ELOG) são registos resultantes da medição de três propriedades eléctricas das formações perfuradas, o potencial espontâneo (SP), a resistência monoelétrica (SPR) e a resistividade eléctrica (Figura 5.15). As diagrafias de potencial (SP) espontâneo medem a diferença de potencial eléctrico entre um eléctrodo no interior do furo e a superfície. Este diferencial resulta dos diferentes fluxos de cargas que podem ocorrer nas diferentes formações geológicas. Estes fluxos podem ser devido às interações eléctricas dos constituintes químicos das rochas (origem eletroquímica) ou devido ao movimento de fluidos contendo iões condutores. O método é essencialmente usado para a identificação de zonas permeáveis e da qualidade da água.

No que concerne às diagrafias de resistência monoelétrica (SPR), estas consistem num eléctrodo de corrente que se desloca ao longo da sondagem e um eléctrodo fixo à superfície. A corrente difunde-se a partir do eléctrodo móvel até às formações e retorna ao eléctrodo de superfície. A variação da resistência verificada neste circuito é devida praticamente às

variações da resistividade do terreno em torno do eletrodo móvel. Este método juntamente com o potencial espontâneo (SP), permite identificar com boa precisão os contactos litológicos e os tramos permeáveis.

No que diz respeito às diagrfias de resistividade elétrica, estas consistem em dois eletrodos móveis, um emissor e outro recetor separados por uma determinada distância, permite obter os designados registos de resistividades normais. Quando o espaçamento é igual ou inferior a 16" (16N), a configuração chama-se normal curta. Se os eletrodos estão separados por 64" (64N) denomina-se normal longa.

O espaçamento entre eletrodos determina a profundidade de penetração na formação, para um dado diâmetro de sondagem: quanto mais longo o espaçamento em relação ao diâmetro da sondagem, mais profunda é a penetração, mas mais baixa a resolução da sequência de camadas. A normal curta, devido ao pequeno espaçamento tem um reduzido poder de penetração sendo, portanto, um bom método para determinar a resistividade da zona invadida. A normal longa permite medir a resistividade da zona virgem, que não foi afetada pelo fluido de perfuração. Este método permite detetar a existência de zonas invadidas pelo fluido de sondagem e, portanto, potencialmente permeáveis.

Por fim as diagrfias de radiação gama natural (NGAM), consistem na contagem da emissão de raios gama resultante da desintegração de alguns núcleos de átomos (urânio, tório e potássio) presentes nos minerais das formações atravessadas. Em ambientes sedimentares as emissões gama são devidas quase exclusivamente ao potássio ^{40}K , relativamente abundante nas formações argilosas e muito particularmente em argilas organogénicas (Davis e Wiest,, 1971).

Os arenitos e cascalheiras por outro lado, apresentam baixa concentração dos elementos acima citados. Deste modo este método torna-se útil na separação dos níveis mais argilosos dos níveis arenosos. O registo da radiação gama natural apresenta uma vantagem prática importante sobre os registos elétricos, que consiste na possibilidade de ser executado em poços entubados. Assim é possível efetuar registos numa captação construída anteriormente, caso não se tenha efetuado qualquer registo ou se o registo original se tiver estragado ou perdido.

Na tabela 5.4 são apresentadas, de maneira sumária, as diagrfias mais frequentemente utilizadas, bem como a sua aplicação potencial e as condições do furo para a realização dessas mesmas medições.

Tabela 5. 4 - Diagramas mais frequentemente utilizadas, a sua aplicação potencial e as condições do furo requeridas para a realização dessas mesmas medições

Diagrama	Propriedades medidas	Aplicação potencial	Condições do furo	Unidade
SP	Potencial elétrico causado por diferenças de salinidade no furo e fluidos intersticiais	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Identificação de litologias ➤ Qualidade da água ➤ Localização de zonas permeáveis 	Furo não entubado preenchido com fluido condutor	mV
Gama natural	Radiação gama de radioisótopos naturais	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Identificação de litologias relacionadas com o conteúdo em argilas e siltes e ➤ Localização de zonas permeáveis 	Quaisquer condições desde que o furo não tenha diâmetro demasiado grande	c.p.s.
SPR	Resistência da rocha, fluido de saturação e fluido do furo	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Identificação de litologias, localização de fraturas e localização de zonas permeáveis 	Furo não entubado preenchido com fluido condutor	ohm
Resistividade (16N e 64N)	Resistividade das rochas e fluidos de saturação	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Identificação de litologias e localização de zonas permeáveis 	Furo não entubado preenchido com fluido condutor	ohm.m

Na figura 5.15 apresenta-se um exemplo de uma diagrama, onde foram registados os parâmetros potencial espontâneo (SP) a vermelho do lado esquerdo, resistência pontual (SPR) a preto, resistividade normal curta (16N) a vermelho e normal longa (64N) a azul e radiação gama natural (NGAM) a verde claro do lado direito. Os dados obtidos na realização destes métodos de prospeção indireta assumem particular importância na construção da captação quando a amostragem obtida é de má qualidade ou o intervalo de profundidade difícil de avaliar, constituindo assim ferramentas importantes para a definição das profundidades dos níveis/horizontes mais produtivos, nos quais se devem posicionar, idealmente, os tubos-ralo na coluna de revestimento. Um outro aspeto fundamental consiste na capacidade de as diagramas identificarem fraturas, através da deposição de

minerais de alteração nas mesmas, a qual faz variar os valores de alguns parâmetros, nomeadamente, de resistividade.

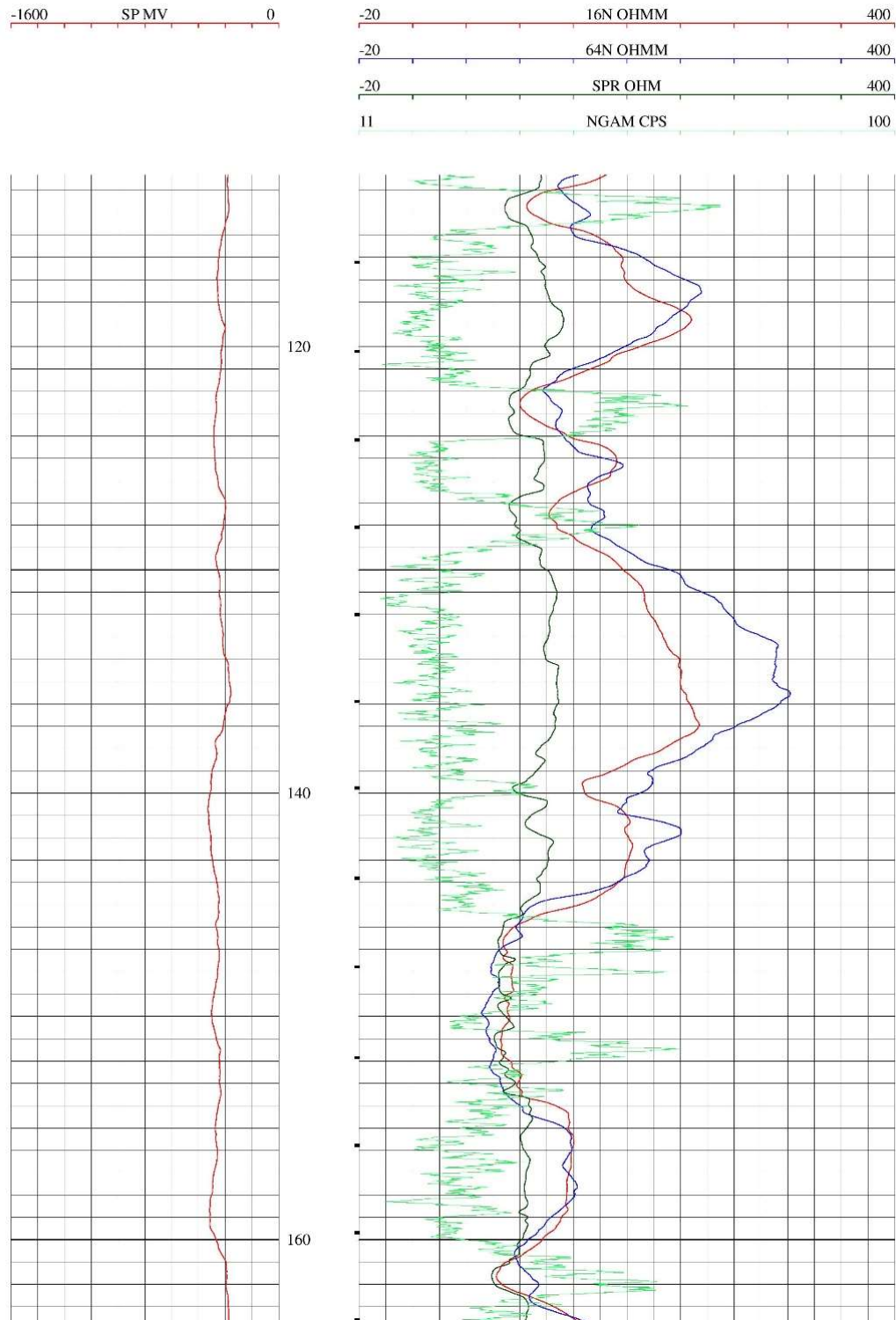


Figura 5.15 - Exemplo de uma diagrafia

5.5. Métodos de instalação do revestimento e tubos ralo

Após completos os trabalhos de perfuração, o furo é analisado por diagrfias e procede-se então à instalação do revestimento. Os limites inferiores e superiores dos aquíferos são identificados e é criado um esquema com o posicionamento dos tubos ralos tendo em conta o comprimento da tubagem. O comprimento da tubagem é normalmente de 6 metros, no entanto outras dimensões estão disponíveis no mercado. À medida que o revestimento desce pelo furo, são adicionados novos segmentos de tubagem que são unidos por rebites, roscas ou soldados dependendo do material. Os tubos ralos e os tubos cegos, são descidos até que no final do entubamento, os ralos fiquem posicionados nas camadas aquíferas que se pretendem captar. Com o objetivo de centrar a coluna de revestimento para que a mesma fique regularmente afastada das paredes do furo, são aplicados centralizadores (Figura 5.16).



Figura 5.16 - Centralizadores

Estes apresentam a forma de barril, e são normalmente constituídos por aço. No entanto, devem-se aplicar centralizadores feitos do mesmo material que a coluna de revestimento. Usualmente, um espaçamento de 12 metros entre centralizadores é uma medida correta, devendo, no entanto, utilizar-se pelo menos um centralizador em cada tubo ralo. A colocação destas peças facilita a colocação posterior do seixo calibrado que constitui o maciço filtrante, assim como eventuais operações posteriores de manutenção no furo.

Depois de aplicada a tubagem de revestimento do furo, a prova de linearidade pode ser efetuada com recurso a equipamento de geofísica ou, de forma mais expedita, descendo um cilindro de prova, constituído por um troço de tubo de 6 metros de comprimento e diâmetro ligeiramente inferior ao diâmetro interior da tubagem.

Após prova de linearidade, procede-se à colocação do seixo calibrado que corresponde ao maciço filtrante. Este deve ser colocado lentamente e de forma constante para que o mesmo fique perfeitamente acamado e contínuo. Quando colocado com muita rapidez, pode

acontecer que essa continuidade seja afetada por zonas vazias, sem seixo, colocando em perigo a resistência do revestimento. Desta forma, a operação de descida do areão só deve ser interrompida para controlo do nível atingido por este.

É de salientar que em aquíferos pouco consolidados a instalação de areão calibrado deve ser feita sem interrupções, visto que à medida que o tempo passa, aumenta a probabilidade de as paredes do furo colapsarem.

5.6. Limpeza e Desenvolvimento da captação

Uma vez terminada a construção da captação, seguem-se as operações de limpeza e desenvolvimento da mesma. De facto, qualquer método de perfuração altera as características hidráulicas das formações aquíferas na área adjacente à captação, tornando-se necessário proceder a estas operações.

No que diz respeito à perfuração pelo método rotopercussivo, com a injeção de ar comprimido, este pode proceder a selagem das fraturas com material argiloso. Sendo este o método de eleição na perfuração de aquíferos fissurados, devem ser realizadas operações de limpeza de modo a aumentar a transmissividade das fraturas.

A construção de um reboco nas paredes de perfuração é um procedimento inevitável na perfuração pelo método rotativo com circulação direta de lamas. Este reboco vai permitir a sustentação das paredes de perfuração e prevenir as perdas de fluido de circulação. Isto significa, que o reboco vai impedir o afluxo de água à captação, selando as formações produtivas. Embora seja recomendado que este reboco apresente uma espessura entre 1 a 2 milímetros, na realidade, esta é frequentemente muito superior. A remoção deste material coeso é de grande dificuldade e necessita de métodos de limpeza violentos.

Assim, os métodos desenvolvimento devem possibilitar o restabelecimento e, desejavelmente, a melhoria na envolvente da captação, das propriedades hidráulicas iniciais do aquífero que foram alteradas com a perfuração. A figura 5.17 esquematiza o arranjo das partículas antes e depois dos processos de desenvolvimento.

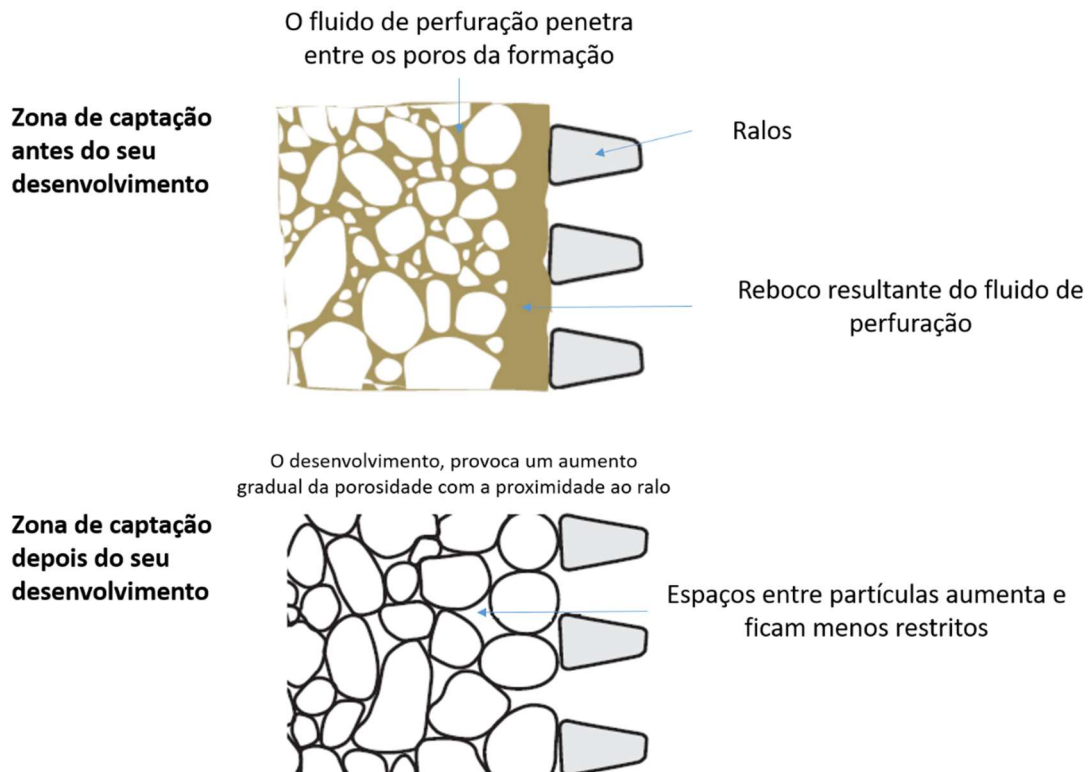


Figura 5.17 - Ilustração do arranjo das partículas antes e depois dos processos de desenvolvimento

Para além disto, a limpeza deve permitir a remoção de detritos resultantes da perfuração, e dos fluidos utilizados durante a mesma, de forma a no final deste processo obtermos água limpa e sem material fino em suspensão. Para verificar expeditamente se a água está limpa, enche-se uma garrafa transparente e uma vez fechada, inverte-se rapidamente colocando-a contra o sol. Caso se observe turvação ou queda rápida de material detrítico, é sinal que o furo ainda não está suficientemente limpo e a operação de limpeza deve continuar. A figura 5.18, ilustra com se deve encontrar a água no final deste processo.



Figura 5.18 - Exemplo de verificação da limpeza da água

5.6.1 Métodos de desenvolvimento

Os métodos de limpeza e desenvolvimento dividem-se em métodos mecânicos e químicos, sendo que a aplicação de cada um irá depender do tipo de captação e formações atravessadas. Os métodos mecânicos de desenvolvimento mais usados são a sobrebombagem, o "jetting" e o "air-lift"

A sobrebombagem consiste, como o próprio nome indica, em explorar a captação a um caudal muito superior ao que ela pode fornecer. Deste modo, liga-se a bomba até retirar grande parte da água do furo e depois desliga-se e permite-se que o mesmo recupere o nível hidrostático inicial. Estes ciclos para/arranca vão permitir o arrastamento e a extração dos materiais detriticos presentes na captação, promovendo a limpeza do furo.

No que diz respeito ao *jetting* (Figura 5.19), este método consiste na introdução de um jato de água de alta pressão direcionado para os ralos. Este método, funciona bem para os tipos de ralos contínuos. No caso dos ralos com estrutura em ponte este método não é muito eficaz visto que o jato é defletido pelos ralos dissipando a sua energia. É de salientar que a água utilizada deve ser livre de materiais detriticos de forma a evitar a abrasão da coluna de revestimento.



Figura 5.19 - Exemplo de uma ponteira de *Jetting*

O método sem dúvida mais usado é o método do *air lift*. Este método consiste em bombear ar a alta pressão, gerado por um compressor, por uma tubagem que se encontra no seu final aberta, permitindo a saída de ar. Esta saída de ar deve encontra-se a uma submersão mínima de 40%. O método deve ser aplicado em regime de paragens e arranques, incidindo sobre toda a extensão produtiva do furo, isto é, as zonas dos tubos-ralo.

Antes de se iniciar a injeção de ar, deve ser sempre medido o nível de água no furo. O compressor deve trabalhar em regime de paragens (cerca de 5 a 10 minutos) arrancando de seguida e trabalhando continuamente durante 10 a 15 minutos. Este processo de limpeza

do furo só deve terminar quando a água sair limpa, sem arrastamento de areias finas ou turvação, podendo durar entre algumas horas a alguns dias (6 a 48 horas).

O dimensionamento do sistema de bombagem a utilizar no ensaio de caudal final é feito com base nos caudais observados no final da limpeza e desenvolvimento pelo método "air-lift". Com frequência, mas em desrespeito pela legislação em vigor e pelas boas práticas técnicas, este método com recurso a ar comprimido é utilizado para determinar o caudal do furo e o respetivo nível. No entanto, os dados assim obtidos não são rigorosos nem suficientes para a escolha correta das características dos equipamentos de bombagem a ser instalados para a exploração do furo. Esses dados só podem ser corretamente conseguidos pelo ensaio de caudal com bomba elétrica submersível que constituirá a operação com que termina a obra.

Os métodos químicos consistem na utilização de agentes químicos que desfloculam ou desagregam quer as lamas de perfuração, quer as frações finas que obstruem as fraturas da formação aquífera em torno da captação. Os dispersantes mais utilizados são compostos à base de polifosfatos de sódio, nomeadamente o hexametáfosfato de sódio $((\text{NaPO}_3)_6)$, o tetra-pirofosfato de sódio $(\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7)$ e o tripolifosfato de sódio $(\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10})$. A dosagem calculada é de cerca de 10 a 20 quilogramas por metro cúbico de água na captação (Australian Drilling Industry Training Committee Limited, 1997). A aplicação do polifosfato deverá incidir preferencialmente ao nível dos ralos pelo que a sua aplicação no furo não deverá consistir na sua introdução à boca do furo e esperar que se propague até à base da captação. Deve-se, por isso, proceder-se à instalação de uma coluna de varas para a sua correta aplicação. Deste modo, este agente químico é deixado no furo por tempo suficiente para reagir, usualmente 12 horas. Após este tempo de reação, o furo é bombeado de forma a tentar remover o polifosfato, argilas e outros detritos na captação.

É de salientar que o fosfato é um nutriente para as bactérias na água subterrânea, e qualquer vestígio que fique no furo pode levar a problemas de incrustações de bactérias. Por esta razão, se um dispersante à base de polifosfato for adicionado, então um biocida, como o cloro, deve ser aplicado depois do tratamento, de forma a desinfetar o furo (secção 5.6.2).

5.6.2 Desinfecção do furo

As operações de perfuração introduzem inevitavelmente bactérias na captação, por exemplo a partir da zona do solo. Depois da limpeza, desenvolvimento, dos ensaios de caudal e instalação do grupo submersível, é recomendado uma desinfecção à captação para esterilizar a captação e impedir futuras incrustações biológicas. Deve-se ter em conta, que

existem bactérias na água subterrânea que vão circulando pela mesma, deste modo apesar de uma desinfecção profunda, incrustações biológicas podem ocorrer futuramente.

Os desinfetantes mais usados são compostos à base de cloro como o hipoclorito de sódio (NaClO) e o hipoclorito de cálcio (CaCl₂O₂). Este último não deve ser usado pois a reação pode levar a problemas de entupimento no furo. Os compostos de cloro são fortes oxidantes, e deve ser tomado cuidado no manuseio dos mesmo de forma a evitar o contacto com a pele, olhos etc.

O hipoclorito de sódio é fornecido em solução contendo entre 5% a 12% de cloro disponível. É adicionado à água e posteriormente agitado, para que o mesmo seja distribuído por toda a extensão da captação. A quantidade a aplicar deve ser no mínimo de 100 mg l⁻¹ (Australian Drilling Industry Training Committee Limited, 1997).

Capítulo 6 – Exploração e Manutenção

Após a construção da captação, a mesma deve ser testada para providenciar ao cliente um caudal recomendado de exploração. Durante os testes é importante que sejam recolhidos dados precisos, relativamente à quantidade e qualidade da água. Esta informação é necessária para o dimensionamento do grupo de bombagem e para decidir se irá ser necessário algum sistema de tratamento da água extraída.

6.1. Ensaios de caudal

O ensaio de caudal tem como finalidade calcular os parâmetros hidráulicos do aquífero/captação, as perdas de carga e, até mesmo, o caudal de extração mais aconselhado e o lugar onde se deve instalar o grupo submersível (dimensionamento). Sendo que os dois parâmetros fundamentais a avaliar são a transmissividade (T) e o coeficiente de armazenamento (S) (secção 2.2.2). Note-se que este ensaio, quando corretamente executado, é uma mais valia para o proprietário da captação, pois permite o prolongamento da vida útil da mesma com o seu bom dimensionamento.

Resumidamente, os ensaios de caudal consistem na bombagem de água dos furos, quer a caudal constante, quer a caudal variável, acompanhando-se e registando-se a evolução dos rebaixamentos gerados, na própria captação e em piezómetros (caso existam).

Existem diversos tipos de ensaios de caudal que diferem entre si pelo modo de execução e métodos de tratamento de dados. Assim sendo, podemos ter essencialmente dois grupos principais de ensaios de caudal: ensaios de bombagem e ensaios escalonados.

Independentemente do tipo de ensaio a utilizar deve-se, antes de iniciar a extração de água, medir o nível da água na captação e nos piezómetros (caso existam) de forma a obter o nível hidrostático do aquífero. Para a realização destes ensaios é necessário um dispositivo de medição de caudal, denominado caudalímetro, e um aparelho para a medição dos rebaixamentos gerados em função de uma escala de tempo adequada. Esta escala de tempo, ao princípio, deve ter intervalos de medição muito pequenos, uma vez que nas primeiras horas do ensaio os rebaixamentos são acentuados. Posteriormente, os intervalos podem ser gradualmente alargados (Kruseman e Rider, 1990). No que diz respeito ao dimensionamento do sistema de bombagem a utilizar no ensaio de caudal, este é feito com base nos caudais observados no final da limpeza e desenvolvimento pelo método "air-lift".

Kruseman e Ridder (1990) propõem que os intervalos de medição durante o ensaio de caudal sejam de: 30s dos 0 aos 5 min; 5 min dos 5 aos 60 min; 20 min dos 60 aos 120 min;

60 min dos 120 min até se finalizar o ensaio. Esta sugestão de intervalos não necessita de ser cumprida rigidamente (como os próprios autores referem) uma vez que os mesmos podem ser adaptados às condições do local, às pessoas disponíveis para a execução do ensaio, entre outros fatores.

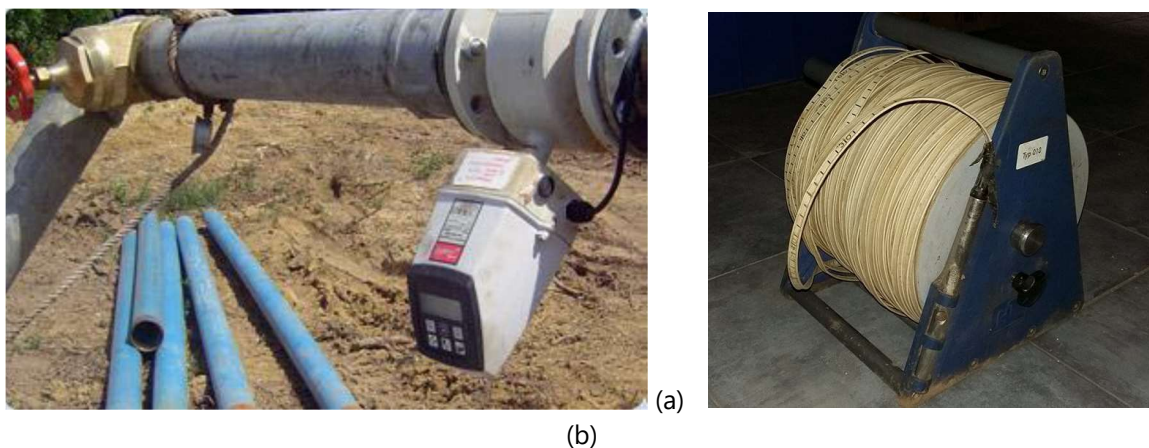


Figura 6.1 - Exemplo de um caudalímetro e de uma sonda de nível.

6.1.1 Ensaios escalonados

No que concerne aos ensaios escalonados, o principal objetivo é a caracterização hidráulica da captação. Estes são realizados de forma a providenciar os rebaixamentos no furo (s_w) para uma gama de caudais crescentes (escalões). Devem-se realizar pelo menos quatro escalões (Q_1 a Q_4), e é usual sugerirem-se os seguintes caudais:

$$Q_1 = \frac{Q_{des}}{3}, \quad Q_2 = \frac{2Q_{des}}{3}, \quad Q_3 = Q_{des} \quad e \quad Q_4 = \frac{4Q_{des}}{3} \quad (\text{Eq. 6.1})$$

onde Q_{des} , é o caudal de exploração desejável em condições operacionais.

Deste modo, os escalões compreendem uma variação de caudais de exploração realista, tendo em conta o que se deseja explorar. Os escalões devem, idealmente, ter a mesma duração de tempo. Porém, isto nem sempre é possível devido a várias condições. Neste caso recomenda-se que o ensaio permita pelo menos a estabilização do rebaixamento no final de cada escalão. A duração típica de um escalão é de 2 horas, no entanto os ensaios escalonados podem decorrer em duas sequências crescentes distintas, com ou sem recuperação.

No caso dos ensaios escalonados com recuperação, estes decorrem permitindo a recuperação do rebaixamento entre cada escalão. O período de recuperação, deve ser pelo menos, igual ao período de bombagem de cada escalão. Um teste típico é ilustrado na figura 6.2, onde cada escalão de duas horas é seguido de uma recuperação de duas horas, perfazendo um total de dezasseis horas de ensaio.

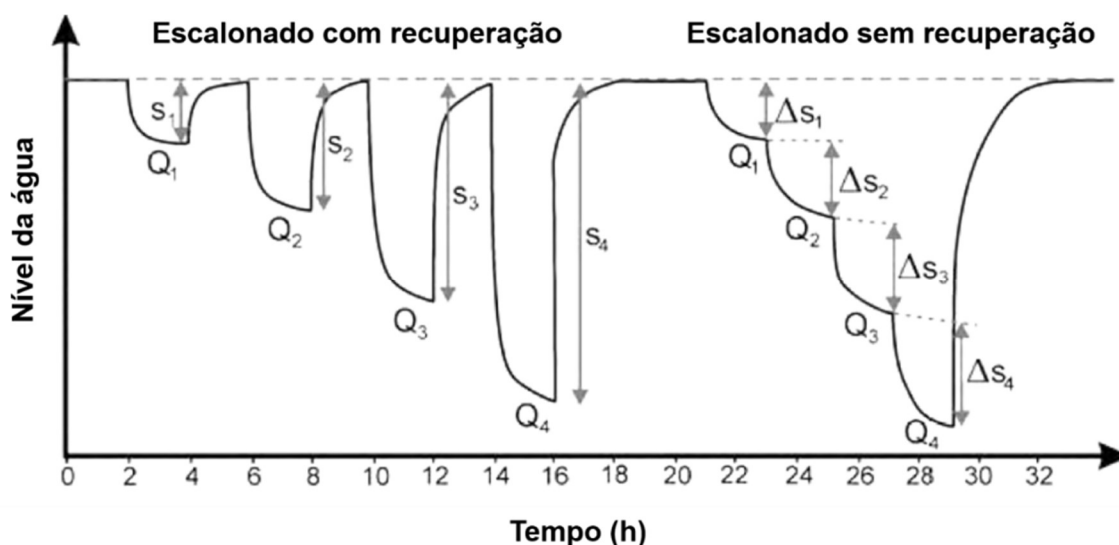


Figura 6.2 - Diagramas esquemáticos dos rebaixamentos em função do tempo nos ensaios escalonados, ilustrando a diferença de com recuperação e sem recuperação.

A vantagem deste regime, é a facilidade de interpretação, a desvantagem é a duração (dois dias de trabalho).

Relativamente ao ensaio escalonado sem recuperação, este é feito de modo contínuo, sem paragens aquando do aumento de escalão, portanto, sem recuperação entre escalões. Assim, como ilustra a figura 6.2, são realizados quatro escalões de duas horas precedido de uma recuperação (tempo total do ensaio 10 a 11 horas). A vantagem deste teste é que pode ser realizado em menos tempo (aproximadamente um dia de trabalho), mas os resultados podem ser mais difíceis de interpretar.

6.1.1.1 Interpretação do Ensaio de caudal escalonado

O ensaio escalonado permite a obtenção de 4, ou mais, coordenadas $(Q_1, s_{w1}) \dots (Q_4, s_{w4})$, onde, $s_{w1} \dots s_{w4}$ são os rebaixamentos no furo de extração (para o tempo Δt_{esc}) correspondentes aos vários escalões 1-4 e onde Δt_{esc} é o tempo de duração do escalão. Se for adotado o ensaio escalonado com recuperação, $s_{w1} \dots s_{w4}$ podem ser deduzidos subtraindo simplesmente o nível de água final ao nível hidrostático no início de cada escalão. No caso do ensaio escalonado sem recuperação, $s_{w1} \dots s_{w4}$ podem ser derivados após correções para qualquer efeito do rebaixamento do escalão prévio (ver figura 6.2). As coordenadas devem ser projetadas num gráfico de caudal *versus* rebaixamento que constitui a curva característica do furo (figura 6.3).

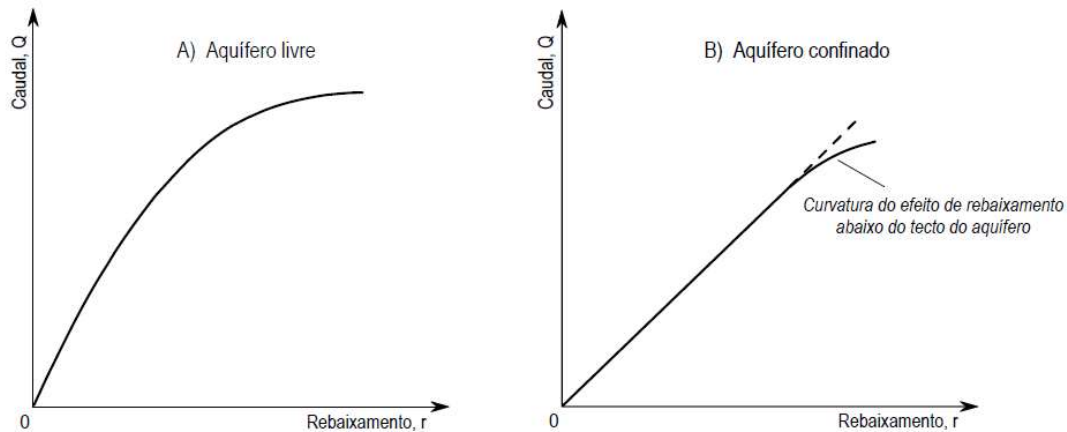


Figura 6.3 - Curvas características teóricas (Instituto Português da Qualidade, I.P. (2012)).

Se a captação satisfaz todas as premissas feitas para a equação 2.9 de Thiem, e se encontra a operar em total eficiência sem turbulência e sem perdas de carga entre o aquífero e a captação, então a curva será uma linha reta com o declive proporcional à transmissividade. No entanto, a realidade é que os pontos $(Q_1, s_{w1}) \dots (Q_4, s_{w4})$ usualmente definem uma curva convexa, de forma a que o rácio caudal específico (Q/s_w) , decresce com o aumento do caudal (Q) .

Deste modo Jacob (1946) sugere que os rebaixamentos observados na captação consistem em duas partes: perdas de carga no aquífero e perdas de carga na captação. As perdas de carga no aquífero (BQ) correspondem aos rebaixamentos teóricos que se esperam, que são diretamente proporcionais aos caudais de extração. Para o caso de aquíferos confinados em regime permanente, as perdas no aquífero podem ser descritas pela equação de Thiem (Equação 2.9). No caso das perdas de carga da captação (CQ^2) estas devem-se à turbulência e a efeitos de fricção, e Jacob sugere que são proporcionais ao quadrado do caudal. Deste modo a equação de Jacob é frequentemente dada por:

$$s_w = BQ + CQ^2 \quad (\text{Eq. 6.2})$$

onde B e C são constantes. Assim,

$$\frac{s_w}{Q} = B + CQ \quad (\text{Eq.6.3})$$

onde, s_w corresponde ao rebaixamento real na captação, Q ao caudal de extração, B e C são coeficientes de perdas no aquífero e na captação respetivamente.

Hantush (1964) e Bierschenk (1963) notaram que, se o rebaixamento específico (s_w/Q) for traçado versus o caudal (Q) , uma linha reta deve resultar, onde o declive é igual a C, e onde a intersecção da recta com o eixo s_w/Q é o B. Com base nos valores das perdas de carga

do aquífero (BQ) e da captação (CQ^2) é possível calcular a eficiência da captação (E_w) em função do caudal de extração (Kruseman e Ridder, 2000):

$$E_w = \left(\frac{BQ}{BQ + \frac{C}{2}} \right) 100\% \quad (\text{Eq.6.4})$$

A eficiência vai decrescer com o aumento de caudal, considerando-se que uma captação possui uma eficiência ótima quando esta apresenta um valor superior a 90% (corresponde ao limite do valor de caudal ótimo de exploração) e uma eficiência aceitável quando apresenta um valor entre 90% a 75% (corresponde ao valor de caudal máximo de exploração. Não é recomendada a utilização de caudais de exploração abaixo de uma eficiência de 75% pois o fluxo em regime laminar poderá não ser assegurado, promovendo-se assim o regime turbulento em redor da captação. Este pode levar ao arraste de materiais finos que podem dar origem à colmatação dos ralos, a danos na bomba submersível, entre outros problemas.

A definição do caudal de exploração pode ser realizada essencialmente de três formas distintas. O primeiro método consiste em projetar o caudal versus rebaixamento sendo o caudal de exploração inferido pela acentuada inflexão da curva do gráfico (Figura 6.4).

O segundo método é mais expedito e consiste em projetar o rebaixamento específico para cada escalão versus o caudal para cada escalão, com o mesmo intervalo de tempo. Os pontos projetados devem seguir uma linha reta. Se os últimos pontos divergem desta tendência por haver um aumento do rebaixamento específico, então o ponto de divergência é o caudal recomendado de exploração. Caso não ocorra divergência, então o maior escalão é o caudal recomendado (ISO 14686:2003).

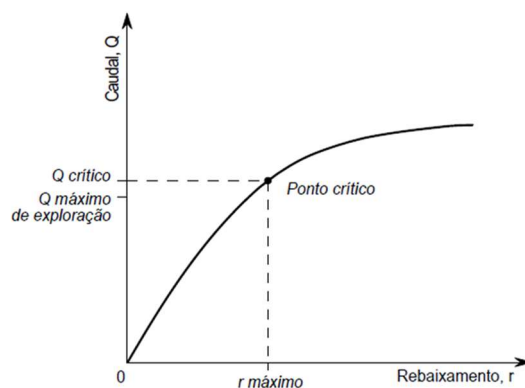


Figura 6.4 - Determinação do caudal crítico e do caudal máximo de exploração a partir da curva característica (Instituto Português da Qualidade, I.P. (2012)).

No que diz respeito ao terceiro método, este é realizado pela construção de um gráfico de curvas características da captação, em que se representam os valores de perdas de carga lineares (BQ) e rebaixamento real (BQ+CQ²) em função dos caudais teóricos de exploração considerados. O valor de caudal ideal de exploração corresponde aproximadamente ao caudal em que se verifica a divergência das duas curvas representadas.

Para a estimação do valor de transmissividade (T) através de um ensaio de caudal escalonado utiliza-se a fórmula de Logan (1964):

$$T = 1.22 \frac{Q}{s_w} \quad (\text{Eq. 6.5})$$

onde, Q/s_w é o caudal específico, que corresponde à razão entre o caudal ideal de exploração (Q_e) e o respetivo rebaixamento (s_p).

6.1.2 Ensaio de bombagem

Os ensaios de bombagem são realizados, com o mesmo caudal ao longo do tempo do ensaio, medindo os rebaixamentos em piezómetros e no próprio furo. O valor do caudal utilizado é geralmente semelhante ao futuro caudal de exploração, e que pode ser definido por ensaio escalonado prévio. Este ensaio é realizado normalmente em situações onde o aquífero a explorar é complexo e não se possui um grande conhecimento sobre o mesmo. Deste modo, torna-se essencial uma abordagem teórica, com o conhecimento dos parâmetros do aquífero, e uma abordagem mais empírica. A título de exemplo, se um furo for dimensionado para extrair dez horas por dia um caudal de 50 l s^{-1} , devemos primeiro realizar um ensaio de dez horas com o respetivo caudal, com o objetivo de demonstrar que os rebaixamentos são aceitáveis e que ocorre a recuperação total antes de se iniciar um novo ciclo de bombagem.

A duração deste ensaio vai depender essencialmente, do tamanho e importância do furo. No entanto, o ensaio a caudal constante dura pelo menos um dia e no máximo dez dias. Porém, em casos em que se pretende captar elevados volumes de água, como por exemplo furos para abastecimento público ou industriais, este ensaio pode-se prolongar por semanas. Contudo, durante esses períodos, um registo de dados com grande espaçamento temporal é usualmente suficiente.

6.1.2.1 Interpretação do ensaio a caudal constante

As simplificações a fazer na interpretação de ensaios de bombagem dependem da situação concreta em presença e da natureza da informação disponível. Assim, de seguida são apresentadas as técnicas de interpretação para o regime variável bem como para o regime permanente.

6.1.2.1 Regime variável

No que diz respeito à interpretação de ensaios em regime variável em aquíferos confinados estes permitem o cálculo dos parâmetros hidráulicos do aquífero utilizando a equação de Theis (Equação 2.7). No entanto esta não é de fácil utilização, por isso, Theis propôs um método mais prático de resolução. Deste modo a solução aproximada para a determinação de S e T é baseada num método gráfico de sobreposição. Prepara-se um gráfico em papel logarítmico de $W(u)$ versus u , gráfico que se designa por curva-tipo. Traça-se depois um gráfico de s versus r^2/t também em papel logarítmico, designado por curva de dados, com valores de s , r e t obtidos no ensaio de bombagem. Sobrepõem-se os dois gráficos, mantendo os eixos coordenados paralelos, ajustando até se encontrar por tentativas uma posição onde a maioria dos pontos observados no ensaio de bombagem se situam sobre a curva-tipo. Escolhe-se então um ponto do qual se obtém as coordenadas s , r^2/t , u , W e, a partir delas, os valores de S e T através da aplicação da equação 2.7 reescrita pela Equação 6.6. No caso dos aquíferos livres no mesmo regime pode ser aplicado este método desde que se cumpram os pressupostos descritos na secção 2.3.1.1 deste relatório.

$$T = \frac{Q}{4\pi s} W(u), \quad S = \frac{4Tt}{r^2 \frac{1}{u}} \quad (\text{Eq.6.6})$$

Este procedimento é bastante trabalhoso e existem diversos programas de computador que resolvem a função do poço, por sucessivas iterações, até à aproximação requerida.

Para aquíferos semiconfinados utiliza-se o método de Walton (1962), realizando-se de forma idêntica ao método de Theis. Traçam-se em papel logarítmico os rebaixamentos em função do tempo com o mesmo ciclo que as curvas teóricas de Walton, a partir das quais se faz o ajuste pela curva de maior coincidência, obtendo-se o valor de r/B . De seguida retira-se as coordenadas de um ponto nas duas folhas logarítmicas [$w(r/B)$ e $1/u$] e [s e t] e aplica-se a equação 2.8 reescrita:

$$T = \frac{QW(u, \frac{r}{B})}{4\pi s}, \quad S = \frac{4Tt}{r^2 S} \quad (\text{Eq.6.7})$$

Onde s corresponde ao rebaixamento, Q é o caudal extraído e T a transmissividade, $W(u, r/B)$ é função do furo varia com o valor de $u, r/B$, sendo uma função auxiliar tabelada, S é o coeficiente de armazenamento, r é a distância do furo ao piezómetro, B o fator de gotejo e t o tempo.

6.1.2.1 Regime permanente

Podemos considerar que se atingiu uma situação de regime permanente quando, após decorrida uma bombagem suficientemente prolongada, as variações dos níveis dinâmicos se tornam insignificantes com o tempo. Nesta situação conhecendo-se os níveis piezométricos iniciais em vários pontos de observação e os rebaixamentos gerados nos mesmos, é possível calcular a transmissividade (T).

Para aquíferos confinados, utiliza-se o método de Thiem (1906) - representam-se em papel semilogarítmico os rebaixamentos observados em função das distâncias ao furo de bombagem e determina-se a variação do rebaixamento (Δs) correspondente a um ciclo logarítmico. O valor da transmissividade é calculado reescrevendo a equação 2.9 como:

$$T = \frac{2.30Q}{2\pi\Delta s} \quad (\text{Eq.6.8})$$

onde, Q corresponde ao caudal e Δs à variação do rebaixamento correspondente a um ciclo logarítmico. No caso dos aquíferos livres pode ser aplicado o mesmo método, no entanto os rebaixamentos têm de ser corrigidos por intermédio da equação 2.10.

Para aquíferos semiconfinados em regime permanente utiliza-se o método de De Glee, (1930), realizando-se de forma idêntica ao método de Theis. Traça-se em papel logarítmico, os rebaixamentos em função da distância ao poço de bombagem, a partir das quais se faz o ajuste pela curva-teórica. De seguida retiram-se as coordenadas de um ponto nas duas folhas logarítmicas [(r/B) e $K_0(r/B)$] e [s e t] e aplica-se a equação 2.11 reescrita:

$$T = \frac{Q}{2\pi s} K_0 \left(\frac{r}{B} \right) \quad (\text{Eq.6.9})$$

6.1.3 Ensaio de recuperação

Quando a bombagem cessa, o nível da água usualmente recupera até ao seu nível inicial. Esta recuperação vai ocorrer mais rapidamente ao início, e mais lentamente à medida que se aproxima do nível hidrostático antes da bombagem. De facto, a curva do ensaio de recuperação é frequentemente (sob condições ideais) o inverso da curva de rebaixamento em condições de bombagem. As curvas de recuperação podem ser mais facilmente analisadas que as curvas de rebaixamento, visto que não estão sujeitas às variações inevitáveis no caudal de extração que frequentemente afetam as fases iniciais dos ensaios de bombagem.

É de salientar que este ensaio, embora não tenha carácter obrigatório, é de execução muito fácil e de grande utilidade para a análise de cenários possíveis de exploração da captação.

6.1.3.1 Interpretação do ensaio de recuperação

Os ensaios de recuperação são correntemente utilizados no estudo dos aquíferos pois podem, em certos casos, ser a única forma de avaliar a sua transmissividade. Tal sucede, por exemplo, quando não se dispõe de piezómetros e as medições são feitas na captação onde se faz a bombagem. O método mais utilizado para a interpretação deste tipo de ensaios é o método de Theis. Este método é de aplicação fácil, no entanto, apenas permite calcular a transmissividade. Além disso, para que o método de recuperação de Theis seja aplicável é necessário que se verifiquem as condições que permitem o emprego da mesma, não sendo geralmente válidas as observações feitas imediatamente após a paragem da bomba. Deste modo projetam-se, em papel semilogarítmico, os pontos correspondentes aos rebaixamentos residuais (s') em função de $(\tau+t)/t$. Onde o rebaixamento residual (s') é ilustrado pela figura 6.5, τ corresponde ao tempo de bombagem e t aos sucessivos tempos de recuperação após paragem da bomba.

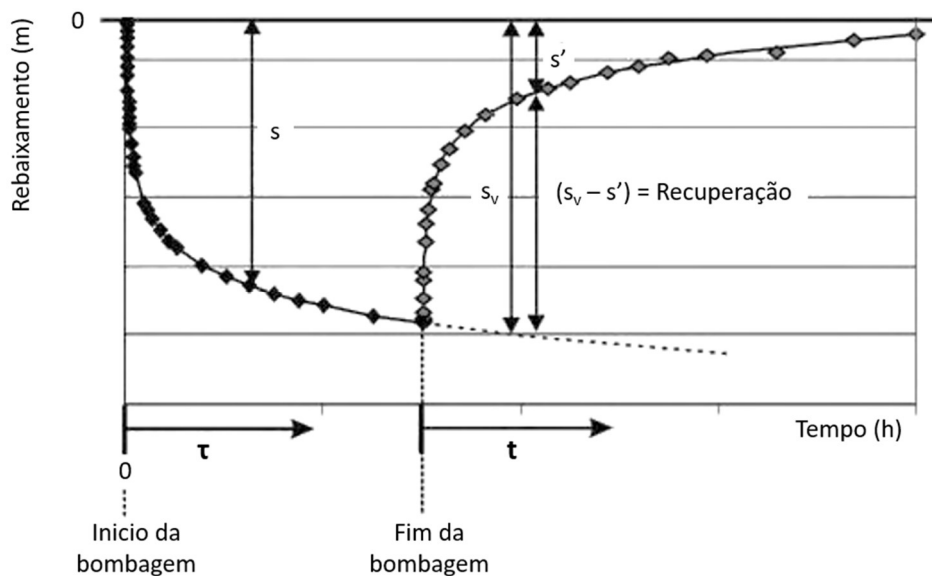


Figura 6.5 - Ensaio de recuperação. Neste diagrama s corresponde ao rebaixamento, s_v ao rebaixamento virtual (rebaixamento se a bombagem continuasse), s' ao rebaixamento residual, τ ao tempo de bombagem e t ao tempo após cessação da bombagem.

Após isto retira-se do gráfico o valor de $\Delta s'$ que corresponde à variação de rebaixamento específico produzido num ciclo logarítmico e aplica-se a equação:

$$T = \frac{0.183Q}{\Delta s'} \quad (\text{Eq.6.10})$$

6.2. Colheita de amostras de água

O processo de colheita de amostras de água para caracterização química e bacteriológica pode ocorrer durante a realização dos ensaios caudal. Neste caso, leituras físico-químicas

in situ e recolhas de amostras de água para análise laboratorial podem ocorrer no final de cada escalão. Tal permite a avaliação da evolução da qualidade da água com o aumento de caudal.

Os parâmetros físico-químicos como a temperatura da água, o pH e a condutividade elétrica, devem ser sempre medidos no terreno, independentemente da finalidade da captação. No que diz respeito as análises laboratoriais, os parâmetros a analisar dependem essencialmente da finalidade da captação. O Decreto-Lei nº 236/98 de 1 de agosto, define os parâmetros a avaliar, os valores máximos admissíveis e recomendados, bem como a periodicidade das análises tendo em conta a finalidade da água. É de salientar, no entanto, que caso a água não apresente qualidade para o uso pretendido, poderão ser instalados sistemas de tratamento de águas físicos ou químicos.

6.3. Dimensionamento do equipamento de bombagem

Por fim, após a construção, o desenvolvimento e os ensaios de bombagem terem sido realizados, o último passo é proceder-se ao dimensionamento e instalação do equipamento de bombagem. É de salientar que, para se conhecer com segurança as características do equipamento de bombagem definitivo a instalar, deve sempre ser feito, e é obrigatório por lei, um ensaio de caudal. Só assim se elimina o risco de colocação de uma bomba sobredimensionada ou subdimensionada.

No caso de uma bomba sobredimensionada, além do maior consumo energético, pode comprometer-se a vida útil da captação devido aos fluxos turbulentos induzidos, podendo ainda verificar-se a inutilização da captação ou da própria bomba pelo súbito ou continuado arrastamento de areias/finos (ou turvação). Na situação de uma bomba subdimensionada não se aproveitam as reais capacidades do conjunto furo/aquífero, que até podem ser superiores às necessidades

Existem vários tipos de bombas para extração, no entanto as mais utilizadas nas captações de água por intermédio de furo são, sem dúvida, as eletrobombas submersíveis. Estas são bombas centrífugas, onde o princípio de funcionamento é a transformação de energia mecânica do motor em energia cinética para o líquido bombeável. Para tal, o motor elétrico, monofásico ou trifásico, provoca a rotação da turbina que impulsiona a água a determinada pressão para a superfície. Cada turbina proporciona uma elevação máxima da água, essa elevação pode ser aumentada montando várias turbinas em série.

O dimensionamento do grupo de bombagem eletrosubmersível, vai depender de vários parâmetros nomeadamente:

- Diâmetro da tubagem de revestimento;
- Caudal de Exploração recomendado;
- Posicionamento dos tubos ralos;
- Altura manométrica (Figura 6.3);
 - Nível hidrodinâmico associado ao caudal de exploração (1);
 - Altura de descarga em relação à superfície do terreno (2);
 - Pressão de descarga (3);
 - Perdas de carga na tubagem, torneiras e curvas (4).

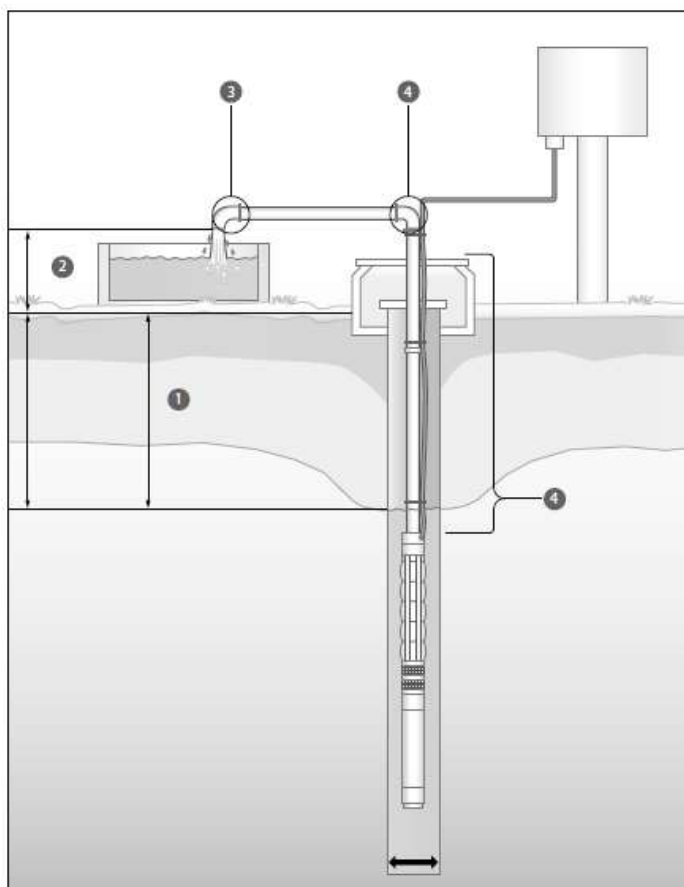


Figura 6.6 - Cálculo da altura manométrica (adaptado do manual Grundfos).

No que diz respeito ao diâmetro do grupo de bombagem eletrosubmersível, é de salientar novamente, que este depende e condiciona o diâmetro da tubagem de revestimento, conforme mencionado na secção 4.2 do presente documento.

O caudal de exploração resulta do ensaio de bombagem juntamente com o rebaixamento associado. É de salientar que por vezes, e em desrespeito pela legislação em vigor e pelas boas práticas técnicas, é utilizado o valor do caudal observado no final da limpeza e desenvolvimento pelo método "air-lift". No entanto, os dados assim obtidos não são

rigorosos nem suficientes para a escolha correta das características dos equipamentos de bombagem a ser instalados para a exploração do furo.

O posicionamento do ralo da bomba deve ser sempre acima ou abaixo da zona dos tubos ralo da captação. No entanto em casos especiais, quando existem vários troços drenantes, tal poderá não ocorrer em relação a todos eles. Este posicionamento tem o objetivo de assegurar que a água é forçada a passar no motor, providenciando um arrefecimento do mesmo. Para além disto, caso a bomba seja instalada na zona dos tubos ralo, pode provocar o arrasto de sedimentos e detritos para a captação danificando o equipamento de extração.

Por fim, calcula-se a altura a que a água tem de ser elevada, que corresponde ao somatório do nível hidrodinâmico associado ao caudal de exploração, a altura de descarga em relação à superfície do terreno, à pressão de descarga e às perdas de carga. O nível hidrodinâmico corresponde à soma do rebaixamento associado ao caudal de exploração com a profundidade do nível hidrostático. No que concerne à pressão de descarga e perdas de carga, estas são calculadas por intermédio de tabelas técnicas específicas fornecidas pelos fabricantes. É de salientar que para o correto funcionamento da bomba, esta deve posicionar-se, com alguma margem de segurança (6 metros), abaixo do nível hidrodinâmico correspondente ao caudal máximo de exploração.

Após estimação prévia dos dados, a seleção da bomba mais adequada pode ser realizada através de softwares ou de tabelas ou curvas de desempenho disponibilizados pelas empresas fabricantes de bombas. Acresce referir que a bomba e respetivos acessórios devem ser selecionados em função das características físico-químicas da água.

A figura 6.7 apresenta o exemplo de seleção de uma bomba Grundfos, para um caudal de $28\text{m}^3/\text{h}$ e uma altura manométrica total de 48 metros. Pela análise das diversas curvas é fácil verificar que caudais baixos resultam em alturas elevadas e caudais elevados resultam em alturas baixas.

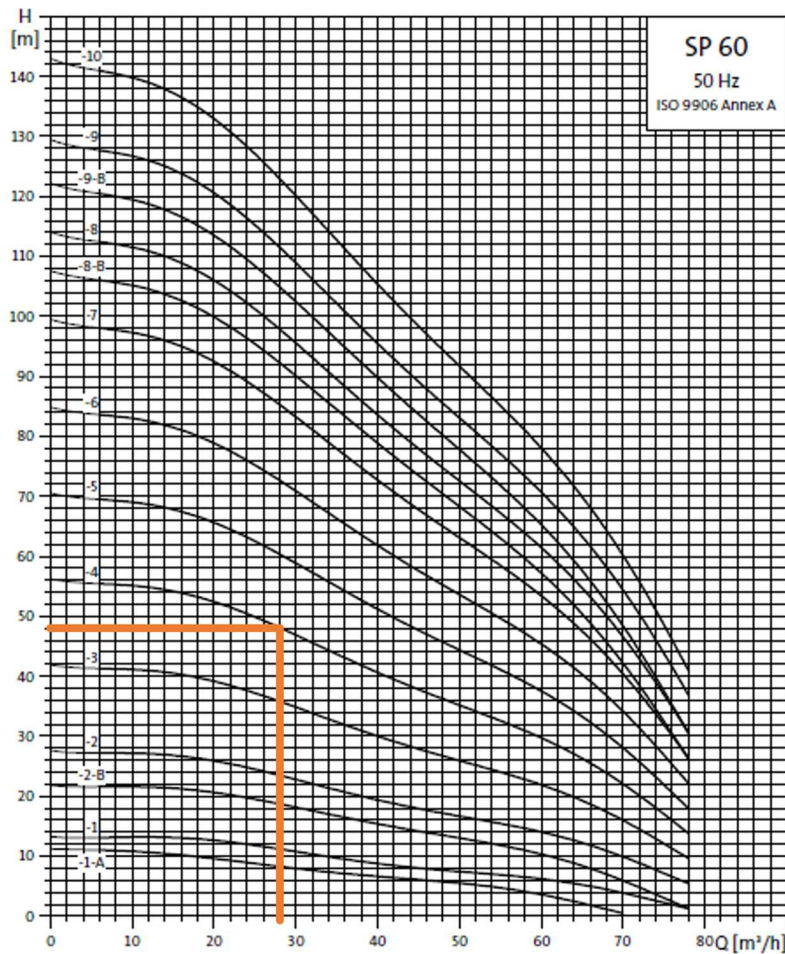


Figura 6.7 - Curvas de desempenho típicas para vários modelos de uma bomba Grundfos SP 60. Seleção da bomba SP 60-4, para um caudal de 28m³/h e uma altura manométrica de 48 metros.

6.4. Relatório final da obra

De acordo com o n.º 1 do artigo 14.º do Decreto-Lei n.º 84/2011, de 20 de junho, o empreiteiro está obrigado a elaborar um relatório técnico para cada trabalho de pesquisa de águas subterrâneas realizado, que deverá ser obrigatoriamente subscrito e assinado pelo diretor de obra devendo ser entregue ao cliente no prazo máximo de 60 dias contados da conclusão dos trabalhos de pesquisa. Com a elaboração deste relatório, dão-se como terminados todos os trabalhos de execução da captação de água subterrânea. Deste relatório, de acordo com o n.º 7 da Portaria 1450/2007, devem fazer parte os seguintes aspetos:

- Localização da obra de captação, com indicação das coordenadas geográficas;
- Indicação do número do processo de licenciamento;
- Datas de início e conclusão dos trabalhos;
- Profundidades, diâmetros e métodos de perfuração utilizados;

- e) Profundidades, diâmetros e natureza dos materiais de revestimento utilizados;
- f) Tipos, posição e material dos tubos ralo;
- g) Profundidades dos níveis estático e dinâmico e respectivos caudais;
- h) Profundidade aconselhada para a colocação do sistema de extração;
- i) Posição, granulometria e natureza do maciço filtrante e outros preenchimentos do espaço anelar;
- j) Procedimento do ensaio de desenvolvimento com indicação do número de horas de ensaio;
- k) Caudal e regime de exploração recomendados;
- l) Análise físico-química e bacteriológica da água captada;
- m) Tabela dos valores medidos nos ensaios de caudal e determinação dos parâmetros hidráulicos;
- n) Observações relativas aos cuidados a tomar na exploração da captação a fim de evitar o envelhecimento prematuro da obra;
- o) Peças desenhadas relativas a:
 - i. Corte litológico dos terrenos atravessados, indicando as profundidades dos mesmos;
 - ii. Perfuração efetuada, referindo diâmetros e profundidades;
 - iii. Profundidades e diâmetros da tubagem de revestimento;
 - iv. Posição dos tubos ralos;
 - v. Preenchimento do espaço anular (maciço filtrante, isolamentos e cimentações);
- p) Outros elementos recolhidos durante os trabalhos;
- q) Constrangimentos ocorridos durante a obra.

6.5. Monitorização e manutenção

Uma vez o furo construído, testado e operacional, as operações de manutenção e monitorização são frequentemente esquecidas. No entanto, tal como qualquer outra obra da engenharia, a captação de água subterrânea deteriora-se ao longo dos anos e necessita de uma manutenção periódica. Para que a manutenção seja eficaz, as causas de deterioração no desempenho da captação devem ser estabelecidas através de monitorização e diagnóstico. Não é só o furo que deve ser considerado, mas sim todo o sistema para a extração da água subterrânea. Isto inclui o aquífero, o sistema de bombagem e qualquer sistema de tratamento e distribuição de água (aqui referido coletivamente como sistema de captação).

6.5.1 Fatores que afetam o desempenho da captação

Os fatores que afetam o desempenho de uma captação de água subterrânea são categorizados de acordo com a natureza do processo envolvido: físico, químico ou

bacteriológico. Outros fatores importantes a considerar são o dimensionamento, construção e operação do sistema de captação. Apesar dos fatores serem apresentados separadamente, é importante salientar que estão todos interligados. O entupimento dos ralos, por exemplo, pode resultar da combinação de processos físicos, químicos e microbiológicos, agravado por má construção e exploração.

Os principais processos físicos são o entupimento e a abrasão. O entupimento do aquífero junto à captação, pode dever-se à mobilização de partículas finas durante a exploração da captação. O maciço filtrante também pode ficar obstruído como resultado de uma mistura de partículas da formação com o material do maciço, talvez devido a um mau dimensionamento ou colocação do mesmo. A migração de detritos provenientes do aquífero e do maciço filtrante podem também levar ao entupimento dos ralos da captação. Uma captação que esteja a extrair água subterrânea com alguns teores de areia, pode também levar ao entupimento do ralo do equipamento de bombagem e acumulações de sedimentos no sistema de distribuição e tratamento.

Em adição ao entupimento, o afluxo de partículas à captação pode levar à abrasão da mesma, do equipamento de bombagem e do sistema de distribuição. Os problemas são normalmente maiores nas zonas com grande velocidade de fluxo nomeadamente, os ralos e as turbinas da bomba.

Os dois principais processos químicos que afetam o desempenho do sistema de captação são a incrustação e a corrosão. Estes, ocorrem frequentemente em conjunto, e são tipicamente associados com atividade microbiológica.

A incrustação pode ser de origem química ou microbiológica. Os materiais de incrustação mais comuns incluem os óxidos e hidróxidos de ferro, carbonatos de cálcio e sulfuretos de ferro. No entanto é de salientar que qualquer incrustação raramente é composta de um único mineral, mas sim por um conjunto em diferentes proporções. A causa da incrustação é a mudança nas condições físicas e químicas entre o corpo do aquífero e a captação que provoca a precipitação dos minerais. Embora estes possam ser encontrados ao longo de todo o sistema da captação, os locais mais prováveis de formação são na zona dos tubos ralo mais superficiais, visto ser uma zona com grandes afluxos de água, e no ralo da bomba. O resultado líquido da incrustação, seja ela puramente química ou envolvendo atividade microbiológica, é usualmente a obstrução do fluxo de água para a captação, provocando uma diminuição na eficiência da mesma.

A captação de água pode também deteriorar-se através do fenómeno da corrosão. Embora a corrosão possa parecer o oposto da incrustação, elas estão intimamente ligadas. A deterioração do furo de captação pode ser resultado da oxidação da tubagem de revestimento, ou de incrustações resultantes de produtos da corrosão. O problema da corrosão química nas águas subterrâneas é complexo, mas os fatores que a determinam são essencialmente a natureza do material corroído, a formação de microambientes na superfície metálica e as propriedades físico-químicas da água. Além disso, a atividade microbiológica também pode ter um papel preponderante na corrosão dos materiais. Embora a corrosão esteja associada normalmente com metais, os revestimentos em plástico podem corroer através do contacto com determinados químicos orgânicos. Os potenciais perigos resultantes da corrosão são:

- Perfuração do revestimento, enfraquecendo a estrutura e permitindo a entrada de água potencialmente indesejada. Em casos mais severos, a estrutura pode estar de tal forma comprometida que o furo colapsa;
- Os ralos podem ser suficientemente corroídos, abrindo os rasgos, permitindo a entrada do maciço filtrante para o furo e danificando o sistema de bombagem.
- Os produtos da corrosão podem obstruir os ralos do mesmo modo que a incrustação.
- O próprio grupo submersível pode ser passível de ser corroído levando à danificação do mesmo.

O desempenho da captação vai também ser influenciado por qualquer alteração dos níveis hidrostáticos regionais da água subterrânea. Sobrebombagem e descidas dos níveis em aquíferos livres pode resultar em significantes descidas da transmissividade e consequentemente no caudal.

6.5.2 Métodos de monitorização do sistema de captação

De forma a poder avaliar qualquer diminuição no desempenho do sistema de captação, e identificar as causas por detrás dessa diminuição, a captação deve ser regularmente monitorizada. Para além disso, a localização e causa de qualquer problema deve ser corretamente diagnosticado.

Os principais parâmetros que devem ser monitorizados para ajudar na identificação de potenciais problemas são: o nível da água, o caudal e a qualidade da água

A frequência de monitorização vai depender essencialmente da finalidade da captação. No entanto, onde não existe um sistema automático de monitorização do nível da água e do caudal, medições manuais devem ser realizadas pelo menos semanalmente. No que diz

respeito à qualidade da água esta deve ser monitorizada de acordo com a legislação em vigor tendo em conta os fins da sua utilização.

Outros métodos de monitorização e diagnóstico incluem a observação direta por filmagem da captação, ensaios de caudal e observação das condições do sistema de extração. No que diz respeito ao último ponto, este deve ser realizado com uma periodicidade de dois anos.

6.5.2.1 Monitorização do desempenho hidráulico

Ensaio escalonado podem ser realizados a períodos regulares de tempo de forma a avaliar o desempenho hidráulico da captação. Deve ser adotado o procedimento para o cálculo das perdas de carga (descrito na secção 6.1.1.1) atual comparando com as perdas calculadas originais da captação. Caso se verifique um aumento do parâmetro (BQ) este pode significar que o aquífero está a sofrer problemas de desempenho como resultado de um decréscimo da transmissividade devido a um rebaixamento generalizado dos níveis de água regionais. No caso do aumento do parâmetro (CQ^2) este poderá indicar uma degradação do estado da captação nomeadamente, entupimentos nos ralos da captação ou do próprio grupo submersível. Com estes parâmetros deve-se calcular a eficiência da captação recorrendo à equação 6.4, a fim comparar com a eficiência original da mesma. No entanto, deve ter-se cuidado ao avaliar tanto os valores das perdas de carga como o da eficiência. Por exemplo, um aumento do coeficiente (B) pode ser devido ao entupimento do aquífero ao invés de um rebaixamento regional.

Alguns autores (incluindo Helweg *et al.*, 1983) recomendam a determinação das alterações na eficiência da captação monitorizando o caudal específico da mesma e comparando-o com o original. Podendo estas mudanças na eficiência ser calculadas pela fórmula:

$$Eficiência = \frac{Qe_a}{Qe_o} * 100\% \quad (Eq.6.11)$$

onde Qe_a corresponde ao caudal específico atual e Qe_o ao caudal específico original determinado pelo ensaio escalonado.

6.5.2.2 Registo ótico do interior da captação

A filmagem do interior da captação pode providenciar informações muito úteis sobre o estado da mesma, e sobre os processos que a possam estar a afetar adversamente. Na grande maioria dos casos é necessário retirar o grupo submersível de forma a providenciar espaço suficiente para o equipamento de filmagem. Neste processo, deve-se ter especial cuidado de forma a minimizar ao máximo a agitação da água no interior da captação. Isto deve-se ao facto de, ao retirar o grupo submersível poder ocorrer remoção de incrustações

das paredes da tubagem de revestimento, provocando turvação da água e consequentes dificuldades de visualização.

Este método de monitorização é muito útil pois providencia informações relativamente ao estado da tubagem e dos ralos, identificando a presença de corrosão e/ou incrustação (Figura 6.8). Para além disto, este método de monitorização é muito útil para identificar o grau de colmatagem dos ralos (Figuras 6.9 e 6.10), verificando se existe a necessidade de se adotar processos de reabilitação.



Figura 6.8 - Corrosão da tubagem ocorrendo a perfuração da mesma.

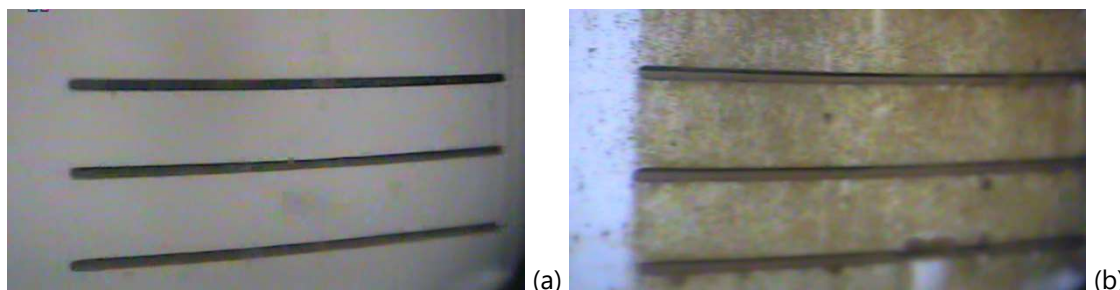


Figura 6.9 - Ralos em tubagem de plástico rasgados por corte. (a) Ralos Limpos; (b) Ralos bastante colmatados

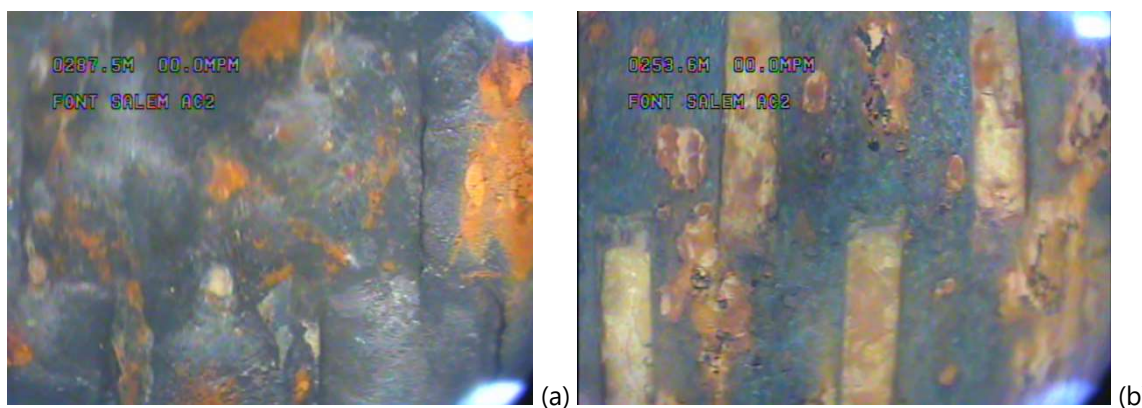


Figura 6.10 - Ralos em tubagem de ferro com estrutura em ponte. (a) Ralos produtivos; (b) Ralos bastante colmatados.

6.5.3 Manutenção e reabilitação

A manutenção é uma parte essencial do sistema de captação de água subterrânea, e uma correta manutenção depende da realização de procedimentos corretos de monitorização. Uma manutenção preventiva envolve a limpeza periódica da captação e outras ações de forma a preservar o desempenho original da mesma. Por outro lado, a reabilitação é o processo de tentar restaurar as características iniciais da captação após a mesma já se encontrar algo deteriorada. As técnicas utilizadas na manutenção e reabilitação são bastante similares, a diferença é a extensão em que são utilizadas. Por exemplo, se as incrustações já tiveram tempo para recristalizar, vai ser muito mais difícil de as remover do que seria se elas estivessem ainda no seu estado inicial de formação. É de salientar que uma manutenção regular tem maior probabilidade de ser bem-sucedida em preservar as condições originais da captação que uma reabilitação ocasional.

Os métodos de manutenção mais usados são os mesmos que aplicados no desenvolvimento da captação, sendo o método *air lift* o mais usado. No entanto, para além destes, a escovagem e a acidificação podem também obter bons resultados.

A escovagem consiste num método mecânico de remoção de incrustações nas paredes do furo. Este método utiliza escovas cilíndricas de nylon ou aço, com diâmetro ligeiramente superior ao diâmetro interno da captação. Estas escovas ao serem rodadas através da cabeça de rotação vão limpando a captação à medida que são descidas ao longo da tubagem de revestimento (Figura 6.11).

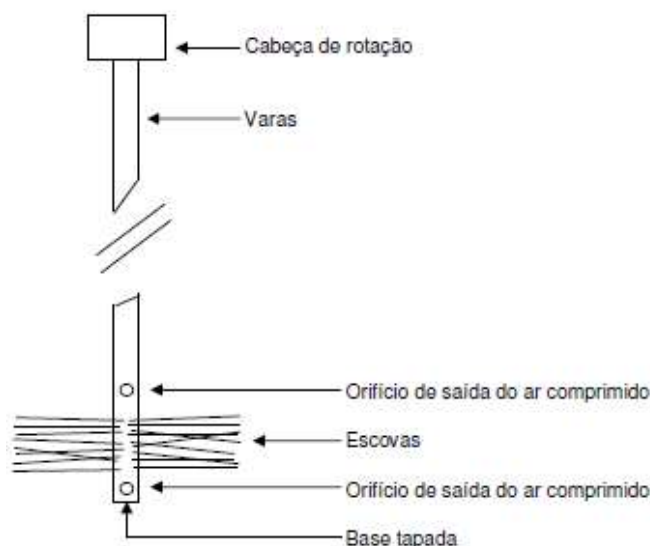


Figura 6.11 - Esquema do dispositivo das escovas de limpeza e fotografia de uma escova de limpeza.

A acidificação envolve o uso de ácido clorídrico (HCl) ou amido-sulfúrico (H_3NO_3S) de modo a dissolver as incrustações de carbonato de cálcio. No entanto, ácidos como o amido-sulfúrico, oxálico ($C_2H_2O_4$) e o ascórbico ($C_6H_8O_6$) (Houben, 2003), podem também ser usados para dissolver as incrustações de óxidos de ferro. Porém, a solubilidade destes depósitos é muito reduzida, principalmente quando já sofreram recristalização. No caso de incrustações bastante endurecidas, a reabilitação depende da capacidade de partir as mesmas com métodos físicos ou hidráulicos de forma a permitir um melhor acesso ao ácido. Deve-se ter cuidado, na utilização de métodos vigorosos como o *jetting* e o *air-lift*, de modo a não danificar a tubagem de revestimento. No que diz respeito ao *jetting* a alta pressão, este pode mesmo cortar plástico, devendo só ser utilizado em tubagens de aço.

Assim, o programa de manutenção e reabilitação vai depender dos resultados da monitorização, mas, tipicamente envolve as seguintes etapas:

1. Avaliação do desempenho hidráulico da captação e comparação com o desempenho inicial aquando da construção da captação;
2. Verificação da qualidade da água e dos sólidos em suspensão;
3. Remoção do grupo submersível para inspeção e reparação;
 - a. Desmontagem e inspeção de forma a identificar problemas de entupimento ou corrosão;
 - b. Lubrificação das partes móveis;
 - c. Substituição de rotina de certos elementos propícios ao desgaste;
 - d. Substituição de outros componentes desgastados ou danificados.
4. Inspeção visual com câmara de filmar a fim de identificar zonas de colmatação dos ralos, corrosão ou incrustação;
5. Limpeza da captação e dos ralos com escovagem;
6. Remoção dos detritos resultantes por air lift;
7. Acidificação ou outro tratamento químico;
8. Remoção dos químicos por bombagem
9. Desinfecção do furo com hipoclorito ou outro desinfetante;
10. Reposição da Bomba;
11. Ensaio de caudal para verificar as melhorias do desempenho.

No caso de a captação apresentar um elevado grau de deterioração e risco de colapso recomenda-se a selagem da mesma de acordo com as normas legais em vigor, e a realização de uma nova captação.

Capítulo 7 – Casos de Estudo

Neste capítulo abordam-se em detalhe algumas das obras acompanhadas pelo estagiário durante o estágio na empresa Sondalis.

7.1. Pesquisa e Execução de captações

De seguida são apresentadas duas construções de captações em sistemas aquíferos distintos.

7.1.1 Captação SL1 Covões

O local onde foram realizados os estudos de pesquisa e posterior transformação em captação de água, situa-se em Covões, freguesia de Aljubarrota (Prazeres), pertencente ao concelho de Alcobaça.

Realizaram-se os estudos de pesquisa com o objetivo de definir o local potencialmente mais produtivo tendo em conta zona onde se insere o prédio do cliente. Deste modo, verifica-se que a propriedade é abrangida pela carta geológica 26-B de Alcobaça (França *et al.*, 1961), inserindo-se nas formações jurássico superior que podem atingir os 700m de espessura. Estas são constituídas por calcários cinzentos, frequentemente fossilíferos com diferentes graus de compactação. A nível hidrogeológico, estamos na presença de um sistema aquífero cársico de grande complexidade denominado Maciço Calcário Estremenho. Este sistema pode, em certos casos, fornecer caudais avultados, no entanto é de grande irregularidade. Para além disto é de salientar que neste sistema os níveis hidrostáticos podem estar a grande profundidade. Concluída a fase de pesquisa de gabinete, procedeu-se a um reconhecimento do terreno de forma a verificar possíveis constrangimentos e falar com o cliente com o objetivo de saber as necessidades hídricas previstas. Conclui-se desta forma que o cliente necessita de um caudal aproximado de 5 m³/h, sendo a água utilizada para fins de regadio.

Após concluída a fase de pesquisa, procedeu-se ao dimensionamento e orçamento da captação. Deste modo, sabendo que o cliente não necessita de caudais superiores a 10m³/h e que a água se destina a rega, recomenda-se a instalação de tubagem de revestimento em PVC-u roscado, com o diâmetro de 140mm e espessura de parede de 7mm. Visto tratarem-se de rochas competentes, calcários em diferentes graus de compactação, recomenda-se a utilização do método de perfuração roto percussivo. A perfuração poderá ser realizada com um martelo com diâmetro de 7" visto que o maciço filtrante não necessita de ser tão espesso como em aquíferos não consolidados. A profundidade da sondagem está condicionada ao

facto de se encontrar em profundidade fraturas ou cavernas que sejam produtivas, estimando-se assim uma profundidade de 150 metros. Com base nestes dados elaborou-se o orçamento para o cliente. Com a aprovação do orçamento procedeu-se ao pedido de licenciamento e após o mesmo ter sido deferido, deu-se início aos trabalhos.

Durante a furação foram observadas e recolhidas amostras, sendo posteriormente depositadas, numa zona limpa, de acordo com a profundidade de proveniência. De seguida foi realizada a descrição litológica das amostras recolhidas e, por conseguinte, a elaboração da coluna estratigráfica dos terrenos atravessados pelo furo (Anexo nº1), tendo sido atravessados essencialmente calcários (Tabela 7.1). Tendo por base a amostragem e sabendo que se atingiu um veio produtivo aos 135 metros, colocaram-se os tubos ralo às profundidades descritas na tabela 7.1.

Tabela 7.1 - Amostragem e posicionamento dos tubos ralos na captação SL1 Covões

<i>Topo (m)</i>	<i>Base (m)</i>	<i>Litologia</i>	<i>Tubos ralo (m)</i>
0	25	Calcário	-
25	34	Calcário Fraturado	-
34	95	Calcário	-
95	97	Calcário Fraturado	-
97	140	Calcário	[131-137]
140	150	Calcário Fraturado	[143-149]

A coluna de revestimento deste furo caracteriza-se por ser em tubos de PVC-u da marca TuboFuro®, modelo Georoscado. Tal como o nome do produto sugere, apresenta uniões roscadas, tendo 6 metros de comprimento cada tubo aplicado. Após instalação da tubagem de revestimento, procedeu-se à construção de um maciço filtrante desde a profundidade final de furação (150metros) até cerca dos 13 metros de profundidade, composto por seixo calibrado, de natureza siliciosa, esfericidade elevada e granulometria entre 4 a 8 mm.

A construção do maciço filtrante, colocação do seixo no espaço anular, foi realizada de forma lenta e gradual para não afetar a sua continuidade. Para além deste, foi aplicado um isolamento com *pellets* de compactonite aos 10 aos 13 metros com objetivo de proteger a captação de potenciais contaminantes juntamente com o material argiloso colocado dos 10 metros até à superfície.

A operação de limpeza e desenvolvimento da captação foi realizada pelo método hidromecânico de injeção de ar-comprimido no furo ("ar-lift") a intervalos de 20 minutos por hora, durante um período total de 6 horas. Nos primeiros intervalos de realização desta operação, a água extraída apresentava-se turva, constatando-se uma diminuição gradual

da turvação até que no final a água apresentava-se limpa e sem finos. Deste modo deu-se por terminada a construção da captação.

7.1.2 Captação SL6 São Romão

O local onde foram realizados os estudos de pesquisa e posterior transformação em captação de água, situa-se em São Romão, freguesia de Pousos, pertencente ao concelho de Leiria.

Realizaram-se os estudos de pesquisa com o objetivo de definir o local potencialmente mais produtivo tendo em conta os limites da propriedade do cliente. A área é abrangida pela carta geológica 23-C de Leiria (Teixeira *et al.*, 1968), inserindo-se nas formações do cretácico inferior. Estas apresentam uma espessura aproximada de 200 metros e são constituídas por arenitos argilosos, mais ou menos grosseiros, com passagens conglomeráticas e lenticulas argilosas. Em profundidade esta formação dá lugar ao Complexo Carbonatado: margas, calcários margosos, calcários compactos, com espessura da ordem dos 50 m. A nível hidrogeológico, estamos na presença de um sistema aquífero poroso denominado Pousos-Caranguejeira. Este sistema fornece geralmente caudais fracos, tratando-se de águas relativamente superficiais. Concluída a fase de pesquisa de gabinete, procedeu-se a um reconhecimento do terreno de forma a verificar possíveis constrangimentos e falar com o cliente com o objetivo de saber as necessidades hídricas previstas. Conclui-se desta forma que o cliente necessita de um caudal aproximado de 7 m³/h, sendo a água utilizada para fins de regadio.

Após concluída a fase de pesquisa, procedeu-se ao dimensionamento e orçamento da captação. Deste modo, sabendo que o cliente não necessita de caudais superiores a 7m³/h e que a água se destina a rega, recomenda-se a instalação de tubagem de revestimento em PVC-u roscado, com o diâmetro de 140mm e espessura de parede de 7mm.

Como as litologias prováveis de se encontrar são alternâncias de formações geológicas compostas por níveis arenosos e argilosos lenticulares, recomenda-se a utilização do método de circulação direta com um diâmetro de 8.5". Este permite uma espessura suficiente de seixo calibrado de forma a proceder a uma correta filtragem da água que afluí à captação. É de salientar que até aos 2 metros é alargar a perfuração para 300mm a fim de se aplicar um tubo de proteção de 250mm com espessura de parede de 9,6mm, com o objetivo de evitar o colapso da camada superficial. A profundidade prevista da sondagem nesta obra será de aproximadamente 150 metros. A seleção desta profundidade deve-se

essencialmente ao conhecimento prévio por parte da empresa das condições geológicas regionais. Com base nestes dados elaborou-se o orçamento para o cliente. Com a aprovação do orçamento procedeu-se ao pedido de licenciamento e após o mesmo ter sido deferido, deram-se início aos trabalhos.

Os fluidos de sondagem utilizados nesta obra foram controlados através da medição de alguns parâmetros (Tabela 7.2). das lamas verificando-se que se encontravam nos valores adequados às formações.

Tabela 7.2 - Parâmetros dos fluidos de sondagem medidos

<i>Parâmetros</i>	<i>Valores Obtidos</i>	<i>Valores Recomendados</i>
<i>pH</i>	7.40	-
<i>Viscosidade (s)</i>	32	30 – 45 ¹
<i>Densidade (g/cm³)</i>	1.2	1 – 1.2 ¹

¹ Valores recomendados para as litologias encontradas

Durante a furação foram observadas e recolhidas amostras, sendo posteriormente depositadas, numa zona limpa de acordo com a profundidade de proveniência. De seguida foi realizada a descrição litológica das amostras recolhidas e, por conseguinte, a elaboração da coluna estratigráfica dos terrenos atravessados pelo furo (Anexo nº2), tendo sido atravessados essencialmente detríticos (Tabela 7.1). Tendo por base a amostragem e sabendo que se atingiu um veio produtivo aos 135 metros, colocaram-se os tubos ralo às profundidades descritas na tabela 7.1.

Tabela 7.3 - Amostragem e posicionamento dos tubos ralos na captação SL6 São Romão.

<i>Topo (m)</i>	<i>Base (m)</i>	<i>Litologia</i>	<i>Tubos ralo</i>
0	14	Areia fina	-
14	25	Argila vermelha	-
25	38	Areia argilosa	-
38	75	Argila Vermelha	
75	77	Areia Argilosa	[72 - 78]
77	85	Argila vermelha	
85	91	Areia argilosa	
91	94	Areia média	[90 – 96]
94	101	Argila vermelha	
101	106	Areia média	
106	120	Argila vermelha	[102 – 108]
120	126	Areia média	
126	131	Argila vermelha	[120 – 126]

A coluna de revestimento deste furo caracteriza-se por ser em tubos de PVC-u da marca TuboFuro®, modelo Georoscado. Tal como o nome do produto sugere, apresenta uniões roscadas, tendo 6 metros de comprimento cada tubo aplicado. Após instalação da tubagem de revestimento, procedeu-se à construção de um maciço filtrante desde a profundidade final de furação (131 metros) até cerca dos 32 metros de profundidade, composto por seixo calibrado, de natureza siliciosa, esfericidade elevada e granulometria entre 4 a 8 mm. Na construção do maciço filtrante, colocação do seixo no espaço anular foi realizada de forma lenta e gradual para não afetar a sua continuidade. Para além deste, foi aplicado um isolamento com *pellets* de compactonite dos 30 aos 31 metros com objetivo de proteger a captação de potenciais contaminantes juntamente com o material argiloso colocado dos 30 metros até à superfície.

A operação de limpeza e desenvolvimento da captação foi realizada pelo método hidromecânico de injeção de ar-comprimido no furo ("ar-lift") a intervalos de 20 minutos por hora, durante um período total de 6 horas. Nos primeiros intervalos de realização desta operação, a água extraída apresentava-se turva, constatando-se uma diminuição gradual da turvação até que no final a água apresentava-se limpa e sem finos. Deste modo deu-se por terminada a construção da captação.

7.2. Diagrafias CA3 - Colmeias

De seguida aborda-se um exemplo de uma diagrafia levada a cabo na zona de Agodim freguesia de Colmeias. Efetuaram-se registos de radiação gama natural (NGAM), do potencial espontâneo (SP), resistividade normal longa (64") e normal curta (16") e de resistência pontual (SPR) Anexo 3. A sondagem atravessa a totalidade do complexo detrítico do cretácico superior alcançando o complexo carbonatado do cretácico inferior. As características gerais da sondagem e das diagrafias efetuadas são as seguintes:

- Características da sondagem:
 - Profundidade: 259m
 - Diâmetros de perfuração: 350mm
 - Coluna de revestimento:
 - Aço Carbono 323 mm: 0 aos 102m
 - PVC-u Georoscado 200mm dos 0 aos 259m
- Características das diagrafias
 - Escala vertical: 1:200
 - Sentido: ascendente
- Radiação gama natural (NGAM)

- Início: 200 metros
 - Final: 20 metros
- Potencial espontâneo (SP)
 - Início: 200 metros
 - Final: 20 metros
 - Escala: 320mV/cm
- Resistência monoeletródica (SPR)
 - Início: 200 metros
 - Final: 20
 - Escala: 42ohm
- Resistividade normal longa (64") e curta (16")
 - Início: 200 metros
 - Final: 20
 - Escala: 42ohm/cm

Antes de iniciar a interpretação é de salientar que a sondagem se encontra entubada até aos 102 metros com tubo de aço carbono, não sendo possível a correta aquisição das diagrfias elétricas até esta profundidade. Deste modo, procede-se à interpretação das mesmas a partir desta profundidade.

Sendo assim, com base na interpretação das diagrfias e na amostragem litológica, é possível a detetar dois conjuntos multicamada bem refletidos nas diagrfias. Estes são constituídos predominantemente por níveis de arenitos e areias conglomeráticas interestratificadas com camadas argilosas das quais se podem considerar dois conjuntos aquíferos.

As deflexões positivas da resistividade pontual indicam as áreas potencialmente permeáveis. Os registos de resistividade normal longa e a curta, apresentam contraste resultante da alta resistividade da água de formação em relação à resistividade inferior da zona invadida. O registo da radiação gama natural permite apreciar tramos argilosos intercalados, representados por alta atividade, nos conjuntos permeáveis. É também de salientar a alta atividade detetada entre os 25 e os 50 metros devida ao alto conteúdo de micas nessas camadas argilosas.

Na tabela 7.4 são apresentados os níveis alvo/horizontes potencialmente produtivos tendo por base as diagrfias e a amostragem. Estes são os níveis com maior potencial para a colocação dos tubos-ralo.

Tabela 7.4 - Intervalos de profundidade dos tramos permeáveis

<i>Topo (m)</i>	<i>Base (m)</i>
99	113
115	122
124	127
129	145
154	160
163	170
175	178

7.3. Ensaios de caudal (escalonado) SL1-Vila Nova de Santo André

No sentido de determinar o caudal recomendado de exploração da captação SL1-Vila Nova de Santo André, foi programado um ensaio de caudal escalonado na referida captação. O ensaio foi sem recuperação, com dois escalões crescentes de caudal (40 e 57 m³/h), como ilustra o gráfico da figura 7.1. Nesta obra não foi possível obter os 4 escalões recomendados devido a problemas técnicos.

O resumo dos rebaixamentos medidos para cada escalão de extração ensaiado foi o seguinte:

- Início do ensaio – Nível hidrostático = 28,2m
- Escalão 1 – Q1=40m³/h (duração 450 min); Nível hidrodinâmico = 46,15 m; rebaixamento = 17,95m
- Escalão 1 – Q1=57m³/h (duração 450 min); Nível hidrodinâmico = 56,7 m; rebaixamento = 28,5m

Apesar de os resultados serem de qualidade inferior ao desejável, com os dados disponíveis procedeu-se à interpretação dos mesmos por dois métodos descritos na secção 6.1.1.1 do presente documento. O segundo método descrito não foi aplicado visto não existem dados suficientes para a sua interpretação. O registo dos rebaixamentos medidos durante o ensaio está em anexo (Anexo nº2), tendo sido projetados os valores dos rebaixamentos medidos ao longo do tempo de realização, no gráfico correspondente (Fig. 7.1):

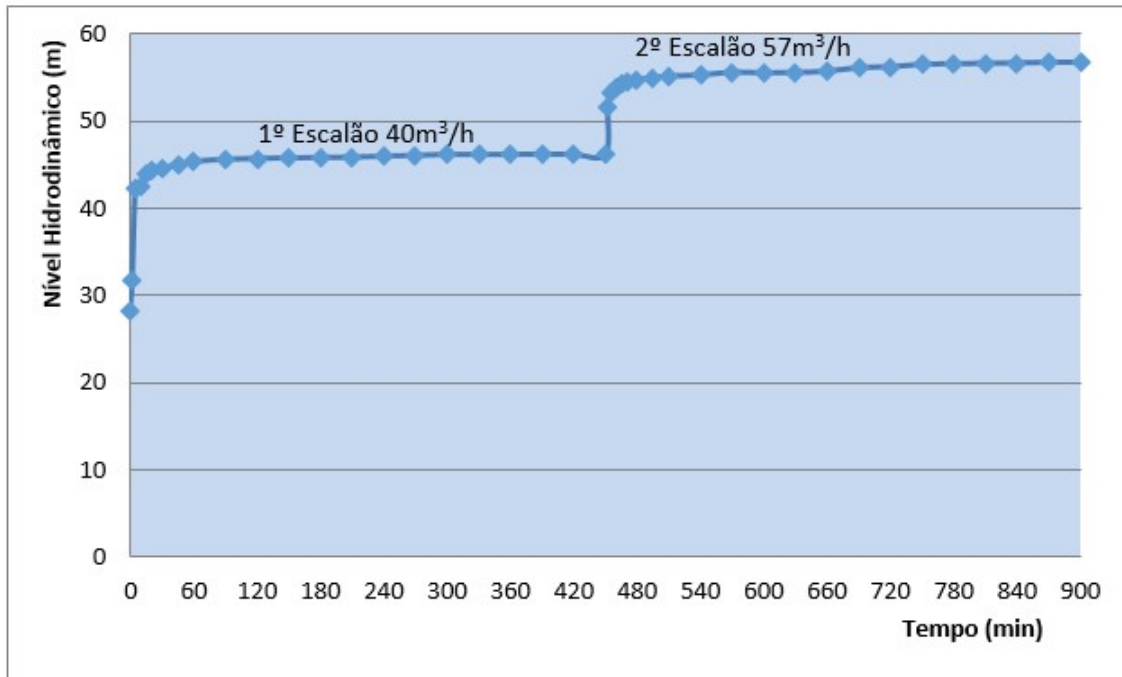


Figura 7.1 - Rebaixamentos medidos no furo em relação à duração do ensaio.

Os dados do ensaio para cada escalão considerado, em termo de valores da duração, caudais extraídos, rebaixamentos e rebaixamentos específicos encontram-se na tabela 7.4:

Tabela 7.5 - Resumo do caudal, rebaixamento e rebaixamento específico para os dois escalões testados

Escalão	$t(\text{min})$	$Q(\text{m}^3/\text{h})$	$Q(\text{l/s})$	$s_w(\text{m})$	$s_w/Q (\text{h}/\text{m}^2)$
1	450	40	11.1	17,95	0,45
2	450	57	15.8	28,5	0,50

O primeiro método consiste em projetar os caudais em relação aos rebaixamentos gerados como ilustra a figura 7.2. Pela análise da mesma, verifica-se que o caudal de exploração é de aproximadamente 40 m³/h. Este valor corresponde a um valor ligeiramente inferior ao ponto de inflexão da curva.

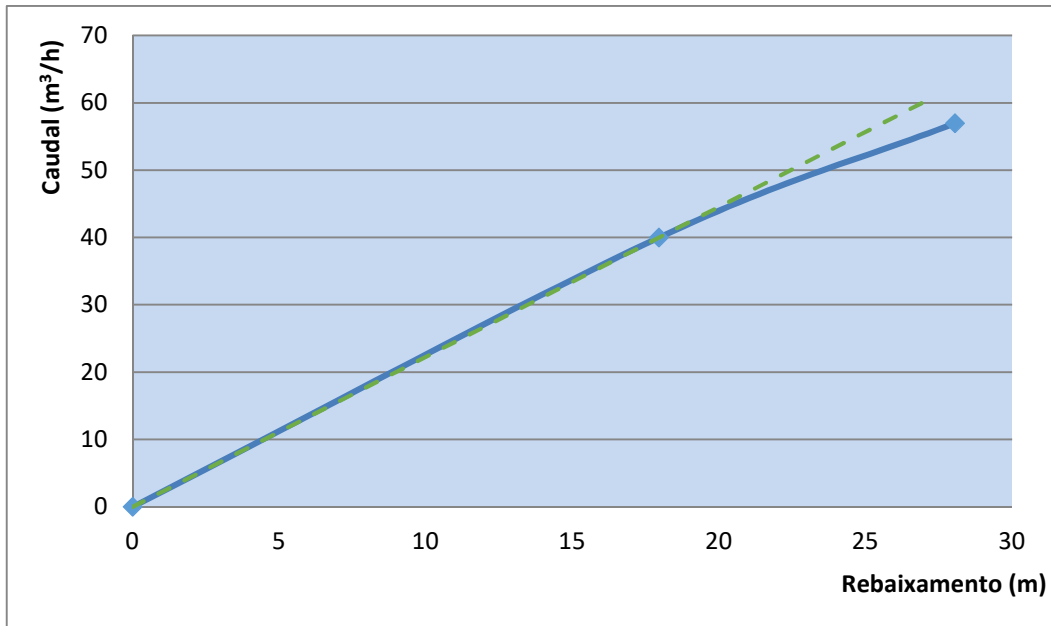


Figura 7.2 - Caudal em função do rebaixamento gerado.

Por fim procedeu-se a execução ao segundo método que se inicia com o cálculo do valor da eficiência da captação para diversos caudais teóricos bem como a estimação do valor da transmissividade do aquífero. Deste modo, projetaram-se os valores de rebaixamentos específicos (s_w/Q) em relação ao caudal (Figura 7.3).

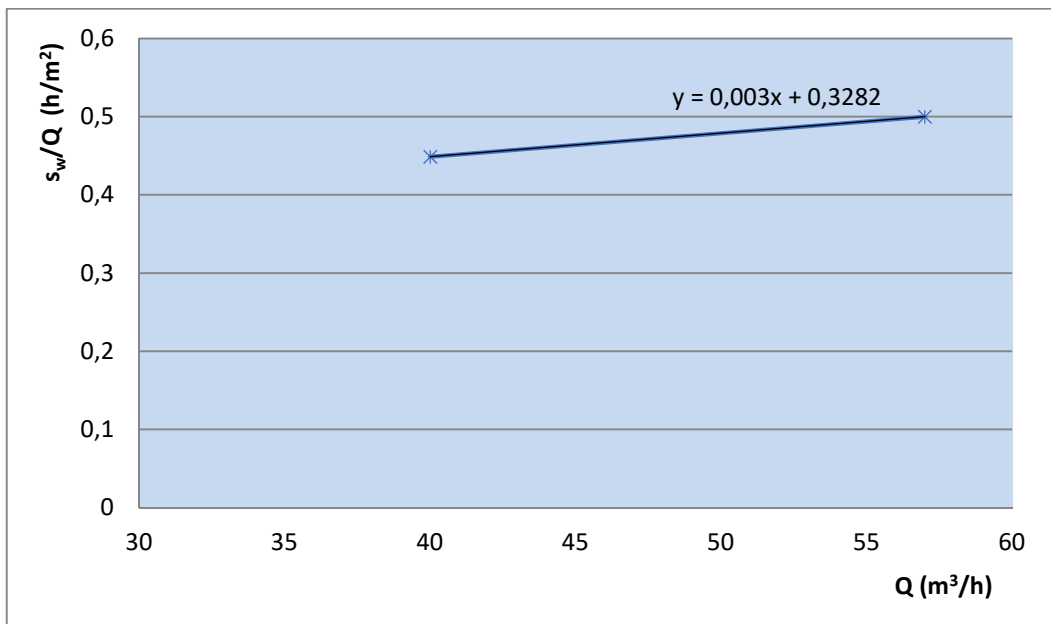


Figura 7.3 - Rebaixamento específico vs Caudal.

Os valores para o cálculo das perdas de carga, lineares (B) e quadráticas (C), a utilizar na equação dos rebaixamentos: $s_w=BQ+CQ^2$, foram obtidos, respetivamente pela

correspondência entre os valores da ordenada na origem e declive da equação da reta mais provável relativamente aos pontos representados no gráfico anterior ($y=0.003x+0,3282$):

$$(B) = 0,3282 \text{ h/m}^2$$

$$(C) = 0.003$$

Assim, para esta captação, a fórmula dos rebaixamentos (s_w) em função do caudal extraído é a seguinte:

$$s_w = 0,3282Q + 0.003Q^2$$

Para o cálculo da eficiência da captação (E_w), foi considerada uma gama de caudais teóricos de exploração (desde 2 a 22 m³/h) (Tabela 7.5).

Analisando o gráfico de curvas características apresentado na figura 7.4, foi considerado um caudal de exploração que deverá corresponder a aproximadamente de 6 m³/h (correspondente ao ponto de divergência), tendo a captação uma eficiência de 94,08% para esse valor de caudal. No entanto há que salvaguardar que estes valores podem não ser considerados válidos, tendo em conta que o ensaio foi interrompido ao fim de dois escalões de extração, não podendo assim ser considerado um ensaio completo.

Tabela 7.6 - Cálculo da eficiência da captação para diferentes caudais teóricos de exploração.

Q(m ³ /h)	BQ	CQ ²	BQ+CQ ²	BQ/(BQ+CQ ²)	E _w (%)
2	0,6564	0,012	0,6684	0,982046679	98,20467
4	1,3128	0,048	1,3608	0,964726631	96,47266
6	1,9692	0,108	2,0772	0,948006932	94,80069
8	2,6256	0,192	2,8176	0,931856899	93,18569
10	3,282	0,3	3,582	0,916247906	91,62479
12	3,9384	0,432	4,3704	0,901153213	90,11532
14	4,5948	0,588	5,1828	0,886547812	88,65478
16	5,2512	0,768	6,0192	0,872408293	87,24083
18	5,9076	0,972	6,8796	0,858712716	85,87127
20	6,564	1,2	7,764	0,845440495	84,54405
22	7,2204	1,452	8,6724	0,832572298	83,25723

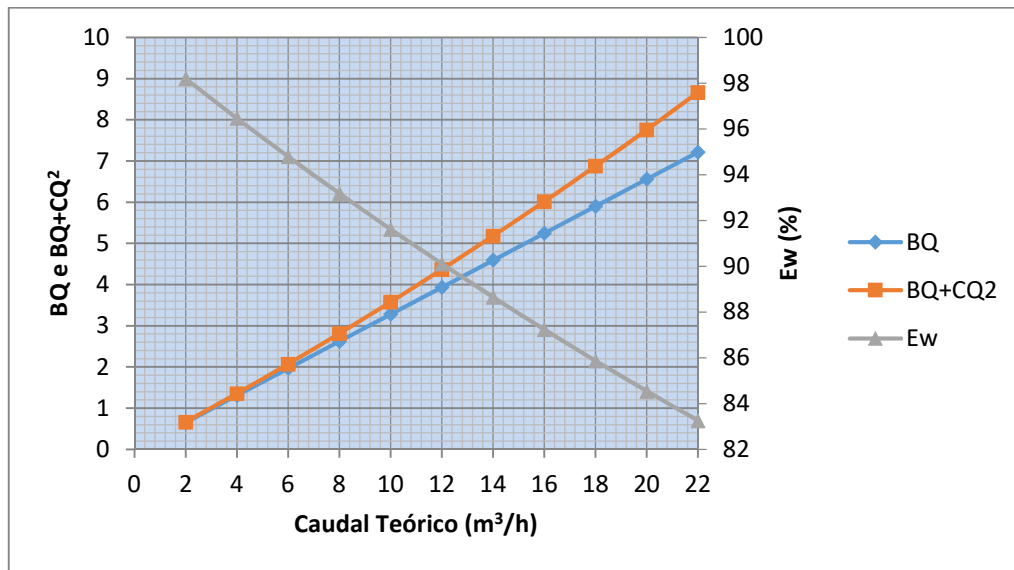


Figura 7.4 - Representação gráfica das curvas características da captação: perdas de carga lineares (BQ, a azul), rebaixamento (BQ+CQ2, a vermelho) em função de diversos caudais teóricos de exploração e a respetiva eficiência da captação (Ew, a verde).

A estimativa para o valor de transmissividade do aquífero de acordo com a fórmula de Logan (1964), para o caudal de exploração anteriormente considerado, tendo em conta o caudal específico é igual a:

$$T = 1.22 \frac{6}{2,0772} \leftrightarrow T = 3.524 \text{ m}^2\text{d}^{-1} \leftrightarrow T = 84\text{m}^2\text{d}^{-1}$$

Apesar de todas as condicionantes, o valor de transmissividade obtido encontra-se dentro do intervalo de valores de transmissividade (44 e 1118 m^2d^{-1}) mais frequentes, estimadas por Almeida et al. (2000) para as captações no mesmo sistema aquífero que a captação em estudo.

Capítulo 8 – Considerações finais

Como mencionado nos capítulos iniciais do presente documento relativamente à pesquisa, dimensionamento e construção de captações de águas subterrâneas, estes podem ser processos morosos, cuja maior ou menor complexidade resultam essencialmente da finalidade da captação. Em todos os casos, devem ser obras devidamente planeadas, tanto pela empresa construtora como pelo dono de obra. A fase de pesquisa é essencial para o dimensionamento correto da captação a executar face aos caudais de extração necessários.

Apesar da ocorrência de uma crescente consciencialização das empresas que realizam a prospeção e pesquisa de águas subterrâneas, deve-se ter em conta que nem todas elas apresentam a aptidão, em termos de meios materiais, humanos e de conhecimentos, para a execução de furos de captação de águas subterrâneas para todas as finalidades.

É necessário ter em consideração que, quando é realizado um furo com objetivo de captação de água sem rigor e qualidade, o mesmo pode conduzir a atrasos na execução das obras e mesmo a desastres financeiros e/ou ambientais.

A nível pessoal, o estágio que realizei na empresa Sondalis, permitiu o acompanhamento das diversas etapas de pesquisa, dimensionamento, construção e exploração de várias captações de águas subterrâneas. Paralelamente foi possível o acompanhamento do funcionamento do quotidiano numa empresa e uma sensibilização para o mundo do trabalho.

Relativamente ao acompanhamento de obras, tal oportunidade permitiu não só adquirir um grande número de conhecimentos relacionados com as captações de água, como também uma preparação e sensibilidade para futuramente aplicar esses conhecimentos de forma mais correta e científica. Para além destes conhecimentos, o acompanhamento da atividade profissional do diretor técnico da empresa, ao nível do processo de pesquisa e na tomada de decisões na construção destas estruturas, nomeadamente na classificação das amostras e definição dos níveis alvo de captação, a partir dos quais se pode definir a posição dos tubos-ralo na instalação da coluna de revestimento, foi também essencial.

Referências Bibliográficas

- Almeida, C.; Mendonça, J.J.L.; Jesus, M.R.; Gomes, A.J. (2000) - Sistemas Aquíferos de Portugal Continental, Instituto da Água, 661 pp;
- Australian Drilling Industry Training Committee Limited (1997) Drilling: The Manual of Methods, Applications, and Management. CRC Press Ltd, Florida, USA.
- Bierschenk WH (1963) Determining well efficiency by multiple step-drawdown tests. International Association of Scientific Hydrology Publication 64: 493–507.
- Custodio, E. & Llamas. M. R. 2001. Hidrologia Subterrânea. 2ª Edição. Edições Omega S.A., Barcelona.
- Davis, S.N. and De Wiest (1971). Hidrogeologia. Ed. Ariel. Barcelona: 1-563.
- De Glee GJ (1930) Over grondwaterstromingen bij wateronttrekking door middel van putten. Thesis, J. Waltman, Delft, Netherlands.
- Driscoll FG (1986) GroundWater and Wells, 2nd edn. Johnson Filtration Systems, St Paul, USA.
- Fetter, C.W., 2001. Applied Hidrogeology. 4th Edition. Prentice Hall, New Jersey.
- França J. C.; Zbyszewski G.; Ferreira O. V. (1961) Carta Geológica de Portugal na Escala 1/50 000 e Notícia Explicativa da Folha 26-B ALCOBAÇA. Serviços Geológicos de Portugal. Lisboa. 51 pág.
- Gustafson G (2002) Strategies for groundwater prospecting in hard rocks: probabilistic approach. Norges geologiske undersøkelse Bulletin 439: 21–25.
- Hantush MS (1964) Hydraulics of wells. In: Chow VT (ed.) 'Advances in Hydroscience, Volume 1', Academic Press, New York, pp. 281–432.
- Helweg OJ, Scott VH and Scalmanini JC (1983) Improving Well and Pump Efficiency. American Water Works Association, Denver, USA.
- Hipólito, João Reis - Hidrologia e recursos hídricos. 2ª ed. Lisboa : IST Press, 2014. XVII, 796 p.
- Hiscock KM, Rivett MO and Davison RM (2002) Sustainable groundwater development. In: Hiscock KM, Rivett MO and Davison RM (eds) 'Sustainable Groundwater Development', Geological Society, London, UK, Special Publication 193, pp. 1–14.
- Houben GJ (2003) Iron oxide incrustations in wells. Part 2: chemical dissolution and modeling. Applied Geochemistry 18: 941–954.
- INAG (1997), Definição, caracterização e cartografia dos sistemas aquíferos de Portugal Continental, Instituto da Água, Relatório Final, 236 pp.
- Instituto Geológico e Mineiro, 2001. Água Subterrânea: Conhecer para Preservar o Futuro.

- Instituto Português da Qualidade, I.P. (2012) - Comissão Sectorial para a Água – Manual de Boas Práticas para a Execução e Exploração de Furos de Captação de Águas Subterrâneas, 79 pp;
- ISO 10414 – 1:2008 – Petroleum and Natural Gas Industries – Field Testing of Drilling Fluids – Part1:Water-Based Fluids
- ISO 14686:2003 – Hydrometric determinations – Pumping tests for water wells – Considerations and Guidelines for design, performance and use
- Jacob CE (1946) Radial flow in a leaky artesian aquifer. Transactions American Geophysical Union 27: 198–208.
- Keary P, Brooks BM and Hill I (2002) An Introduction to Geophysical Exploration. Blackwell Science Ltd, Oxford, UK.
- Kruseman GP, De Ridder NA and Verweij JM (1990). Analysis and Evaluation of Pumping Test Data, 2nd edn. International Institute for Land Reclamation and Improvement, Wageningen, Holanda.
- Kruseman,G.P. e N.A. de Ridder (2000). - Analysis and evaluation of pumping test data. International Institute for Land Reclamation and Improvement, Holanda, 377pp.
- LENCASTRE, A & FRANCO, F. M., 2003. Lições de Hidrogeologia. 3ª Edição. Fundação Armando Lencastre
- Logan J (1964) Estimating transmissibility from routine production tests of water wells. Ground Water 2: 35–37.
- Misstear BDR, Daly EP, Daly D and Lloyd JW (1980) The groundwater resources of the Castlecomer Plateau. Geological Survey of Ireland Report RS 80/3.
- Teixeira, C; Zbyszewski, G.; Torre Assunção, C.; Manuppella, G. (1968) – Carta Geológica de Portugal na Escala 1/50 000 e Notícia Explicativa da Folha 23-C LEIRIA. Serviços Geológicos de Portugal. Lisboa. 99 pág.
- Todd, D.K. (1980), Groundwater hydrology, John Wiley and Sons, New York.
- Theis CV (1935) The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using ground-water storage. Transactions of the American Geophysical Union 16: 519–524.
- Thiem GA (1906) Hydrologische Methoden. Gebhardt, Leipzig, Germany.
- Walton WC (1962) Selected analytical methods for well and aquifer evaluation. Illinois State Water Survey (Urbana) Bulletin 49, USA.
- Waters P, Greenbaum D, Smart PL and Osmaston H (1990) Applications of remote sensing to groundwater hydrology. Remote Sensing Reviews 4(2): 223–264.

Anexos

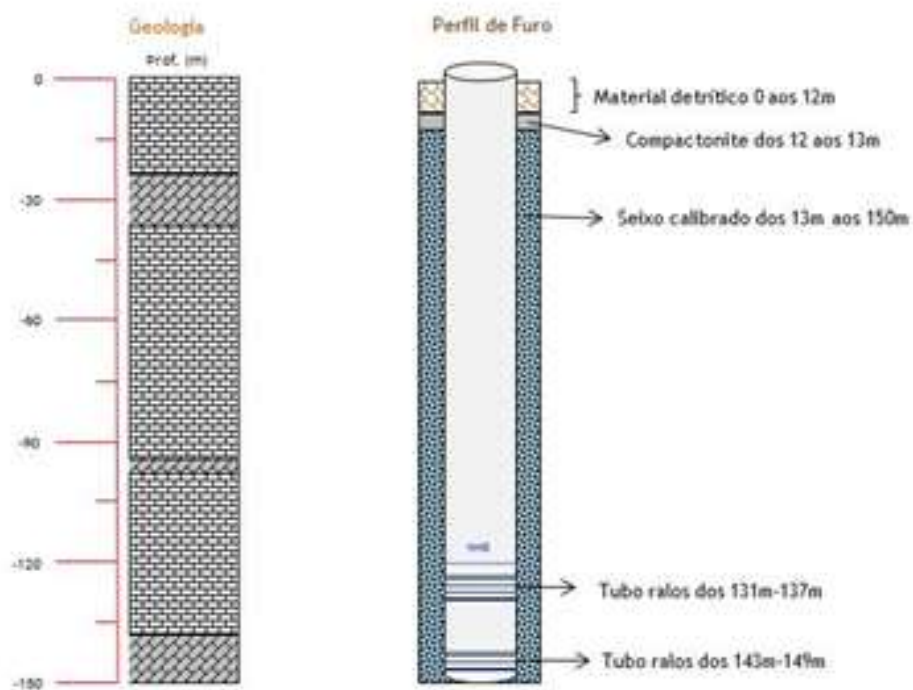
Anexo nº1 – Coluna litoestratigráfica e esquema da captação SL1 – Covões

SONDALIS
captações de água, lda

Rua da Base Aérea | 2400-761 Amorim - Leiria
Tel. 244 860 940 | 919 078 259 | Fax. 244 860 945
info@sondalis.pt | www.sondalis.pt



2014
25 ANOS



Litologias atravessadas:

- Calcário
- Calcário Fraturado

Legenda:

Isolamento:

- Material Detritico/cimentação
- Compactonite
- Seixo calibrado

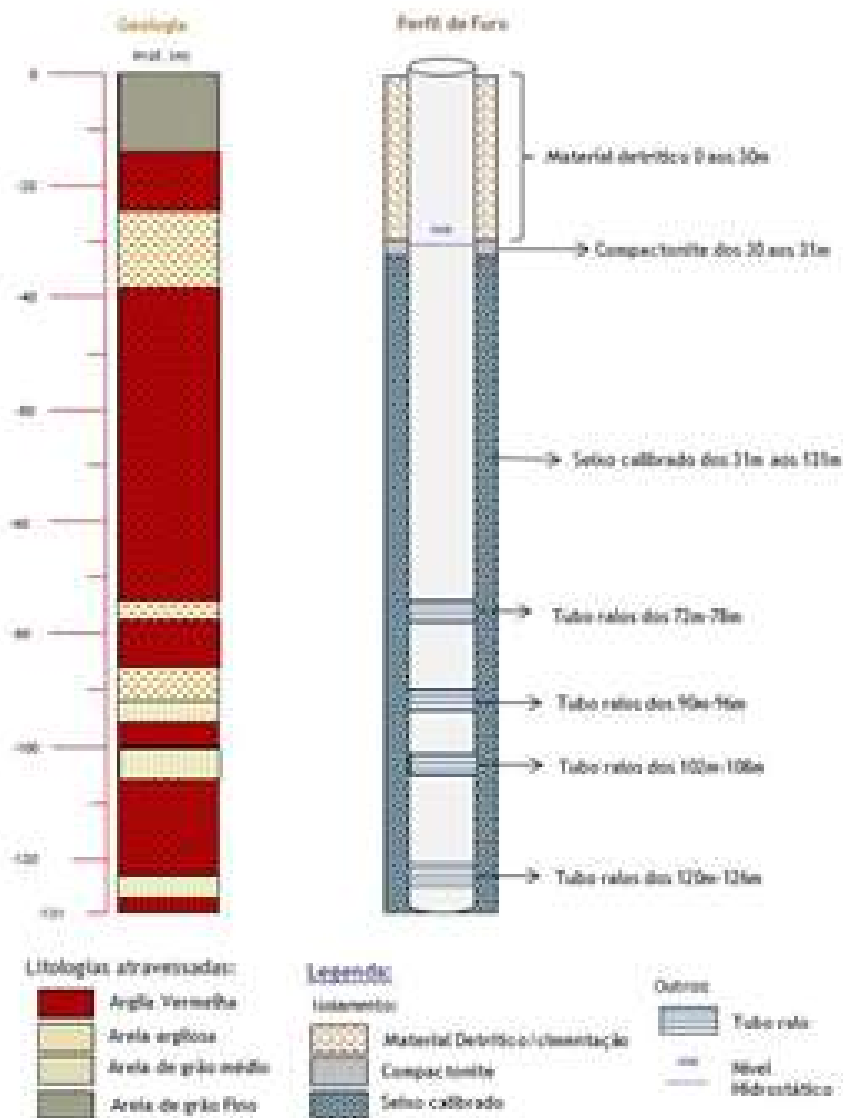
Outros:

- Tubo ralo
- Nivel Hidrostático

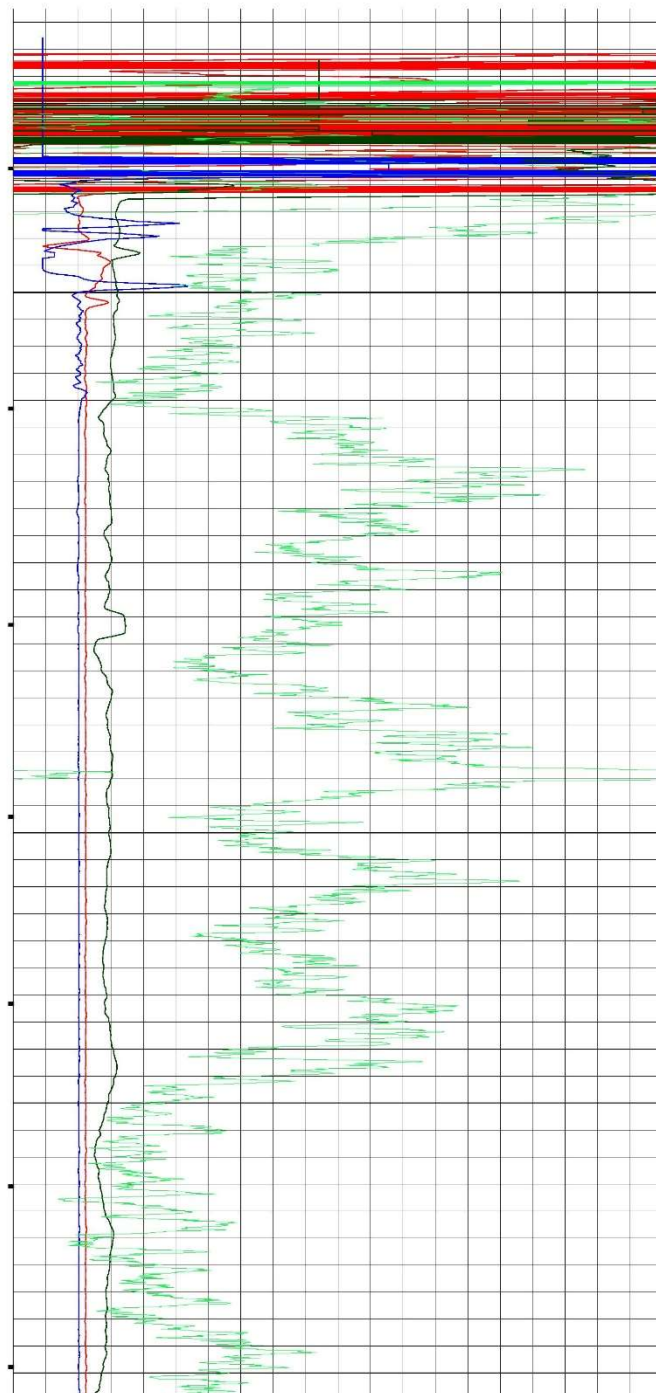
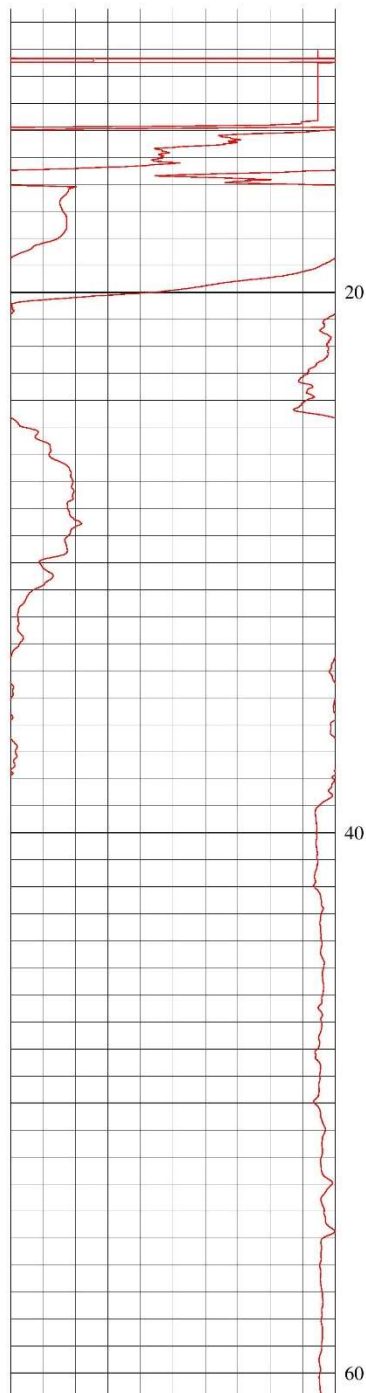
Anexo nº2 – Coluna litoestratigráfica e esquema da captação SL6 – São Romão



2014
25 ANOS



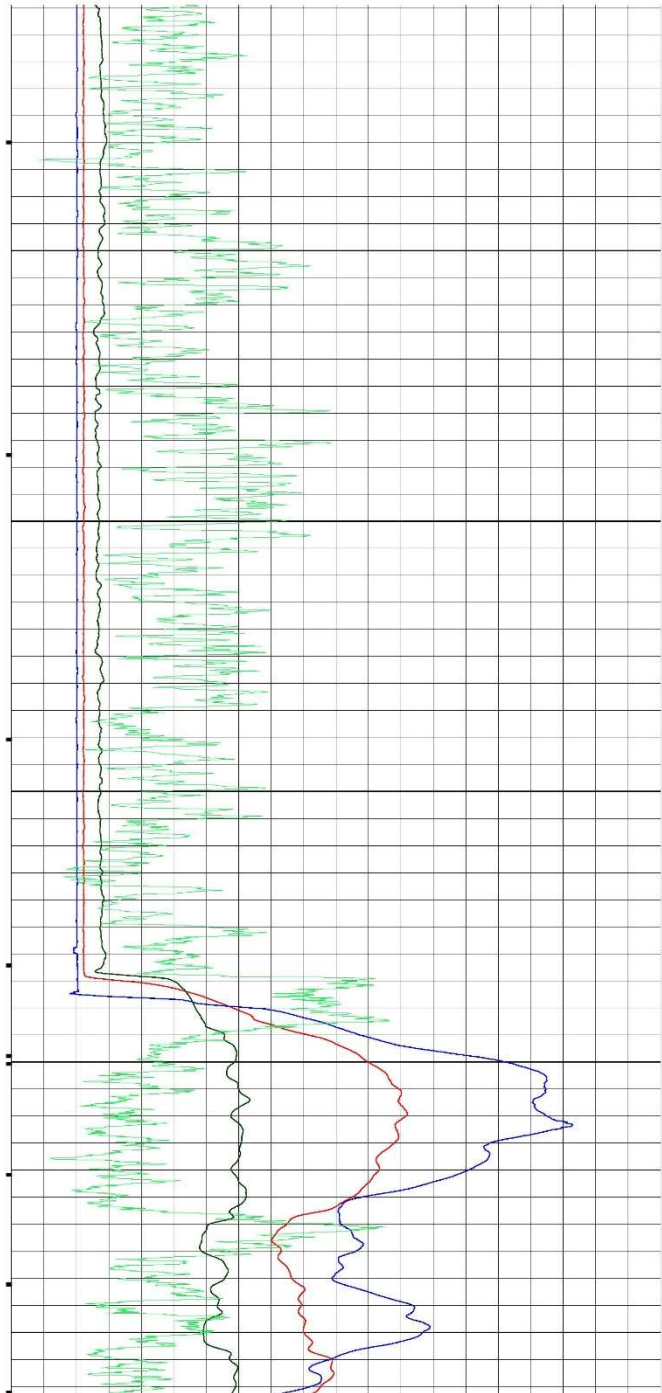
Anexo nº3 – Diagrama da captação CA3 - Colmeias



-1600 SPMV 0



-20 16N OHMM 400
-20 64N OHMM 400
-20 SPR OHM 400
11 NGAM CPS 100



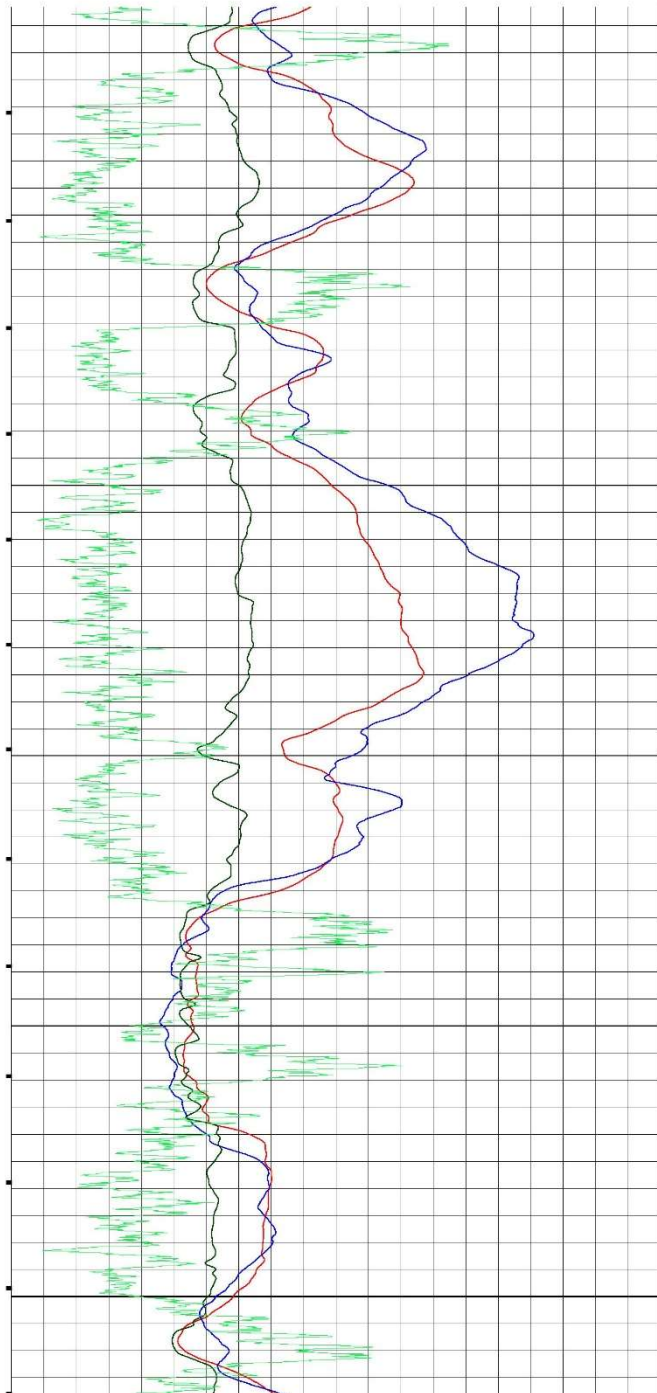
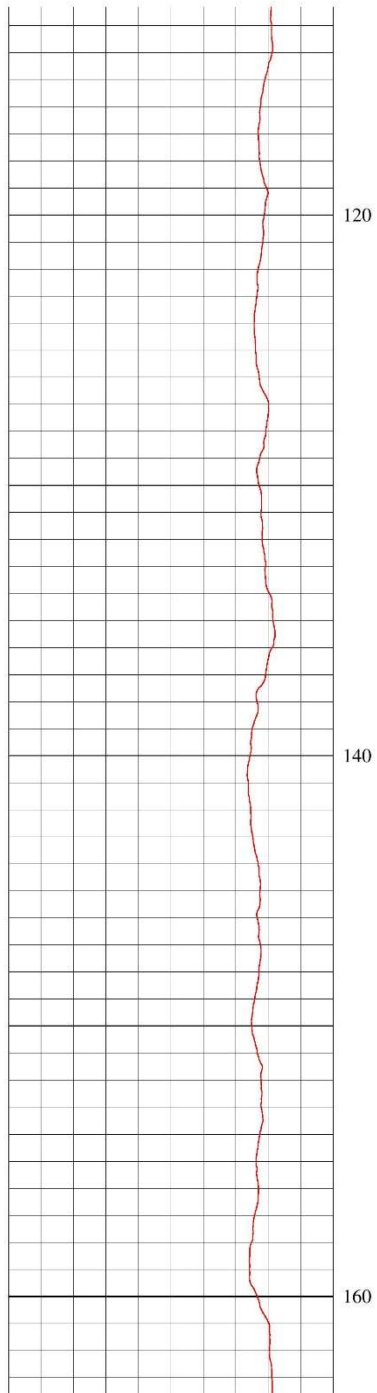
-1600 SPMV 0

-20 16N OHMM 400

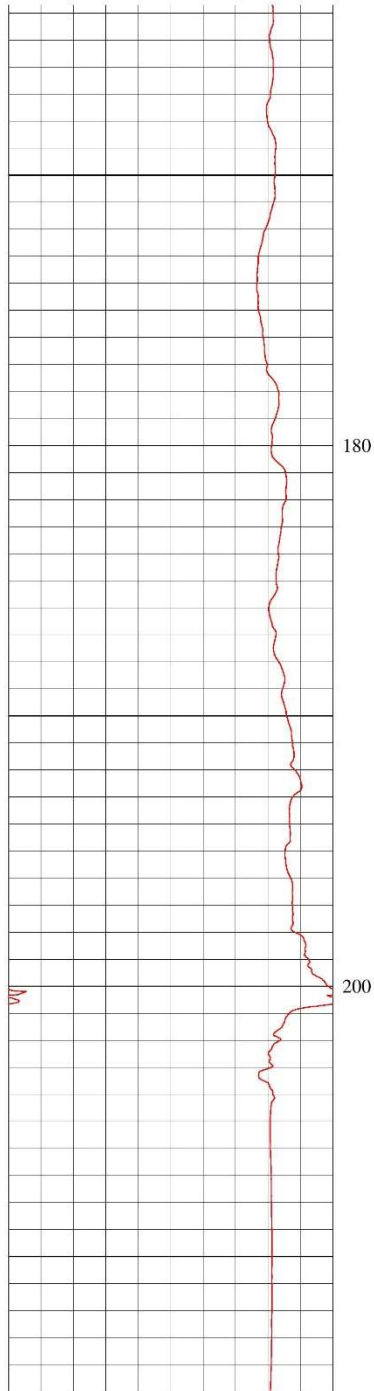
-20 64N OHMM 400

-20 SPR OHM 400

11 NGAM CPS 100



-1600 SP MV 0

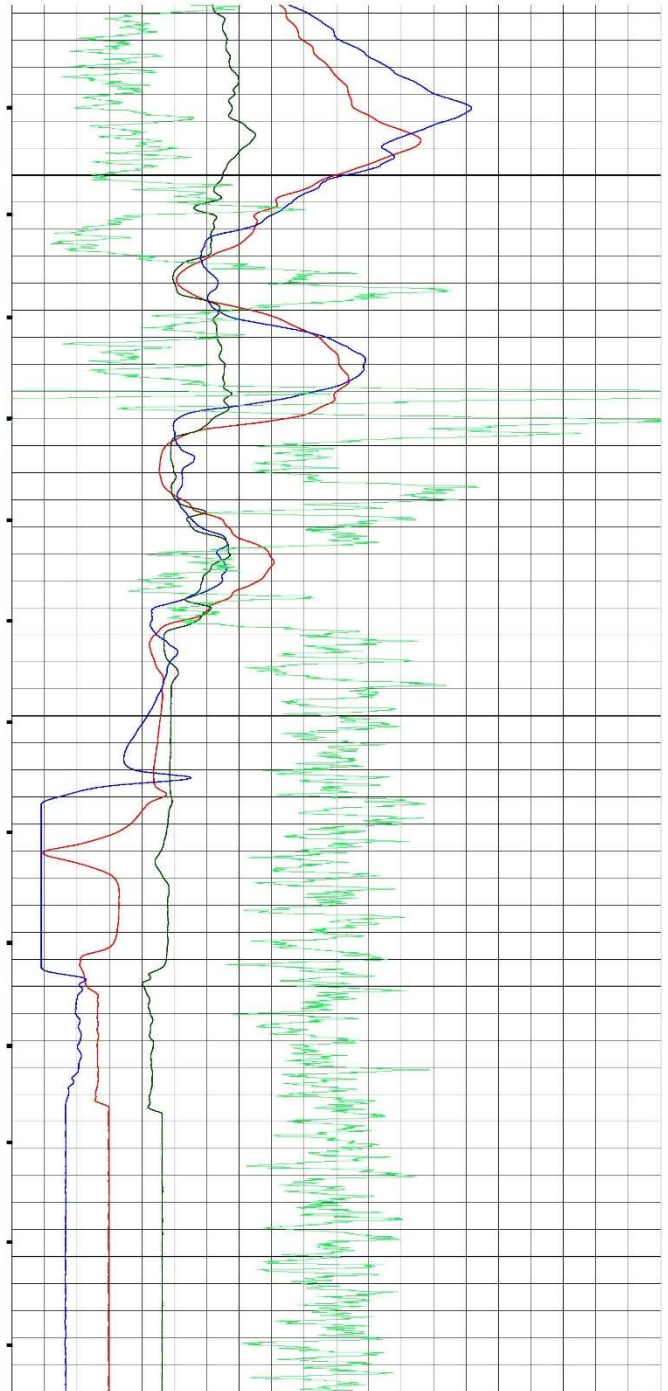


-20 16N OHMM 400

-20 64N OHMM 400

-20 SPR OHM 400

11 NGAM CPS 100



Anexo nº3 – Registo dos rebaixamentos medidos no ensaio de caudal realizado na captação SL1 Vila Nova de Santo André.

Tempo (min)		Nível Hidrodinâmico (m)	Rebaixamento (m)	Observações
0		28,2	0	Início da bombagem
2		31,7	3,5	Caudal = 40m ³ /h
5		42,3	14,1	
10		42,6	14,4	
15		43,9	15,7	
20		44,3	16,1	
30		44,6	16,4	
45		45	16,8	
60	1H	45,35	17,15	
90		45,6	17,4	
120	2H	45,7	17,5	
150		45,75	17,55	
180	3H	45,8	17,6	
210		45,84	17,64	
240	4H	45,96	17,76	
270		46,05	17,85	
300	5H	46,15	17,95	
330		46,15	17,95	
360	6H	46,16	17,96	
390		46,2	18	
420	7H	46,15	17,95	
450		46,15	17,95	Fim do 1º Escalão/ Início 2º Escalão
452		51,7	23,5	Caudal = 57m ³ /h
455		53,25	25,05	
460		53,9	25,7	
465		54,25	26,05	
470		54,55	26,35	
480	8H	54,75	26,55	
495		54,95	26,75	
510		55,12	26,92	
540	9H	55,26	27,06	
570		55,58	27,38	
600	10H	55,5	27,3	
630		55,54	27,34	
660	11H	55,7	27,5	
690		56,1	27,9	
720	12H	56,2	28	
750		56,48	28,28	
780	13H	56,54	28,34	
810		56,6	28,4	
840	14H	56,64	28,44	
870		56,7	28,5	
900	15H	56,7	28,5	Fim do ensaio