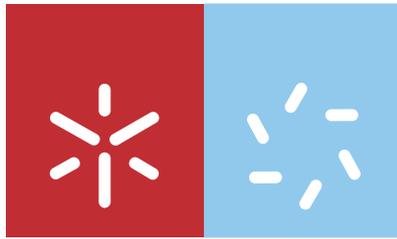


Universidade do Minho
Escola de Ciências

Susana Sofia Peixoto Barbosa

Gestão de águas subterrâneas destinadas à produção de água para consumo humano: elaboração de um plano de exploração de água de nascente.



Universidade do Minho
Escola de Ciências

Susana Sofia Peixoto Barbosa

**Gestão de águas subterrâneas destinadas
à produção de água para consumo humano:
elaboração de um plano de exploração de
água de nascente.**

Mestrado em Ordenamento e Valorização
de Recursos Geológicos

Trabalho efectuado sob a orientação do
Professor Doutor Alberto da Silva Lima

É AUTORIZADA A REPRODUÇÃO INTEGRAL DESTA TESE/TRABALHO APENAS PARA EFEITOS DE INVESTIGAÇÃO, MEDIANTE DECLARAÇÃO ESCRITA DO INTERESSADO, QUE A TAL SE COMPROMETE.

Susana Sofia Peixoto Barbosa

Agradecimentos

Ao meu orientador Professor Doutor Alberto Lima da Universidade do Minho, por toda a disponibilidade e interesse manifestado em me orientar ao longo de todo o trabalho. O meu muito obrigado pelo constante apoio e ensinamentos que me deu.

Ao meu noivo Hugo Barreiros, pela paciência que teve comigo durante este ano pela ajuda prestada nos trabalhos de campo e de laboratório e, acima de tudo, por estar sempre do meu lado e me apoiar incondicionalmente.

À Engenheira Clarice, ao Engenheiro Alcides e, principalmente, à Engenheira Rosa Maria, da Unidade de Engarrafamento de Água, pela ajuda e interesse constante nos trabalhos que desenvolvi junto deles.

À Doutora Lúcia Guise, por me disponibilizar espaço no Laboratório de Águas do Departamento de Ciências da Terra e pela ajuda que me deu.

Ao Senhor Azevedo, pelas análises de difracção de raios X que realizou prontamente.

Ao professor Carlos Alberto Alves, pelo interesse demonstrado e ajuda prestada na parte final do trabalho.

À Doutora Amália Braga, pelo empenho e ajuda na interpretação dos difractogramas.

À minha família, principalmente aos meus pais, irmão e sogros, pelo apoio.

Aos meus amigos, pelo interesse e força que me deram.

A todos, um muito obrigada!

Resumo

O presente trabalho de investigação tem como objectivo principal a elaboração de um plano de exploração de uma captação de água de nascente destinada à indústria do engarrafamento.

Neste sentido, foram realizados dois ensaios de caudal, para a determinação das características hidráulicas do aquífero e a avaliação da eficiência da captação. No decurso dos ensaios de caudal foram colhidas amostras de água para a quantificação da carga em suspensão, em função das condições de exploração. Por último, foram realizadas análises de difracção de raios X, para a caracterização mineralógica dos materiais retidos nos filtros.

As fases mineralógicas identificadas por DRX englobam quartzo, feldspato potássico, plagioclase, moscovite e, em menor quantidade, minerais argilosos 2:1 (por ex: vermiculite, esmectite, interestratificados vermiculíticos) e 1:1 (caulinite), assim como, alguma goethite, entre os óxidos de ferro.

Da interpretação dos dados obtidos nos ensaios de caudal obteve-se um valor de transmissividade de $5,9 \text{ m}^2/\text{dia}$ e constatou-se que a captação em estudo é uma captação eficiente, implantada num aquífero semi-confinado, sem perdas de carga significativas, a funcionar em regime laminar ($n=1$). Verificou-se que pequenas alterações no regime de extracção de água têm efeitos imediatos sobre os caudais de extracção e, conseqüentemente, sobre os rebaixamentos provocados e, em última análise, sobre a carga em suspensão. Uma vez que os caudais de extracção apresentam relações bem definidas, quer com os rebaixamentos do nível piezométrico, quer com as concentrações de sólidos suspensos, é de enorme importância o controlo das suas variações. Assim, de forma a eliminarem-se estes efeitos propõe-se a colocação de um depósito de recepção de água, com entrada da água pela parte superior.

Os caudais de exploração deverão situar-se por volta dos $25 \text{ m}^3/\text{h}$, para que a extracção de água ocorra sem grandes perdas de qualidade da mesma, isto é, sem arrastamento de consideráveis quantidades de sólidos suspensos. No caso das necessidades da unidade de engarrafamento obrigarem a um incremento do caudal de extracção, este não deverá exceder os $35 \text{ m}^3/\text{h}$.

Em todas as situações, recomenda-se que, uma vez iniciada a bombagem de água, se aguarde entre 70 minutos e 120 minutos sem aproveitamento de água para enchimento dos depósitos.

Abstract

This study has as its primary goal the development of an exploitation plan for a spring water well for bottling industry.

In this sense, two pumping tests were conducted, to determine the hydraulic characteristics of the aquifer and the well efficiency. During the pumping tests, some water samples were collected for the quantification of suspended matter, depending on the operating conditions. Finally, we analyzed the X-ray diffraction patterns for mineralogical characterization of the materials retained in the filters.

The mineralogical phases identified by X-ray diffraction include quartz, feldspar, plagioclase, muscovite and, to a lesser extent, 2:1 clay minerals (e.g. vermiculite, smectite, interstratified vermiculite) and 1:1 (kaolinite), as well as some goethite between the iron oxides.

In the interpretation of pumping tests data, a transmissivity value of $5.9 \text{ m}^2/\text{day}$ was estimated and it was found that the studied well is efficient, with no major head loss, operating in laminar regime ($n = 1$). There were also identified small changes in water extraction system and its effect on the flow rate and hence on the drawdown and, ultimately, on the suspended load. Since the flow rates show well-defined relationships with either drawdown or the concentration of suspended solids, it is of paramount importance to control their variations. Thus, in order to eliminate these effects, we proposed to place a water reservoir, with water inlet from the top.

The exploitation flow rate must be at around $25 \text{ m}^3/\text{h}$ to minimize the concentration of suspended matter. Exceptionally, flow rate can be increased but it should not exceed $35 \text{ m}^3/\text{h}$.

In all situations, it is recommended that, once pumping water begun, to wait between 70 minutes and 120 min before tank filling.

ÍNDICE GERAL

| | |
|--|-----------|
| Agradecimentos | ii |
| Resumo | iii |
| Abstract | iv |
| Índice de figuras | vii |
| Índice de tabelas | x |
| | |
| Capítulo 1 – INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1. | 2 |
| 1.2. | 3 |
| | |
| Capítulo 2 - CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO | 5 |
| 2.1. Localização | 5 |
| 2.2. Enquadramento geológico | 7 |
| 2.3. Hidrogeologia | 11 |
| 2.3.1. Parâmetros hidráulicos e Produtividade | 13 |
| 2.3.1.1. Caudais | 13 |
| 2.3.1.2. Transmissividades | 14 |
| 2.3.1.3. Coeficientes de armazenamento | 15 |
| 2.3.2. Balanço hídrico | 15 |
| 2.3.3. Qualidade das águas | 16 |
| | |
| Capítulo 3 – CARACTERIZAÇÃO DA CAPTAÇÃO PS1 | 18 |
| 3.1. Perfuração | 18 |
| 3.2. Coluna litológica | 18 |
| 3.3. Coluna de revestimento | 18 |
| 3.4. Espaço anular | 19 |
| 3.5. Sistema de extração | 19 |
| 3.6. Caracterização físico-química e radiológica da água | 21 |
| 3.6.1. Caracterização físico-química | 21 |
| 3.6.2. Caracterização radiológica | 28 |

| | |
|--|-----------|
| Capítulo 4 – METODOLOGIA | 29 |
| 4.1. Determinação das características hidráulicas do aquífero | 32 |
| 4.2. Avaliação da eficiência da captação | 38 |
| 4.3. Determinação da concentração dos sólidos suspensos | 40 |
| 4.4. Caracterização mineralógica dos materiais retidos nos filtros | 42 |
| Capítulo 5 – RESULTADOS E DISCUSSÃO | 44 |
| 5.1. Caracterização hidráulica da captação e do aquífero | 44 |
| 5.1.1. Determinação de parâmetros hidráulicos | 44 |
| 5.1.2. Caracterização hidráulica da captação | 49 |
| 5.2. Sólidos em suspensão | 55 |
| 5.2.1. Ensaio a caudal constante | 56 |
| 5.2.2. Ensaio escalonado | 62 |
| 5.3. Caracterização mineralógica dos materiais retidos nos filtros | 68 |
| Capítulo 6 – PLANO DE EXPLORAÇÃO | 74 |
| Capítulo 7 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES | 85 |
| BIBLIOGRAFIA | 88 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Aspecto geral da área de localização da captação PS1, assinalada a amarelo (Imagem obtida a partir do Google Earth, em 3/8/2010). _____ | 5 |
| Figura 2 – Localização da captação PS1 numa base topográfica à escala 1/25 000. Mapa elaborado com base nas folhas 342 e 354 da Carta Militar de Portugal à escala 1/25 000, do Instituto Geográfico do Exército. Referenciação Hayford-Gauss, ponto central. (Imagem retirada de Lima, 2008). _____ | 6 |
| Figura 3 - Enquadramento geológico da captação PS1. Mapa elaborado com base nas folhas 27-D (Abrantes) e 31-B (Chouto) da Carta Geológica de Portugal à Escala 1/50 000. Referenciação Hayford-Gauss, ponto central. (Imagem retirada de Lima, 2008). _____ | 8 |
| Figura 4 – Corte geológico longitudinal da Bacia do Tejo-Sado. Adaptado de Almeida <i>et al.</i> (2000b). _____ | 9 |
| Figura 5 – A: Unidades Hidrogeológicas de Portugal Continental. B: Pormenor da Bacia Terciária do Tejo-Sado. (Imagem obtida em http://snirh.pt/). _____ | 11 |
| Figura 6 – Diagrama de Piper para o Pliocénico, no sistema aquífero da Margem Esquerda do Rio Tejo (Imagem retirada de Almeida <i>et al.</i> , 2000b). _____ | 16 |
| Figura 7 – Diagrama de Piper para o Miocénico francamente marinho, no sistema aquífero da Margem Esquerda do Rio Tejo (Imagem retirada de Almeida <i>et al.</i> , 2000b). _____ | 17 |
| Figura 8 – Diagrama de Piper para o Miocénico com características marcadamente continentais, no sistema aquífero da Margem Esquerda do Rio Tejo (Imagem retirada de Almeida <i>et al.</i> , 2000b). _____ | 17 |
| Figura 9 – Esquema representativo da posição relativa da captação e da unidade de engarrafamento de água. _____ | 19 |
| Figura 10 – Representação esquemática das características gerais da perfuração e da captação PS1, incluindo a coluna litológica e os diâmetros de perfuração e revestimento. (Imagem retirada de Lima, 2008). _____ | 20 |
| Figura 11 – Projecção da composição química das amostras da captação PS1 no diagrama de Piper. (Imagem retirada de Lima, 2008). _____ | 25 |
| Figura 12 – Projecção da composição química das amostras da captação PS1 no diagrama de Schoeller. (Imagem retirada de Lima, 2008). _____ | 25 |

| | |
|--|----|
| Figura 13 – Representação esquemática do rebaixamento da água no poço devido ao bombeamento de água. (Imagem adaptada de Kruseman e Ridder, 1994). | 30 |
| Figura 14 – Curva de Theis. (Imagem retirada de Martinez e Lopez, 1984). | 34 |
| Figura 15 – Representação esquemática da drenância vertical no aquífero semi-confinado. (Imagem adaptada de Martinez e Lopez, 1984). | 35 |
| Figura 16 – Função de poço $W(u, r/B)$ num aquífero semi-confinado – Hantush (1956). (Imagem retirada de Martinez e Lopez, 1984). | 37 |
| Figura 17 – Sistema de filtração usado no laboratório da empresa de engarrafamento de água. | 41 |
| Figura 18 – Sistema de filtração usado no Laboratório de Águas do Departamento de Ciências da Terra da Universidade do Minho. | 42 |
| Figura 19 – Evolução do rebaixamento e do caudal de extracção no decurso do ensaio de caudal realizado a 22 de Março de 2010. | 46 |
| Figura 20 – Sobreposição da curva de campo (do ensaio a caudal constante) à curva padrão de Hantush, uma derivação da curva de Theis (gráfico obtido no AquiferTest). | 48 |
| Figura 21 - Evolução do rebaixamento no decurso do ensaio de caudal escalonado realizado a 26 de Abril de 2010. | 50 |
| Figura 22 – Indicação dos rebaixamentos máximos de cada escalão do ensaio de caudal escalonado. | 52 |
| Figura 23 - Rebaixamentos máximos em função dos caudais médios dos três escalões do ensaio de caudal realizado a 26 de Abril de 2010. | 53 |
| Figura 24 – Caudais específicos em função dos rebaixamentos para cada escalão do ensaio de caudal realizado a 26 de Abril de 2010. | 54 |
| Figura 25 – Evolução dos rebaixamentos em função dos caudais médios, considerando que não existem perdas de carga. | 55 |
| Figura 26 – Evolução da concentração de sólidos suspensos nas membranas filtrantes de 0,45 μm e 0,22 μm , ao longo do ensaio de caudal realizado a 22 de Março de 2010. | 57 |
| Figura 27 – Evolução da concentração total de sólidos suspensos nas membranas filtrantes de 0,45 μm e 0,22 μm , ao longo do ensaio de caudal realizado a 22 de Março de 2010. | 58 |
| Figura 28 – Evolução do rebaixamento e da concentração total de sólidos suspensos, ao longo do ensaio de caudal realizado a 22 de Março de 2010. | 60 |

| | |
|---|----|
| Figura 29 – Evolução do caudal e da concentração total de sólidos suspensos, ao longo do ensaio de caudal realizado a 22 de Março de 2010. As linhas verticais, a preto, indicam momentos importantes, em que alterações do caudal de extracção provocam variações na concentração de sólidos suspensos. _____ | 61 |
| Figura 30 – Evolução da concentração de sólidos suspensos nas membranas filtrantes de 0,45 µm e 0,22 µm, ao longo do ensaio de caudal escalonado realizado a 26 de Abril de 2010. _____ | 64 |
| Figura 31 – Evolução da concentração total de sólidos suspensos nas membranas filtrantes de 0,45 µm e 0,22 µm, ao longo do ensaio de caudal escalonado realizado a 26 de Abril de 2010. _____ | 65 |
| Figura 32 – Evolução do rebaixamento e da concentração total de sólidos suspensos ao longo do ensaio de caudal escalonado realizado a 26 de Abril de 2010. _____ | 67 |
| Figura 33 – Padrão de DRX da amostra E2-30 desordenada, mostrando os valores de <i>d</i> (em Å) dos diferentes minerais constituintes. Notar que, associado à presença de vermiculite (V), o ponto de interrogação significa que poderão existir outros minerais argilosos associados. A simbologia pode ser observada na legenda da Tabela 8, à excepção de M/V que corresponde ao interestratificado mica-vermiculite. _____ | 71 |
| Figura 34 – Padrão de DRX da amostra E3-43 desordenada, mostrando os valores de <i>d</i> (em Å) dos diferentes minerais constituintes. Notar que, associado à presença de vermiculite (V), o ponto de interrogação significa que poderão existir outros minerais argilosos associados. A simbologia pode ser observada na legenda da Tabela 8, à excepção de M/V que corresponde ao interestratificado mica-vermiculite. _____ | 72 |
| Figura 35 – Esquema representativo da colocação do depósito de recepção de água e seu encaminhamento para coluna de filtros e, posteriormente, para os depósitos de armazenamento. _____ | 78 |
| Figura 36 – Evolução dos rebaixamentos em função dos caudais de extracção, nos ensaios de caudal realizados. _____ | 80 |
| Figura 37 – Máximos e mínimos de concentração de sólidos suspensos em cada escalão do ensaio em função dos caudais médios de extracção. _____ | 81 |

ÍNDICE DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 – Principais estatísticas dos caudais (L/s) para as três formações aquíferas dominantes na Margem Esquerda do Rio Tejo. (Dados obtidos em Almeida <i>et al.</i> , 2000b)). _____ | 14 |
| Tabela 2 – Valores de transmissividade (m^2/dia), obtidos por ensaios de bombagem e por caudais específicos e valores de transmissividade mais frequentes, para as três formações aquíferas dominantes na Margem Esquerda do Rio Tejo. (Dados obtidos em Almeida <i>et al.</i> (2000b)). _____ | 15 |
| Tabela 3 – Dados estatísticos da composição química (componente maioritária) da água da captação PS1. Concentração dos aniões, dos catiões e da sílica em mg/L; condutividade em $\mu S/cm$, a 25°C; dureza em mg/L de $CaCO_3$; resíduo seco em mg/L. Dados obtidos em Lima (2008). _____ | 21 |
| Tabela 4 – Dados estatísticos da composição química (componente vestigiária) da água da captação PS1. Concentrações em $\mu g/L$. Dados obtidos em Lima (2008). _____ | 26 |
| Tabela 5 – Resultados das análises radiológicas. Dados obtidos em Lima (2008). __ | 28 |
| Tabela 6 – Valores de rebaixamentos máximos e de caudais médios para cada escalão do ensaio de caudal realizado a 26 de Abril de 2010. _____ | 53 |
| Tabela 7 – Valores de caudais específicos para cada escalão do ensaio de caudal realizado a 26 de Abril de 2010. _____ | 54 |
| Tabela 8 – Estimativa (em %) da composição mineralógica por DRX dos sólidos suspensos retidos nas membranas filtrantes. Qz - quartzo; FK - feldspato potássico; Pl - plagioclase; Mo - moscovite; 2:1 - minerais argilosos 2:1; 1:1 - minerais argilosos 1:1; Goe - goethite; tr - vestigial; - não detectado. _____ | 69 |
| Tabela 9 – Caudais médios de extracção, respectivos rebaixamentos máximos provocados e concentrações totais de sólidos suspensos. _____ | 79 |

1. INTRODUÇÃO

O Decreto-Lei nº 84/90 de 16 de Março desenvolve os princípios orientadores do exercício das actividades de prospecção, pesquisa e exploração de águas de nascente, com vista ao seu racional aproveitamento técnico-económico e valorização. De acordo com este diploma legal, o licenciamento das explorações de nascente implica, entre outros elementos, a realização de um estudo hidrogeológico da área da ocorrência e circulação da água, que deverá incluir a descrição das captações, a indicação, para cada captação, dos respectivos caudal e temperatura, bem como a apreciação da vulnerabilidade da zona envolvente à poluição e proposta de criação de uma área de protecção (alínea b) do artigo 4º).

O regime de exploração das captações de água de nascente é normalmente contínuo, mas os caudais de exploração são geralmente definidos a partir de ensaios de caudal. Estes ensaios consistem em um método de análise das captações de águas subterrâneas e dos aquíferos onde estão implantadas, permitindo obter-se informação sobre as características hidráulicas das captações e dos respectivos aquíferos (Martinez e Lopez, 1984; Rubio *et al*, 1998). Em função destes estudos, estabelecem-se os respectivos caudais de exploração. Contudo, nestes ensaios, não são normalmente controladas as características físico-químicas das águas em função dos caudais de extracção e dos rebaixamentos piezométricos. Por outro lado, o controlo analítico previsto no diploma já mencionado é feito, usualmente, em condições de equilíbrio hidrodinâmico, obtido a partir de bombagem de longa duração a caudal constante, atingindo-se um nível hidrodinâmico praticamente estabilizado. Estas condições, todavia, raramente são verificadas em situações reais de exploração industrial de captações. Com efeito, constrangimentos de diversa ordem conduzem, frequentemente, a alterações do regime normal de exploração das captações, com repercussões directas sobre o equilíbrio piezométrico e, indirectamente, sobre a qualidade da água, não só ao nível das substâncias dissolvidas mas, também, sobretudo, ao nível da matéria em suspensão. De facto, as fases transitórias dos regimes de exploração em equilíbrio podem conduzir a fluxos turbulentos que, função das características intrínsecas dos aquíferos, aumentam a carga em suspensão na água. Estes fenómenos, para além de alterarem as características das captações e diminuírem o seu tempo de vida útil, podem ter repercussões industriais graves nas unidades de engarrafamento.

Assim sendo, para garantir a qualidade da água captada e a adequada gestão da exploração do aquífero, deverá investir-se no conhecimento hidrogeológico do sistema aquífero em questão, sendo fundamental que estes estudos estabeleçam, desde o início da actividade de exploração, um modelo de funcionamento do sistema aquífero, que permita fundamentar uma adequada gestão da exploração, evitando situações de sobreexploração e de risco de contaminação das águas subterrâneas, face ao grau de vulnerabilidade do aquífero e a potenciais focos de contaminação. O modelo hidrogeológico, então definido, deverá ser ajustado e melhorado durante a fase de exploração regular da captação e do aquífero. Este ajustamento e melhoramento do modelo hidrogeológico apenas são possíveis mediante a implementação de um sistema de monitorização adequado, baseado no controlo da qualidade da água captada e na aquisição dos dados associados à gestão da exploração. A aferição e melhoramento do modelo ao longo do tempo aumentam a fiabilidade da previsão da evolução da exploração e da qualidade da água (Graça, 2002).

1.1.

O presente trabalho tem como objecto de estudo a captação PS1, situada na freguesia de Ulme, concelho da Chamusca, distrito de Santarém. Trata-se de uma captação para a exploração de água de nascente destinada à indústria do engarrafamento.

O objectivo geral do presente estudo é o de estabelecer um plano de exploração sustentado da captação antes referida, tendo em consideração os aspectos quantitativos e qualitativos da água captada.

Para a concretização deste objectivo, definem-se os seguintes objectivos operacionais:

- Caracterizar a unidade hidrogeológica onde se insere a captação;
- Determinar as características hidráulicas do aquífero;
- Avaliar a eficiência da captação;
- Quantificar a carga em suspensão na água, em função das condições de exploração;

- Caracterizar a mineralogia dos sólidos suspensos;
- Propor um plano que sustente a exploração da captação de água de nascente em estudo.

1.2.

A estrutura da tese encaminha para a apresentação dos resultados no sentido do seu objectivo principal: a elaboração de um plano de exploração sustentado da captação PS1, tendo em consideração os aspectos quantitativos e qualitativos da água captada.

A *Introdução* é um capítulo de índole genérico, no qual se situa o objecto de estudo e os objectivos operacionais a levar a cabo no decorrer do trabalho de investigação. Aqui, é ainda apresentado, abreviadamente, o diploma legal (Decreto-Lei nº 84/90 de 16 de Março) que desenvolve os princípios orientadores do exercício das actividades de prospecção, pesquisa e exploração de águas de nascente, com vista ao seu racional aproveitamento técnico-económico e valorização.

No capítulo 2 – *Caracterização da área de estudo* – apresenta-se o enquadramento do objecto de estudo, a nível geográfico e geológico. A caracterização hidrogeológica também faz parte deste capítulo, sendo de enorme importância, dada a área de investigação em questão.

Na caracterização propriamente dita do objecto de estudo, a captação PS1, são apresentados diversos aspectos do mesmo, desde o método de perfuração até ao sistema de extracção. É feita, também, uma caracterização físico-química e radiológica da água extraída. É sobre estes aspectos que se debruça o capítulo 3 – *Caracterização da captação PS1*.

Para a concretização dos objectivos inicialmente propostos, foram adoptadas quatro metodologias de trabalho que compreenderam a realização de dois ensaios de caudal, a determinação da concentração de sólidos suspensos e, por fim, a caracterização mineralógica dos materiais retidos nos filtros. A descrição dos procedimentos, assim como os modelos de interpretação de dados escolhidos, constituem o capítulo 4 – *Metodologia*.

A análise e interpretação dos dados obtidos nos ensaios de caudal permitiram a caracterização hidráulica da captação e do aquífero, assim como, a quantificação dos sólidos suspensos na água bombeada, em função do caudal de extracção. Por último, através de análises de difracção de raios X, foi possível a caracterização mineralógica dos materiais retidos nos filtros. O conjunto de todos os dados e respectiva discussão constitui o capítulo 5 – *Resultados e Discussão*.

É no capítulo 6 – *Plano de exploração* – que o objectivo fundamental do presente trabalho de investigação é concretizado. Aqui, a conjugação dos resultados obtidos no decorrer de toda a investigação permitiram a elaboração de um plano de exploração sustentado que tem em consideração os aspectos quantitativos e qualitativos da água captada, de forma a que a contínua extracção de água não altere o regime de funcionamento do aquífero, nem mesmo as suas propriedades, prolongando-se, assim, o tempo de vida da captação e a sustentabilidade do recurso.

Por último, no capítulo 7 – *Conclusões e Recomendações* – é apresentada uma síntese do trabalho desenvolvido, assim como, algumas recomendações para a exploração da captação em estudo.

2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

2.1. Localização

A área onde se insere a captação PS1 situa-se nas proximidades da Zona de Actividades Económicas de Ulme, freguesia de Ulme, concelho da Chamusca, distrito de Santarém (Figura 1).



Figura 1 - Aspecto geral da área de localização da captação PS1, assinalada a amarelo. (Imagem obtida a partir do Google Earth, em 3/8/2010).

Esta área está coberta pela folha nº 342 da Carta Militar de Portugal à escala 1/25 000, situando-se nas proximidades da Ribeira de Alpiarça, comumente designada por Ribeira de Ulme. Este curso de água nasce na localidade de Aranhas de Cima, concelho de Abrantes, à altitude de cerca de 200m, e prolonga-se por cerca de 65km, passando por Vale de Cavalos, Alpiarça e Almeirim até à sua confluência com o Rio Tejo, na localidade de Benfica do Ribatejo, a uma cota da ordem dos 10 m. Desde a nascente até à Chamusca, a Ribeira de Ulme corre, sensivelmente, segundo a orientação geral E-W, assumindo posteriormente um traçado NE-SW a NNE-SSW, subparalelo ao Rio Tejo.

A Ribeira de Ulme apresenta numerosos tributários que se encontram tanto na margem direita, como na margem esquerda, sendo que é junto de um destes afluentes da margem esquerda que se situa a captação PS1 (Figura 2).

Apesar de não se encontrar muito distante do centro demográfico da freguesia de Ulme, a captação em estudo localiza-se fora do aglomerado populacional, a uma cota aproximada de 50m. Para sul, os terrenos encontram-se despovoados, existindo apenas um complexo desportivo, a poucos metros da captação, e uma unidade industrial de cerâmica e outra de engarrafamento de água, ambas um pouco mais distantes. Para NNW, encontra-se a Zona de Actividades Económicas de Ulme (ZAE) (Figura 1).

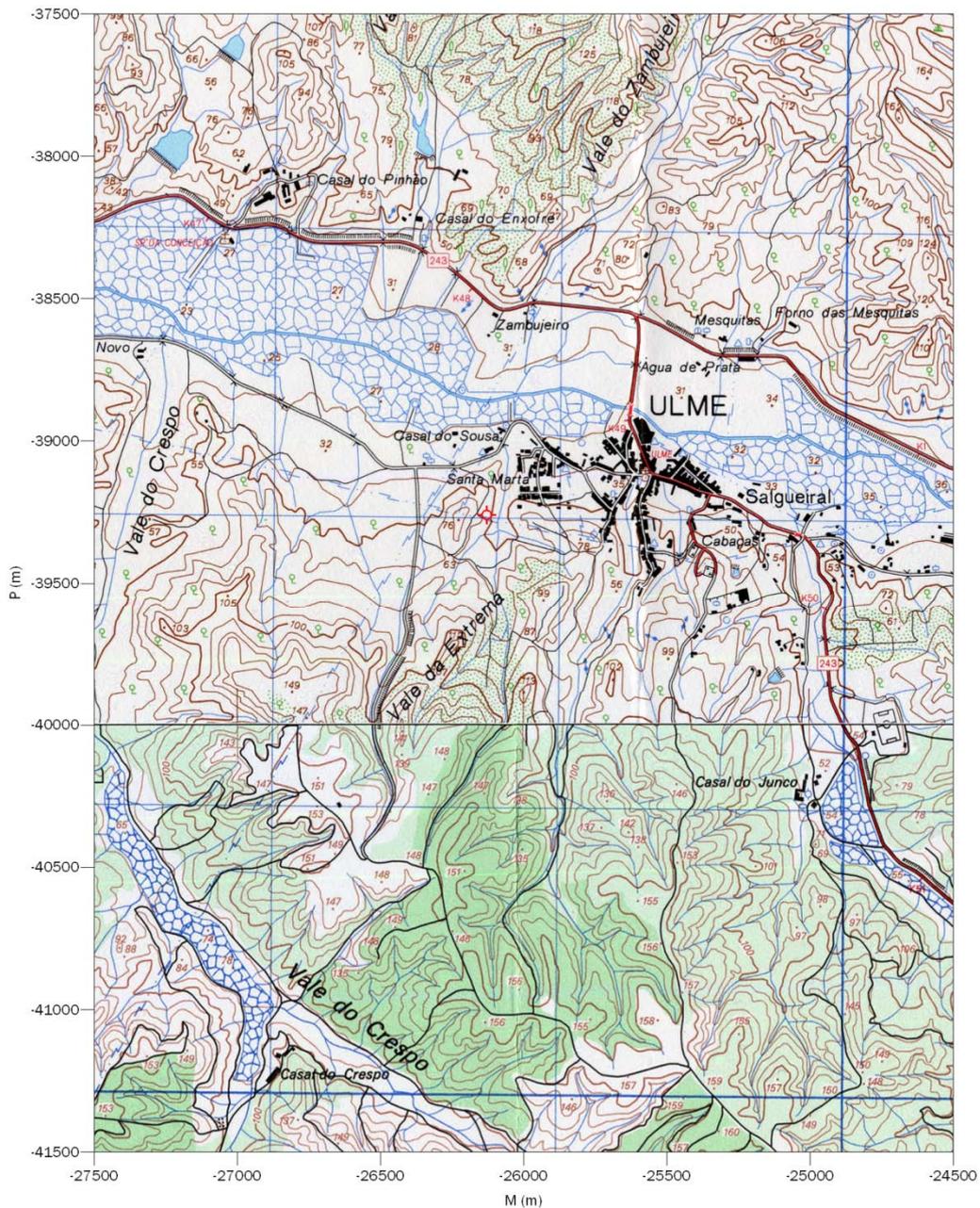


Figura 2 – Localização da captação PS1 numa base topográfica à escala 1/25 000. Mapa elaborado com base nas folhas 342 e 354 da Carta Militar de Portugal à escala 1/25 000, do Instituto Geográfico do Exército. Referenciação Hayford-Gauss, ponto central. (Imagem retirada de Lima, 2008).

2.2. Enquadramento geológico

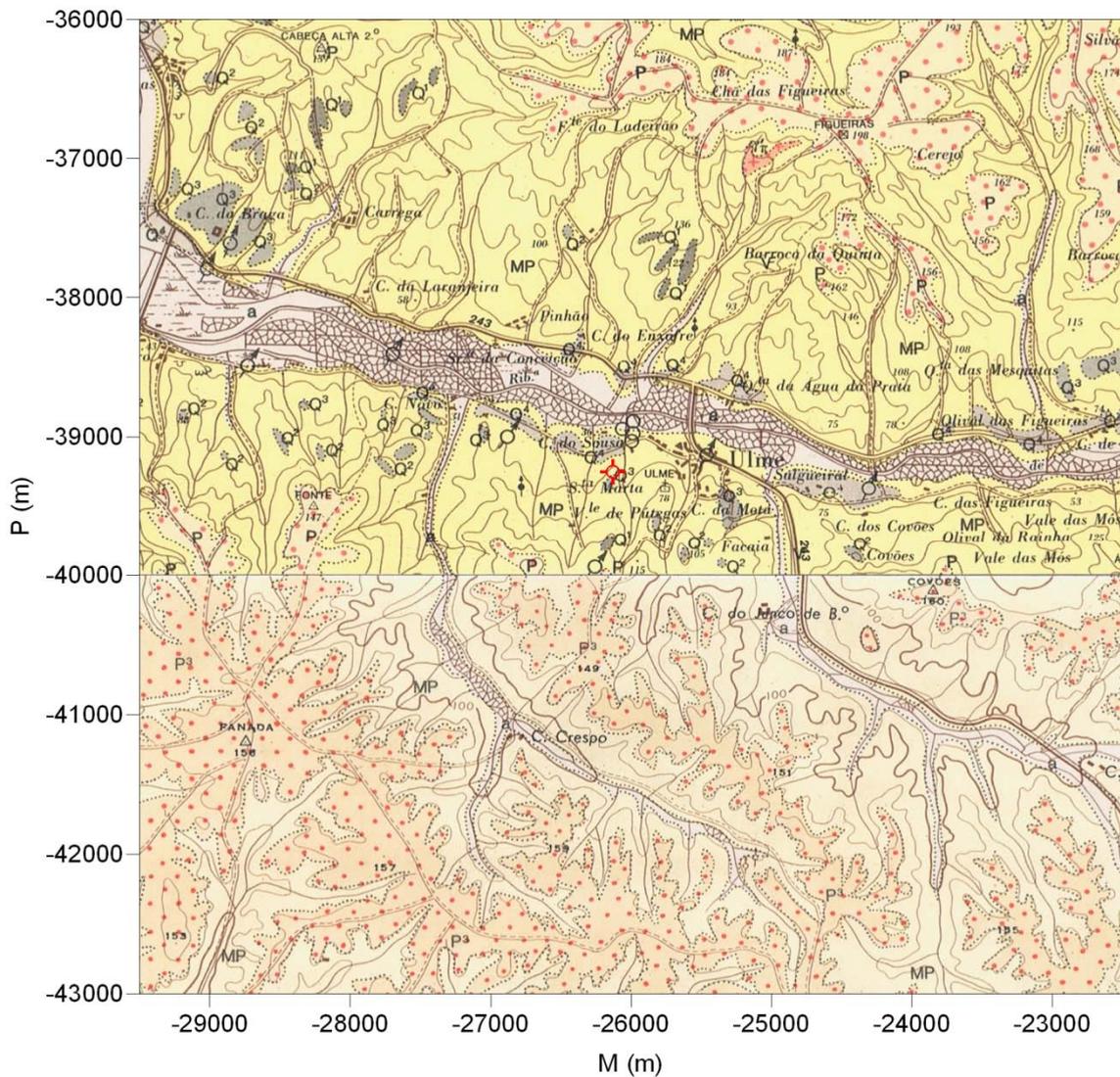
A área de implantação da captação PS1 encontra-se coberta pela folha 27-D (Abrantes) da Carta Geológica de Portugal à escala 1/50 000. Porém, situando-se no limite SW desta folha, o contexto geológico desta área fica melhor descrito se se considerar, também, a folha 31-B (Chouto) da referida carta (Figura 3).

A área referida está integrada na Bacia Terciária do Tejo-Sado, abreviadamente designada por Bacia do Tejo-Sado (Figura 5-A), uma das grandes divisões geotectónicas do território continental português. Esta Unidade Hidrogeológica constitui uma depressão alongada na direcção NE-SW, sendo marginada a W e N pelas formações Mesozóicas da Orla Ocidental, a NE e E pelo substracto Hercínico e a S comunica com o Atlântico, na Península de Setúbal (Figura 4) (Almeida *et al*, 2000a; Almeida *et al*, 2000b).

O enchimento desta grande bacia sedimentar compreende sedimentos Cenozóicos, nomeadamente, depósitos Paleogénicos e Neogénicos, recobertos em grande parte por depósitos Quaternários. A espessura total dos depósitos Cenozóicos da bacia pode atingir os 1400 m, entre Benavente e Coruche, podendo o Neogénico alcançar os 1200 m (Figura 4) (Almeida *et al*, 2000a; Almeida *et al*, 2000b).

A estrutura da bacia é relativamente simples, apresentando-se as formações que a preenchem sempre sub-horizontais, coincidindo os bordos com falhas normais, activas durante a subsidência da bacia. Segundo Ribeiro *et al*. (1979), somente no bordo NW, os terrenos Mesozóicos cavalgam o Terciário.

Do ponto de vista estrutural, interessa destacar a estrutura em “*graben*” com direcção N-S, entre Alcochete e Setúbal, com largura média de 2 km e associada com a presença de uma estrutura diapírica profunda na área de Pinhal Novo. Esta estrutura prolonga-se de Alcochete para Benavente, com orientação paralela ao leito do rio Tejo. A zona vestibular do vale do Tejo é caracterizada por uma actividade sísmica importante, relacionada com estruturas profundas, das quais se destaca a falha do Tejo, com orientação N30E (provável), mal conhecida devido a se encontrar coberta por aluviões e outros depósitos recentes (Almeida *et al*., 2000b).



| | | | |
|--|-----------------------|----|---|
| a | Aluviões (Holocénico) | P | Arenitos e conglomerados (Pliocénico) |
| Q ⁴ | 8 - 15 m | MP | Formação argilo-arenítica do vale do Ulme (Miocénico superior-Pliocénico) |
| Q ³ | 25 - 40 m | γπ | |
| Q ² | 50 - 65 m | | |
| Q ¹ | 75 - 95 m | | |
| Depósitos de terraços fluviais (Pleistocénico) | | | |

Figura 3 - Enquadramento geológico da captação PS1. Mapa elaborado com base nas folhas 27-D (Abrantes) e 31-B (Chouto) da Carta Geológica de Portugal à Escala 1/50 000. Referenciação Hayford-Gauss, ponto central. (Imagem retirada de Lima, 2008).

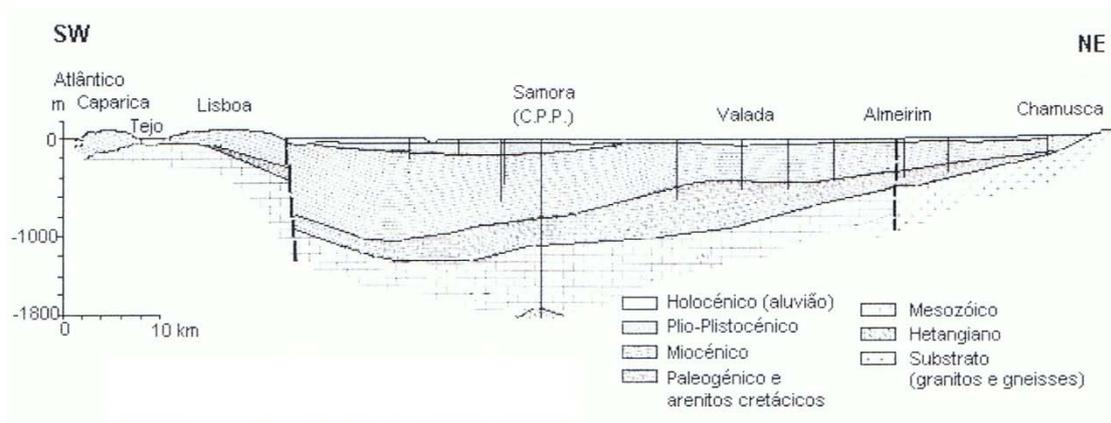


Figura 4 – Corte geológico longitudinal da Bacia do Tejo-Sado. Adaptado de Almeida *et al.* (2000b).

A área em estudo é essencialmente constituída por terrenos do Cenozóico, cuja idade se estende desde o Miocénico até à actualidade. Além destas formações cenozóicas, pode identificar-se, ainda, um pequeno retalho de rochas hercínicas, que correspondem a granitos alcalinos e calco-alcalinos de duas micas, porfiríodes, representados na parte mais a Norte da Figura 3.

As rochas mais recentes, do Holocénico, observam-se ao longo dos principais cursos de água da região e correspondem a aluviões que se encontram mais desenvolvidos no troço inferior do vale do Tejo, entre Vila Nova da Barquinha e Chamusca, onde o vale alarga. Estas aluviões são constituídas, maioritariamente, por areias e cascalheiras com algumas intercalações argilosas e com espessura de apenas alguns metros.

Estas camadas aluvionares estão presentes, também, em grande parte dos vales da região, nomeadamente, no vale da Ribeira de Ulme. Aqui, a W da povoação, as aluviões são representadas, nos furos de captações, por 3 m de areias soltas com seixos e calhaus (Gonçalves *et al.*, 1979).

O Plistocénico encontra-se representado por depósitos de terraços fluviais, cuja maior extensão se observa ao longo do vale do Tejo, encontrando-se outros depósitos mais reduzidos, nos vales afluentes, sobretudo nos do Rio Torto e da Ribeira de Ulme. Estes depósitos de antigos terraços fluviais encontram-se escalonados, em degraus, ao longo dos principais vales da região, às cotas de 8-15 m (Q⁴), 25-40 m (Q³), 50-60/65 m (Q²) e 75-95 m (Q¹) acima do nível das ribeiras e são constituídos, essencialmente, por

areias acastanhadas, saibros mais ou menos grosseiros e cascalheiras, podendo conter algumas intercalações argilosas (Gonçalves *et al.*, 1979; Zbyszewski *et al.*, 1979).

Na maioria das vezes, os depósitos são constituídos por materiais transportados pelas ribeiras mas, também, por cascalheiras de solifluxão e de transporte lateral, vindas de níveis de terraços mais altos, ou mesmo de cascalheiras de planaltos, do Pliocénico. Os retalhos de terraços podem ter uma extensão muito variável conforme os pontos, sendo que, geralmente, se tratam de afloramentos reduzidos, recortados pela erosão e separados uns dos outros. Constata-se, ainda, que nos principais vales da região, existe uma sucessão mais ou menos completa de todos os terraços, ao passo que, em outros vales de menor importância, aparecem apenas depósitos de terraços mais baixos e recentes (Zbyszewski *et al.*, 1979).

Na área representada na Figura 3, os retalhos de terraços dispõem-se, preferencialmente, ao longo da Ribeira de Ulme, assumindo maior expressão na margem direita, aquando da confluência com o Rio Tejo.

Os terrenos do Pliocénico ocupam os pontos altos da topografia da região, formando uma série de relevos residuais mais ou menos desenvolvidos, particularmente, na margem esquerda da Ribeira de Ulme. Trata-se de depósitos do antigo estuário (pré-Tejo), um conjunto Pliocénico Superior e, provavelmente, Vilafranquiano, de origem continental, constituído por cascalheiras de planalto, arenitos argilosos avermelhados e acastanhados, areias e conglomerados com algumas intercalações argilosas acinzentadas. Em diversos locais da região, a cobertura Pliocénica assenta sobre os terrenos Miocénicos subjacentes, ravinando-os (Gonçalves *et al.*, 1979; Zbyszewski *et al.*, 1979).

A formação argilo-arenítica do Vale de Ulme e de quase todos os vales da região constitui um complexo Miocénico continental sujeito a variações laterais de fácies. Assim sendo, algumas zonas são mais argilosas e outras, ainda que contenham algumas camadas de argila, são mais detríticas, mais arenosas e mais cascalhentas, apresentando uma sedimentação irregular. Em determinados casos, a parte superior, gresoso-arenosa com seixos, carrega-se de níveis de conglomerados, os quais ravinam as camadas subjacentes e dão passagem às cascalheiras Pliocénicas dos planaltos, tornando difícil a separação das duas formações. Esta formação argilo-arenítica do Miocénico é a

dominante na área de implantação da captação PS1 e em toda a região de Ulme (Figura 3) (Gonçalves *et al.*, 1979; Zbyszewski *et al.*, 1979).

As rochas mais antigas, que afloram nesta área, correspondem a granitos alcalinos de duas micas, porfiróides e ocorrem, apenas, no sector Norte da área em estudo (Figura 3) tratando-se de uma mancha isolada, de dimensão hectométrica, localizada próximo do vértice geodésico de Figueiras. Para Norte da área representada na Figura 3, estes afloramentos ígneos tornam-se mais expressivos, principalmente nas margens do Rio Tejo, revelando a presença do soco Hercínico a pequena profundidade.

2.3. Hidrogeologia

Do ponto de vista hidrogeológico, a área em estudo está integrada na Bacia Terciária do Tejo-Sado, mais especificamente no sistema aquífero da Margem Esquerda do Rio Tejo, o qual, juntamente com o da Margem Direita, as Aluviões do Tejo e a Bacia de Alvalade, constituem o maior sistema aquífero do território nacional (Figura 5-B). Os recursos hídricos subterrâneos desta Unidade Hidrogeológica têm constituído um importantíssimo factor de desenvolvimento, pois tem assegurado numerosos abastecimentos urbanos, industriais e agrícolas.

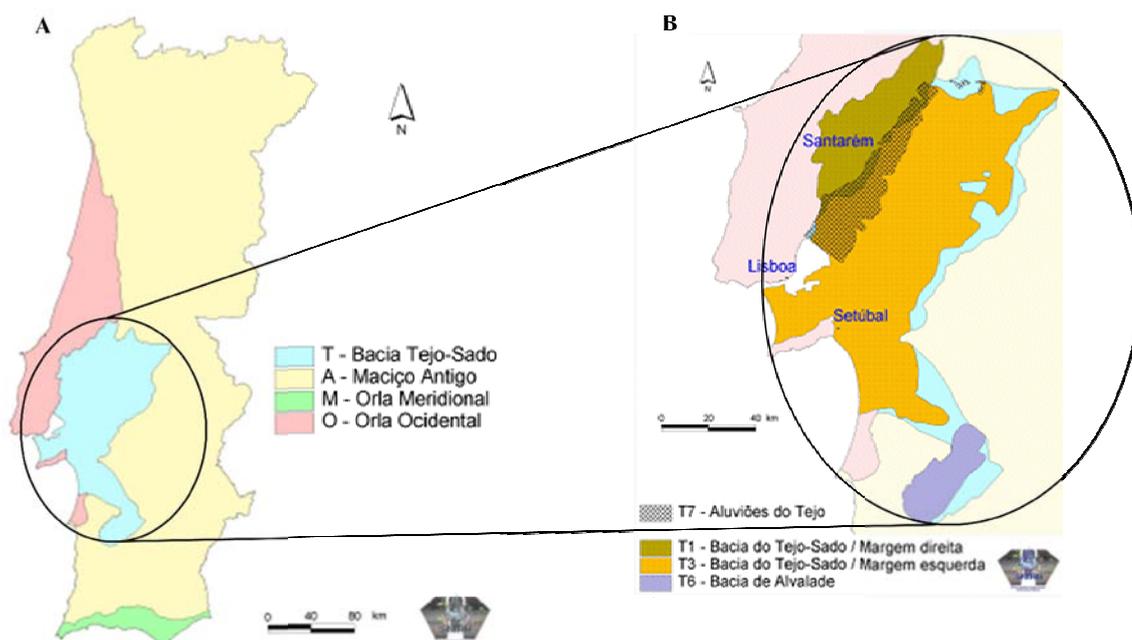


Figura 5 – **A:** Unidades Hidrogeológicas de Portugal Continental. **B:** Pormenor da Bacia Terciária do Tejo-Sado. (Imagem obtida em <http://snirh.pt/>).

A divisão da Bacia nos seus quatro sistemas aquíferos encerra algo de artificial (excepto no caso da Bacia de Alvalade), dado não existirem fronteiras bem definidas entre eles. Contudo, existem diferenças evidentes nas séries sedimentares, resultantes de diferenças nos ambientes de deposição, traduzidas, sob o ponto de vista hidrogeológico, em diferenças na produtividade e no quimismo das águas (Almeida *et al.*, 2000a). Segundo Almeida *et al.* (2000b), as Aluviões do Tejo deverão ser as áreas de descarga dos sistemas aquíferos subjacentes (Margem Direita e Margem Esquerda), sendo o Rio Tejo o eixo drenante principal da bacia, constituindo-se, assim, como uma divisória hidráulica que justifica a separação entre sistemas aquíferos da Margem Direita e Margem Esquerda.

No limite NW, o sistema aquífero da Margem Esquerda é coberto pelas Aluviões do Tejo, sendo os limites NE, SE e S constituídos pelos contactos com rochas ígneas e metamórficas do Maciço Hespérico. Os cursos de água principais, provenientes deste maciço, cortam as formações Terciárias através de vales largos e pouco profundos, constatando-se que as direcções principais da rede de drenagem são NE-SW ou SE-NW, mudando para E-W quando do corte com os terrenos Quaternários (Almeida *et al.*, 2000b).

O sistema aquífero da Margem Esquerda é formado por várias camadas porosas, geralmente confinadas ou semiconfinadas, sendo frequentes as variações laterais e verticais nas fácies litológicas, que provocam mudanças significativas nas condições hidrogeológicas. Dada esta complexidade, ocorrem camadas aquíferas alternadas com outras de baixa ou muito baixa permeabilidade – aquíferos e aquíferos -, existindo locais com predomínio de uma ou outra classe de formações hidrogeológicas. As características do sistema variam em função da importância das camadas Pliocénicas e da constituição e espessura das formações Miocénicas (Almeida *et al.*, 2000b).

Dada a extensão e complexidade deste sistema aquífero (da Margem Esquerda), é possível individualizar três tipos de escoamentos e áreas hidrogeologicamente diferenciadas:

- Escoamentos locais, ou seja, escoamentos pouco extensos cujas áreas de descarga são as linhas de água adjacentes e as de recarga são os interflúvios. Predominam os sentidos de fluxo descendentes e laterais;

- Escoamentos extensos e profundos, com circulação à escala da bacia, onde é possível individualizarem-se as zonas de recarga, de transferência e de descarga. Nas zonas de recarga o fluxo é descendente e nas zonas de descarga é ascendente. Estas

zonas correspondem às áreas adjacentes ao grande eixo drenante (o Rio Tejo) e ao nível de base da bacia hidrográfica (nível médio no Oceano Atlântico);

– Escoamentos intermédios, que podem incluir uma ou mais bacias dos tributários principais.

Segundo aqueles autores, a configuração geral do escoamento subterrâneo da Bacia do Tejo-Sado deverá dar-se em direcção ao Rio Tejo e ao longo do sistema aquífero até ao Oceano Atlântico.

O sistema aquífero é recarregado pela precipitação atmosférica, por infiltração nos leitos das linhas de água, na parte mais elevada do seu percurso na bacia.

Para a caracterização dos principais aspectos da produtividade e qualidade das águas do sistema aquífero da Margem Esquerda do Rio Tejo, serão considerados, separadamente, os aquíferos que têm como suportes principais: o Pliocénico, o Miocénico com características marcadamente continentais (Arenitos de Ota) e o Miocénico francamente marinho (Série calco-gresosa marinha).

De um modo geral, estas formações aquíferas dominantes são constituídas por: areias, com intercalações lenticulares de argilas, no caso do Pliocénico; arenitos com algumas intercalações de argilas, no Miocénico com características marcadamente continentais; e arenitos calcários e margas, com espessuras superiores a 450 m, no Miocénico francamente marinho (Almeida *et al.*, 2000b).

2.3.1. Parâmetros Hidráulicos e Produtividade

2.3.1.1. Caudais

As produtividades das captações implantadas nas três formações aquíferas dominantes são caracterizadas pelas estatísticas apresentadas na Tabela 1.

De acordo com estes dados, pode constatar-se que os caudais variam bastante, consoante o tipo de formação aquífera dominante, sendo nas formações Pliocénicas e nas Miocénicas francamente marinhas que se encontram caudais mais elevados e cujos valores de médias e medianas se encontram mais próximos.

A produtividade mediana das captações implantadas no Pliocénico é de 15,5 L/s, enquanto que nas formações Miocénicas com características marcadamente continentais

Tabela 1 – Principais estatísticas dos caudais (L/s) para as três formações aquíferas dominantes na Margem Esquerda do Rio Tejo. (Dados obtidos em Almeida *et al.*, 2000b)).

| Formação Aquífera Dominante | Estatísticas dos caudais (L/s) | | | | | | | |
|---|--------------------------------|-------|---------------|--------|----------------|---------|----------------|--------|
| | Nº dados | Média | Desvio Padrão | Mínimo | Q ₁ | Mediana | Q ₃ | Máximo |
| Pliocénico | 124 | 18,6 | 14,0 | 0,1 | 8,1 | 15,5 | 24,0 | 66,6 |
| Miocénico com características marcadamente continentais | 134 | 14,7 | 15,6 | 0,5 | 5,6 | 9,7 | 16,8 | 90,0 |
| Miocénico francamente marinho | 67 | 39,1 | 25,5 | 4,1 | 9,6 | 35,0 | 54,4 | 110,0 |

o valor mediano de produtividade desce para 9,7 L/s, o valor mais baixo encontrado no sistema aquífero da Margem Esquerda. Por sua vez, nas formações Miocénicas francamente marinhas, a produtividade encontrada é a mais elevada deste sistema aquífero, atingindo um valor mediano de 35,0 L/s (Almeida *et al.*, 2000b). Segundo estes autores, a produtividade das captações é mais elevada na região central, onde o sistema é coberto por aluviões e terraços. Para leste, os caudais diminuem, constatando-se que na região a leste da Chamusca, os caudais são, geralmente, inferiores à mediana.

2.3.1.2. Transmissividades

Os valores de transmissividade encontrados nas captações implantadas nas três formações aquíferas dominantes são apresentados na Tabela 2.

Segundo os dados apresentados na Tabela 2, os valores de transmissividade mais frequentes do sistema aquífero da Margem Esquerda situam-se entre os 100 m²/dia e os 700 m²/dia, sendo que as três formações apresentam diferenças significativas entre si. Assim sendo, a transmissividade do sistema aquífero é muito variável, exibindo valores menores de transmissividade nas formações Miocénicas com características marcadamente continentais. Contrariamente, como já se verificou nos valores de produtividade das captações (Tabela 1), são as formações Miocénicas francamente marinhas que apresentam os valores médios mais elevados.

Tabela 2 – Valores de transmissividade (m^2/dia), obtidos por ensaios de bombagem e por caudais específicos e valores de transmissividade mais frequentes, para as três formações aquíferas dominantes na Margem Esquerda do Rio Tejo. (Dados obtidos em Almeida *et al.* (2000b)).

| Formação Aquífera Dominante | Transmissividade (m^2/dia) | | | | |
|---|--------------------------------|--|----------|---|----------------------------------|
| | Nº dados | Transmisividade (obtida por ensaios de bombagem) | Nº dados | Transmisividade estimada (obtida por caudais específicos) | Transmisividade (mais frequente) |
| Pliocénico | 15 | 100-3000 | 135 | 19-2029 | 97-305 |
| Miocénico com características marcadamente continentais | 2 | 129-500 | 176 | 3-1500 | 45-179 |
| Miocénico francamente marinho | 2 | 1728-3456 | 101 | 29-4100 | 127-693 |

2.3.1.3. Coeficientes de armazenamento

Almeida *et al.* (2000b) referem valores médios de coeficiente de armazenamento de $S_{250}=1,6 \times 10^{-3}$, para a série 250 (isto é, furos que captam água até profundidades de 250 a 350 m) e $S_{500}=5,9 \times 10^{-4}$, para a série 500 (ou seja, para furos que vão abaixo da profundidade de 350 m). Segundo aqueles autores, o valor $S=2,2 \times 10^{-3}$ deverá ser uma boa estimativa do coeficiente de armazenamento da espessura total do aquífero Terciário captado.

2.3.2. Balanço Hídrico

O sistema aquífero da Margem Esquerda tem sido objecto de vários estudos entre os quais se destaca o projecto da Península de Setúbal, de que resultou um modelo matemático, onde são integrados os sistemas da Margem Direita, Margem Esquerda e Aluviões do Tejo (Almeida *et al.*, 2000b).

Este estudo avaliou os recursos renováveis do conjunto de sistemas considerados em $1100 \text{ hm}^3/\text{ano}$. Contudo, tendo em conta as características litológicas e topográficas do sistema, Almeida *et al.* (2000b) consideram preferível adoptar valores mais conservativos, propondo como valor aceitável cerca de $700 \text{ hm}^3/\text{ano}$. Concluem, ainda,

que o sistema é excedentário, pelo que o balanço global é equilibrado, principalmente, através de saídas para a rede de drenagem superficial.

2.3.3. Qualidade das águas

Em termos hidrogeoquímicos, os dados analíticos utilizados por Almeida *et al.* (2000b) datam da década de noventa, tendo sido obtidos, na maior parte, em captações de abastecimento público, correspondendo a colheitas realizadas em diferentes anos, mas para o mesmo ponto de água.

Para captações instaladas no Pliocénico, as fácies das águas encontradas são cloretadas sódicas e cálcicas, com algumas fácies bicarbonatada calco-magnésiana (Figura 6). Este tipo de fácies bicarbonatada, também se encontra nas águas provenientes das formações do Miocénico francamente marinho (Figura 7). Já no caso das formações Miocénicas com características marcadamente continentais, as fácies encontradas são bicarbonatada sódica e cálcica (Figura 8), o que demonstra bem o carácter predominantemente carbonatado destas formações (Almeida *et al.*, 2000b).

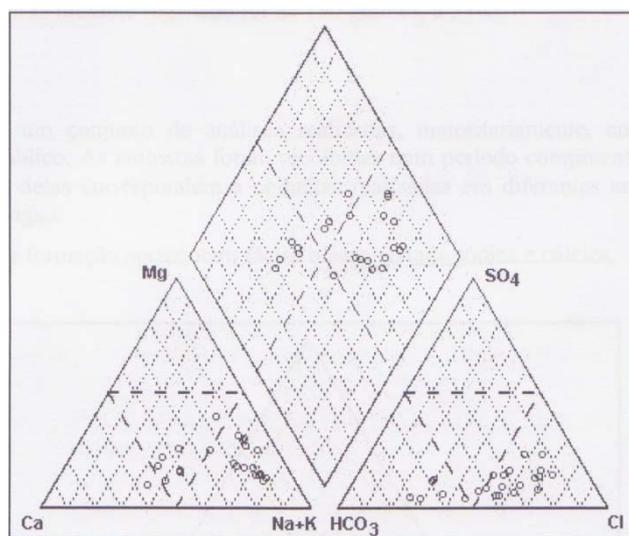


Figura 6 – Diagrama de Piper para o Pliocénico, no sistema aquífero da Margem Esquerda do Rio Tejo (Imagem retirada de Almeida *et al.*, 2000b).

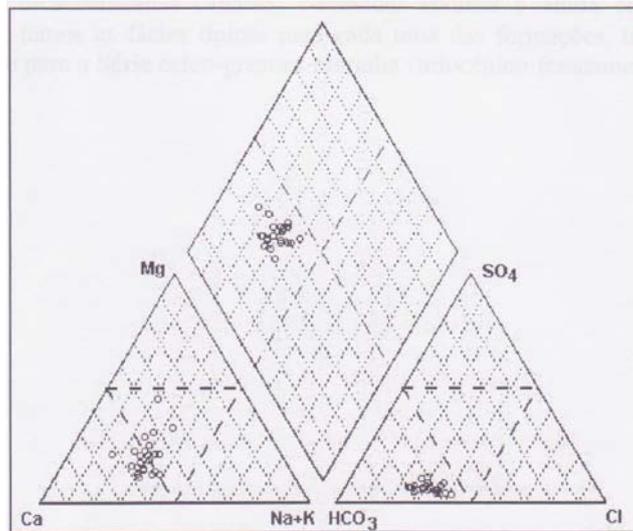


Figura 7 – Diagrama de Piper para o Miocénico francamente marinho, no sistema aquífero da Margem Esquerda do Rio Tejo (Imagem retirada de Almeida *et al.*, 2000b).

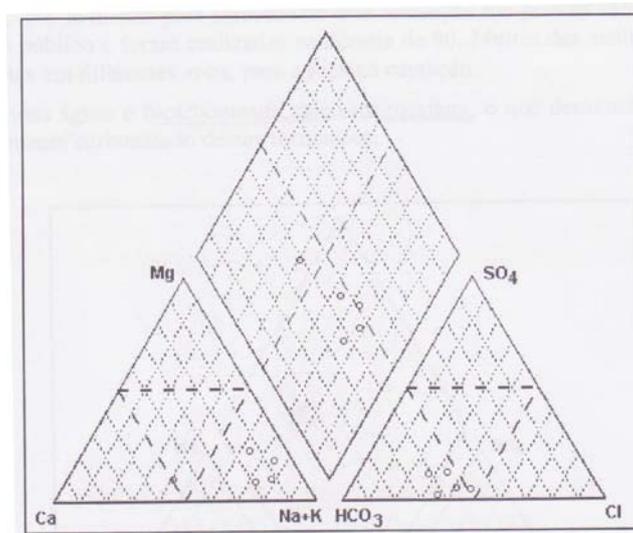


Figura 8 – Diagrama de Piper para o Miocénico com características marcadamente continentais, no sistema aquífero da Margem Esquerda do Rio Tejo (Imagem retirada de Almeida *et al.*, 2000b).

Relativamente à qualidade da água para consumo humano, as águas não apresentam, de um modo geral, teores incompatíveis com este uso. Contudo, os valores de cloretos, sódio e condutividade excedem os valores legalmente estabelecidos, em vários casos (Almeida *et al.*, 2000a).

3. CARACTERIZAÇÃO DA CAPTAÇÃO PS1

A captação em estudo – captação PS1 – foi efectuada em Abril de 2001 pela empresa PERSONDA, Sociedade de Perfurações e Sondagens, S. A.. Como tal, é a partir do relatório apresentado por esta empresa (PERSONDA, 2001), que irei descrever as características da captação, nomeadamente, em termos do método de perfuração utilizado, a coluna litológica atravessada, a coluna de revestimento, o preenchimento do espaço anular e, por fim, o sistema de extracção utilizado. Neste capítulo, irei, ainda, fazer uma breve síntese da caracterização físico-química e radiológica da água captada em PS1, recorrendo, para tal, aos dados apresentados por Lima (2008).

3.1. Perfuração

A perfuração foi efectuada pelo método de circulação inversa, atingindo-se uma profundidade total de 182 m. Foi iniciada com um diâmetro de 508 mm até aos 92 m de profundidade, prosseguindo até aos 182 m com um diâmetro de 445 mm (Figura 10).

3.2. Coluna litológica

As formações geológicas atravessadas pela perfuração encontram-se descritas em pormenor na Figura 10, sendo que são constituídas por areias, argilas, arenitos/grés e cascalheira.

3.3. Coluna de revestimento

A coluna de revestimento atinge a profundidade de 169 m, tendo diâmetros inicial e final de 330 mm e 225 mm, respectivamente. É constituída por tubo PVC Preussag SBF-K, com ranhuras de 1,5 mm nas porções drenantes (Figura 10).

3.4. Espaço anular

O espaço compreendido entre as paredes do furo e a coluna de revestimento foi preenchido por um dreno de seixo calibrado, colocado entre os 70 m e os 182 m de profundidade. Segundo o relatório antes referido (PERSONDA, 2001), a granulometria utilizada mostrou-se adequada às características das camadas aquíferas aproveitadas. De forma a isolar os aquíferos captados, na porção acima dos 70 m foi colocado material de baixa permeabilidade, composto por compactonite e outras argilas (Figura 10).

3.5. Sistema de extracção

A extracção de água na captação PS1 é assegurada por uma bomba submersível, marca Grundfos, modelo SP 46-17, com uma potência máxima de 26 kW. No seu rendimento máximo, a bomba debita um caudal de 46 m³/h, para uma altura manométrica de 149 m, que assegura a elevação da água até à unidade industrial de engarrafamento (Figura 9).

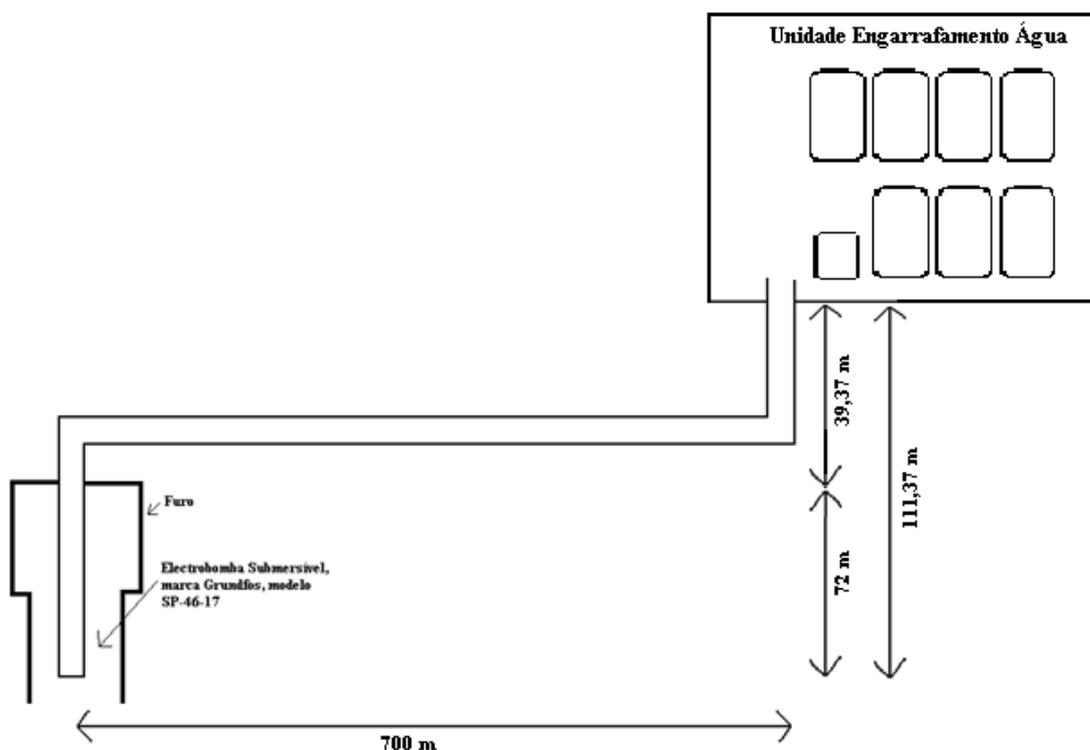


Figura 9 – Esquema representativo da posição relativa da captação e da unidade de engarrafamento de água.

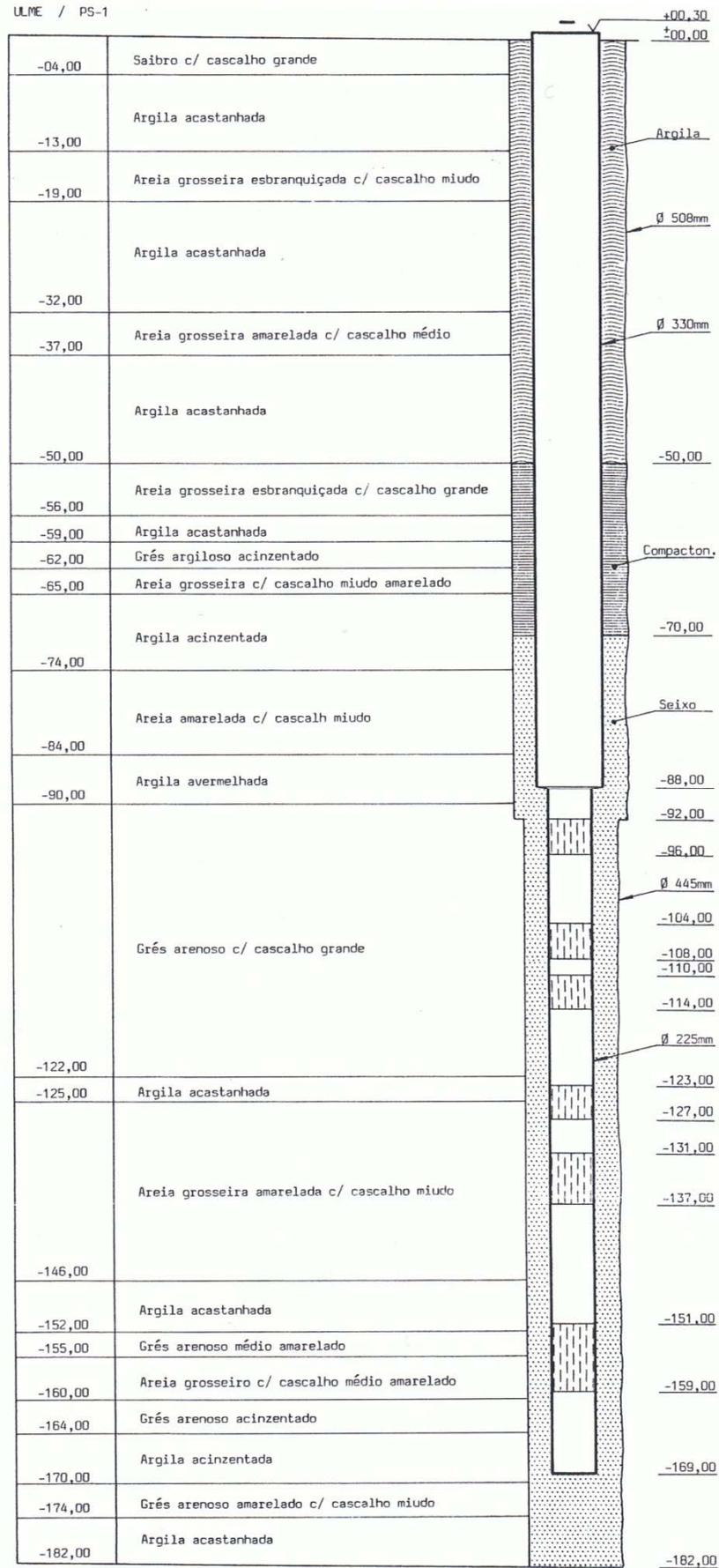


Figura 10 – Representação esquemática das características gerais da perfuração e da captação PS1, incluindo a coluna litológica e os diâmetros de perfuração e revestimento. (Imagem retirada de Lima, 2008).

3.6. Caracterização físico-química e radiológica da água

3.6.1. Caracterização físico-química

A caracterização físico-química da água da captação PS1 foi efectuada com base em 8 relatórios de análises físico-químicas relativas a amostras colhidas regularmente durante o ano de 2008. Estas análises foram realizadas no Laboratório do Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação, I. P. (INETI), em S. Mamede de Infesta.

Tabela 3 – Dados estatísticos da composição química (componente maioritária) da água da captação PS1. Concentração dos aniões, dos cationes e da sílica em mg/L; condutividade em $\mu\text{S/cm}$, a 25°C ; dureza em mg/L de CaCO_3 ; resíduo seco em mg/L. Dados obtidos em Lima (2008).

| N = 8 | Mediana | Desvio padrão | Coef. Var. |
|---------------------------|---------|---------------|------------|
| pH | 6,30 | 0,10 | 0,020 |
| Condutividade | 144 | 2,28 | 0,015 |
| Dureza | 14,0 | 2,21 | 0,154 |
| SiO_2 | 61,8 | 2,71 | 0,044 |
| Resíduo seco | 145 | 3,06 | 0,021 |
| F^- | 0,18 | 0,071 | 0,357 |
| Cl^- | 23,8 | 0,81 | 0,034 |
| HCO_3^- | 43,3 | 0,53 | 0,012 |
| SO_4^{2-} | 3,6 | 0,21 | 0,060 |
| H_2PO_4^- | 1,20 | 0,062 | 0,053 |
| NO_3^- | 0,52 | 0,059 | 0,117 |
| Na^+ | 26,5 | 0,35 | 0,013 |
| K^+ | 2,2 | 0,083 | 0,038 |
| Mg^{2+} | 2,3 | 0,142 | 0,062 |
| Ca^{2+} | 1,4 | 0,044 | 0,031 |

Na Tabela 3 apresenta-se uma síntese da composição maioritária da água da captação PS1, através dos valores de alguns parâmetros estatísticos (mediana, desvio padrão e coeficiente de variação).

A água da captação em estudo apresenta um pH ligeiramente ácido, com um valor mediano de 6,30. Este valor é ligeiramente menor que o limite inferior do intervalo paramétrico definido pelo Decreto-Lei nº 156/98 de 6 de Junho ($>6,5$ e ≤ 9), enquadrando-se, contudo, no intervalo da maioria das águas naturais (Hem, 1985). Aliás, o artigo 12º do Decreto-Lei referido prevê que as águas não cumpram os valores

de pH fixados legalmente, embora determine um limite superior de pH de 9,5. A elevada estabilidade deste parâmetro na água traduz-se por um coeficiente de variação de 2%.

A condutividade apresenta um valor mediano de 144 $\mu\text{S}/\text{cm}$ sendo, desse modo, uma água com uma mineralização incipiente. Trata-se, também, de um parâmetro bastante estável na água (coeficiente de variação de 1,5%).

A dureza desta água é muito baixa (valor mediano de 14,0 mg/L CaCO_3), estando relacionado com as baixas concentrações de cálcio e de magnésio. A classificação das águas com base na sua dureza difere de região para região, de acordo com as características das águas que, por sua vez, estão relacionadas com o tipo de rocha por onde circulam. Porém, independentemente da classificação adoptada, a água da captação PS1 é uma água branda, uma vez que os valores de dureza são claramente inferiores aos diferentes limites superiores da classe das águas brandas (60 mg/L de CaCO_3 , segundo Durfor e Becker (1962); 50 mg/L de CaCO_3 , segundo Zuane (1997)).

O teor em sílica apresenta um valor mediano de 61,8 mg/L, sendo um valor relativamente elevado comparativamente com os teores da maioria das águas naturais (40 mg/L, segundo Custódio e Llamas (1983)). Este teor de sílica representa, assim, quase 40% da mineralização total da água.

A baixa mineralização da água em estudo é evidenciada pelo seu resíduo seco, cujo valor mediano é de 145 mg/L. Como se pode constatar, este valor é muito semelhante ao valor da condutividade eléctrica (144 $\mu\text{S}/\text{cm}$), o que não é habitual na maioria das águas naturais, em que a condutividade é, normalmente, superior ao valor do resíduo seco. Tal facto advém da elevada concentração de sílica que, não contribuindo para a condutividade da água, intervém significativamente na determinação do resíduo seco. Neste parâmetro, está também patente a elevada estabilidade da água, uma vez que a dispersão dos dados é baixa, com um coeficiente de variação de 2,1%. De acordo com o Decreto-Lei nº 156/98 de 6 de Junho, esta água é considerada oligomineral ou pouco mineralizada.

A concentração de fluoreto na água em estudo é muito baixa, com um valor mediano de 0,18 mg/L, inferior ao valor paramétrico (1,5 mg/L) estabelecido no Decreto-Lei nº 306/2007 de 27 de Agosto. Como se pode constatar na Tabela 3, este parâmetro apresenta o coeficiente de variação mais elevado (35,7%). Contudo, dada a elevada estabilidade dos outros parâmetros, esta aparente variabilidade deverá ser reflexo da sensibilidade do método analítico e das respectivas imprecisões.

A concentração de cloreto surge com um valor mediano de 23,8 mg/L e um coeficiente de variação de 3,4%, o que traduz uma elevada estabilidade da água quanto a este parâmetro. A nível aniónico, o cloreto é o segundo componente em maior concentração na água, depois do bicarbonato. Porém, o teor é muito inferior ao valor paramétrico (250 mg/L) definido na legislação anteriormente referida.

Como se disse, o bicarbonato é o anião dominante na estrutura maioritária da água da captação em estudo, surgindo com uma concentração mediana de 43,3 mg/L. É de salientar a sua estabilidade temporal, que se manifesta por um coeficiente de variação de apenas 1,2% (o menor coeficiente de variação de entre todos os parâmetros estudados).

O sulfato apresenta-se com uma concentração mediana de 3,6 mg/L, muito inferior à concentração do bicarbonato e do cloreto, apesar de ser o terceiro anião mais abundante na água em estudo. O teor mediano referido está muito aquém do limite estabelecido legalmente (250 mg/L).

Em termos de abundância, o fosfato surge a seguir ao sulfato, com uma concentração mediana de 1,20 mg/L, acompanhado de um baixo valor de coeficiente de variação (5,3%).

Por fim, os aniões do ciclo do azoto (NO_3^- e NO_2^-) apresentam-se com concentrações medianas muito baixas: 0,52 mg/L, para os nitratos, e sempre inferiores a 0,01 mg/L, no caso dos nitritos.

Em termos catiónicos, o sódio é o ião dominante, apresentando uma concentração mediana de 26,5 mg/L. Porém, este valor é muito inferior ao valor paramétrico (200 mg/L) definido legalmente. Juntamente com o bicarbonato, o sódio é dos parâmetros mais estáveis (coeficiente de variação de 1,3%).

As concentrações medianas do potássio e do magnésio são semelhantes, apresentando valores de 2,2 mg/L e 2,3 mg/L, respectivamente. Os seus coeficientes de variação baixos traduzem a estabilidade temporal destes parâmetros.

O cálcio surge na água com uma concentração mediana de 1,4 mg/L, sendo também um parâmetro bastante estável. Tal como acontece para o magnésio, o cálcio também não tem valores paramétricos definidos pelo Decreto-Lei nº 306/2007 de 27 de Agosto. Os únicos valores expressos neste diploma legal, relativamente a estes dois parâmetros, são limites superiores que será desejável não serem ultrapassados (100 mg/L, no caso do cálcio e 50 mg/L, no caso do magnésio). Assim sendo, as concentrações medianas destes dois parâmetros na água, estão muito aquém dos limites referidos.

Em suma, conclui-se que a água da captação PS1, relativamente à sua componente maioritária, é dominada pelo bicarbonato e pelo cloreto, no que respeita aos aniões, e pelo sódio, no caso dos catiões. Globalmente, a generalidade dos parâmetros demonstra uma elevada estabilidade composicional da água, sendo que as maiores dispersões ocorrem nos parâmetros que surgem em menores concentrações. Assim sendo, em termos de estrutura química principal, a água da captação PS1 é muito estável e não exhibe efeitos sazonais.

Na Figura 11 projectam-se os pontos representativos da composição das amostras de água da captação PS1 no diagrama de Piper. Como se pode observar nesta figura, não é possível individualizar os oito pontos projectados, devido quase à total sobreposição dos referidos pontos. Tal facto ilustra claramente a estabilidade composicional da água ao longo do período de monitorização.

Este aspecto é enfatizado quando se projectam os dados no diagrama de Schoeller, onde se constata somente uma ténue dispersão nos teores de magnésio e de sulfato, favorecida pela escala mais discriminante (Figura 12).

Os diagramas apresentados mostram que a água da captação em estudo pode ser classificada como bicarbonatada-cloretada sódica, dada a predominância destes iões. Os elevados teores em sílica conferem singularidade a esta água, de tal forma que, à classificação antes referida, dever-se-á acrescentar a menção siliciosa, de modo a enfatizar este aspecto. Em conclusão, a água da captação PS1 é uma água bicarbonatada-cloretada sódica, siliciosa.

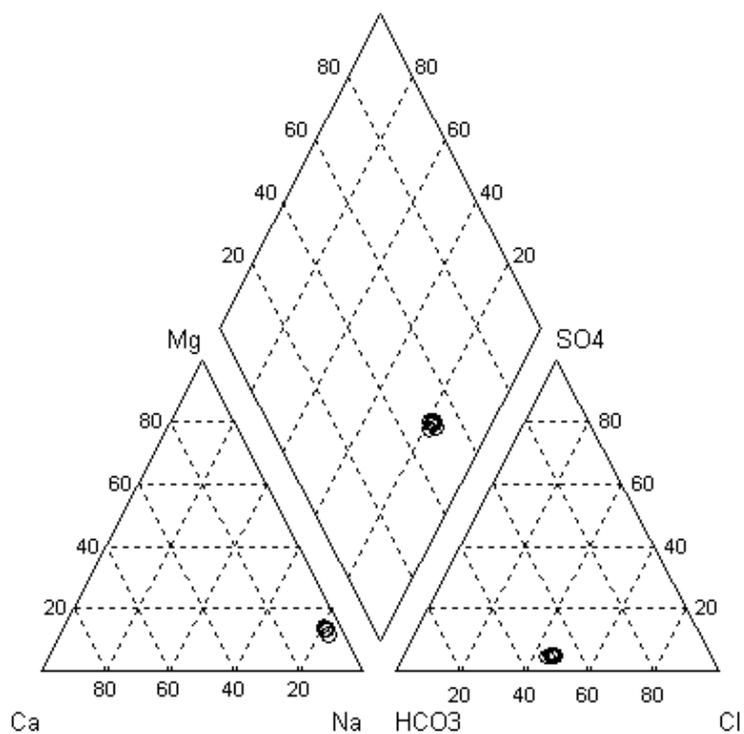


Figura 11 – Projecção da composição química das amostras da capturação PS1 no diagrama de Piper. (Imagem retirada de Lima, 2008).

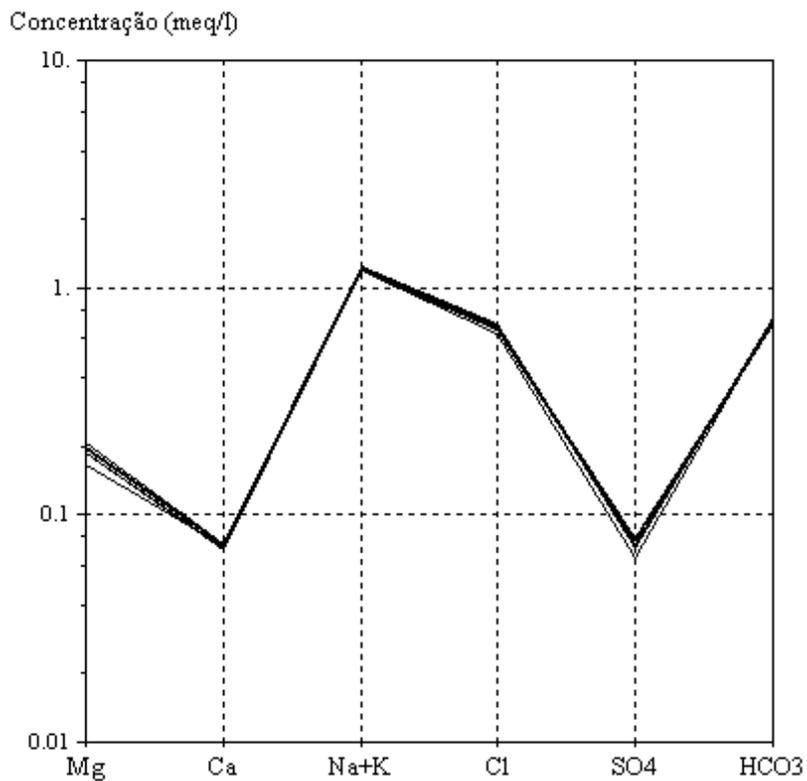


Figura 12 – Projecção da composição química das amostras da capturação PS1 no diagrama de Schoeller. (Imagem retirada de Lima, 2008).

Além da estrutura química principal, a água em estudo é também caracterizada pela sua componente vestigiária, de que fazem parte os elementos que surgem nas águas, normalmente em concentrações da ordem dos $\mu\text{g/L}$ (como acontece com a maioria dos elementos da tabela periódica, à excepção dos incluídos na componente maioritária). Assim sendo, nas análises físico-químicas da água em estudo, anteriormente referidas, Lima (2008) menciona que foram pesquisados os seguintes trinta e três elementos vestigiais, ordenados de acordo com o número atómico: lítio (Li), berílio (Be), boro (B), alumínio (Al), vanádio (V), crómio (Cr), manganês (Mn), cobalto (Co), níquel (Ni), cobre (Cu), zinco (Zn), arsénio (As), selénio (Se), rubídio (Rb), estrôncio (Sr), ítrio (Y), zircónio (Zr), nióbio (Nb), molibdénio (Mo), prata (Ag), cádmio (Cd), estanho (Sn), antimónio (Sb), telúrio (Te), céscio (Cs), bário (Ba), tântalo (Ta), tungsténio (W), mercúrio (Hg), tálio (Tl), chumbo (Pb), bismuto (Bi) e urânio (U).

Ainda que estes elementos possam surgir na água, habitualmente, em concentrações muito baixas, a pesquisa deles é fundamental para a avaliação da qualidade da água uma vez que, alguns deles, mesmo em baixas concentrações, apresentam elevada toxicidade para o organismo humano.

Do extenso leque de elementos acima referidos, a maioria deles não apresenta concentrações detectáveis pela metodologia analítica utilizada (ICP-MS), sendo somente dez os elementos que em todas as amostras de água surgiram com concentrações acima dos limites de quantificação. Na Tabela 4 estão expostos alguns parâmetros estatísticos relativos a estes elementos.

Tabela 4 – Dados estatísticos da composição química (componente vestigiária) da água da captação PS1. Concentrações em $\mu\text{g/L}$. Dados obtidos em Lima (2008).

| N = 8 | Mediana | Desvio padrão | Coef. Var. |
|--------------|----------------|----------------------|-------------------|
| Li | 23,5 | 1,98 | 0,09 |
| B | 8,0 | 0,35 | 0,05 |
| Al | 2,4 | 1,57 | 0,57 |
| V | 0,71 | 0,12 | 0,16 |
| Zn | 1,3 | 96,6 | 2,54 |
| As | 4,20 | 0,23 | 0,05 |
| Rb | 0,70 | 0,13 | 0,17 |
| Sr | 22,4 | 0,52 | 0,02 |
| Ba | 7,1 | 0,82 | 0,12 |
| U | 0,10 | 0,01 | 0,06 |

Os teores em lítio apresentam um valor mediano de 23,5 µg/L que, não sendo muito elevado, é superior ao valor mediano nas águas subterrâneas (3,6 µg/L), referido por Reimann e Caritat (1998). A legislação portuguesa não estabelece um valor paramétrico para este elemento.

O boro encontra-se com um valor mediano de 8,0 µg/L e, contrariamente ao lítio, este teor de boro é inferior ao das águas subterrâneas (20,6 µg/L), segundo Reimann e Caritat (1998). Para este elemento, a legislação em vigor (Decreto-Lei nº 306/2007 de 27 de Agosto) fixa um valor paramétrico de 1000 µg/L de boro nas águas destinadas a consumo humano.

O alumínio surge em concentrações medianas de 2,4 µg/L, valor inferior quer ao das águas subterrâneas (12 µg/L) referido por Reimann e Caritat (1998), quer ao valor paramétrico (200 µg/L) estabelecido pela legislação portuguesa.

A concentração mediana do vanádio é de 0,71 µg/L, ligeiramente superior ao valor referido por Reimann e Caritat (1998) para as águas subterrâneas (0,5 µg/L). Na legislação portuguesa, não está estabelecido qualquer valor paramétrico para este elemento.

O zinco, ao contrário dos restantes elementos, surge na água em concentrações muito distintas, que se traduzem por um elevado desvio padrão (96,6 µg/L) e coeficiente de variação (25,4%). A sua concentração mediana (1,3 µg/L) é inferior à mediana das águas subterrâneas (23,4 µg/L). Também para este elemento não se encontra definido um valor paramétrico nas águas para consumo humano.

A concentração mediana de arsénio (4,20 µg/L) é inferior ao valor paramétrico (10 µg/L) definido legalmente, mas é superior ao teor mediano registado nas águas subterrâneas (0,2 µg/L) referido por Reimann e Caritat (1998).

O rubídio apresenta-se com uma concentração mediana de 0,70 µg/L, inferior à mediana encontrada nas águas subterrâneas (2,3 µg/L), referida por Reimann e Caritat (1998). Quanto à legislação portuguesa, não se encontra fixado nenhum valor paramétrico para este elemento.

O estrôncio é o segundo elemento vestigial mais abundante na água da captação PS1, a seguir ao lítio. Surge em concentrações medianas de 22,4 µg/L, um valor muito inferior aos teores referidos por Reimann e Caritat (1998), cujo valor mediano é de

179,4 µg/L. Na legislação portuguesa, não há um valor paramétrico definido para este elemento.

A concentração mediana do bário (7,1 µg/L) é inferior à mediana nas águas subterrâneas (16,7 µg/L) referida por Reimann e Caritat (1998). Na legislação nacional não há qualquer valor paramétrico definido para este elemento nas águas de consumo humano.

O urânio apresenta-se com uma concentração mediana de 0,10 µg/L, estável ao longo do período de monitorização das águas da captação em estudo. Este teor de urânio é bastante inferior ao teor mediano das águas subterrâneas (3,5 µg/L) referido por Reimann e Caritat (1998). Para este elemento, a legislação portuguesa não prevê qualquer valor paramétrico.

Em suma, pode-se concluir que, relativamente à componente vestigiária, a água da captação PS1 não tem qualquer limitação de ordem composicional para a sua utilização como água de consumo humano. Da mesma forma, também a sua estrutura química principal é favorável a esta utilização.

3.6.2. Caracterização radiológica

O estudo radiológico da água da captação PS1 apresentado por Lima (2008) envolveu uma análise dos parâmetros alfa e beta totais, efectuada pelo Laboratório de Radioactividade Natural do Departamento de Ciências da Terra da Universidade de Coimbra. Os resultados analíticos encontram-se expressos na Tabela 5, juntamente com os valores paramétricos estabelecidos no Decreto-Lei nº306/2007 de 27 de Agosto.

Tabela 5 – Resultados das análises radiológicas. Dados obtidos em Lima (2008).

| Parâmetro | Resultado (Bq/L) | Valor paramétrico (Bq/L) |
|------------------|-------------------------|---------------------------------|
| Alfa total | 0,01 | 0,5 |
| Beta total | 0,04 | 1 |

Diante destes resultados analíticos, conclui-se que a água da captação PS1 está em conformidade com o disposto na legislação, podendo, por isso, ser utilizada sem restrições para o consumo humano.

4. METODOLOGIA

Para a concretização dos objectivos inicialmente propostos (capítulo 1, ponto 1.2), a metodologia adoptada no presente trabalho de investigação compreende os seguintes quatro aspectos principais: 1) Determinação das características hidráulicas do aquífero, mediante a realização e interpretação de ensaios a caudal constante; 2) Avaliação da eficiência da captação, com recurso a ensaios escalonados; 3) Determinação da concentração dos sólidos suspensos por secagem e pesagem; 4) Caracterização mineralógica dos materiais retidos nos filtros.

As duas primeiras acções são, essencialmente, de trabalho de campo, enquanto que as restantes são de trabalho laboratorial, nomeadamente, de tratamento das amostras recolhidas em campo.

As metodologias mais usuais de caracterização dos aquíferos e de avaliação da eficiência das captações consistem na realização de ensaios de caudal.

A metodologia dos ensaios de caudal é relativamente simples, consistindo no bombeamento de água dos poços, quer a caudal constante, quer a caudal variável, acompanhando e registando-se, sempre, a evolução dos níveis de água no poço e nos piezómetros (quando existentes), devido ao bombeamento (Figura 13). O estudo das variações dos níveis de água vai permitir o conhecimento do poço em si e das características hidráulicas do aquífero, podendo obter-se informação sobre a qualidade da construção do poço, perdas de carga existentes e, até mesmo, o caudal de extracção mais aconselhado e o lugar onde se deve instalar a bomba de extracção (Martinez e Lopez, 1984).

As características hidráulicas que se podem obter através dos ensaios de caudal são, essencialmente, a permeabilidade (K), a transmissividade (T) e o coeficiente de armazenamento (S). Pode-se, ainda, obter informação sobre a existência de barreiras ou bordos impermeáveis e zonas de recarga do aquífero (Martinez e Lopez, 1984).

Existem diversos tipos de ensaios de caudal que diferem entre si pelo modo de execução e métodos de tratamento de dados envolvidos. Assim sendo, segundo Martinez e Lopez (1984), podemos ter dois grupos principais de ensaios de caudal: ensaios a caudal constante e ensaios a caudal variável. Dentro do primeiro grupo, temos

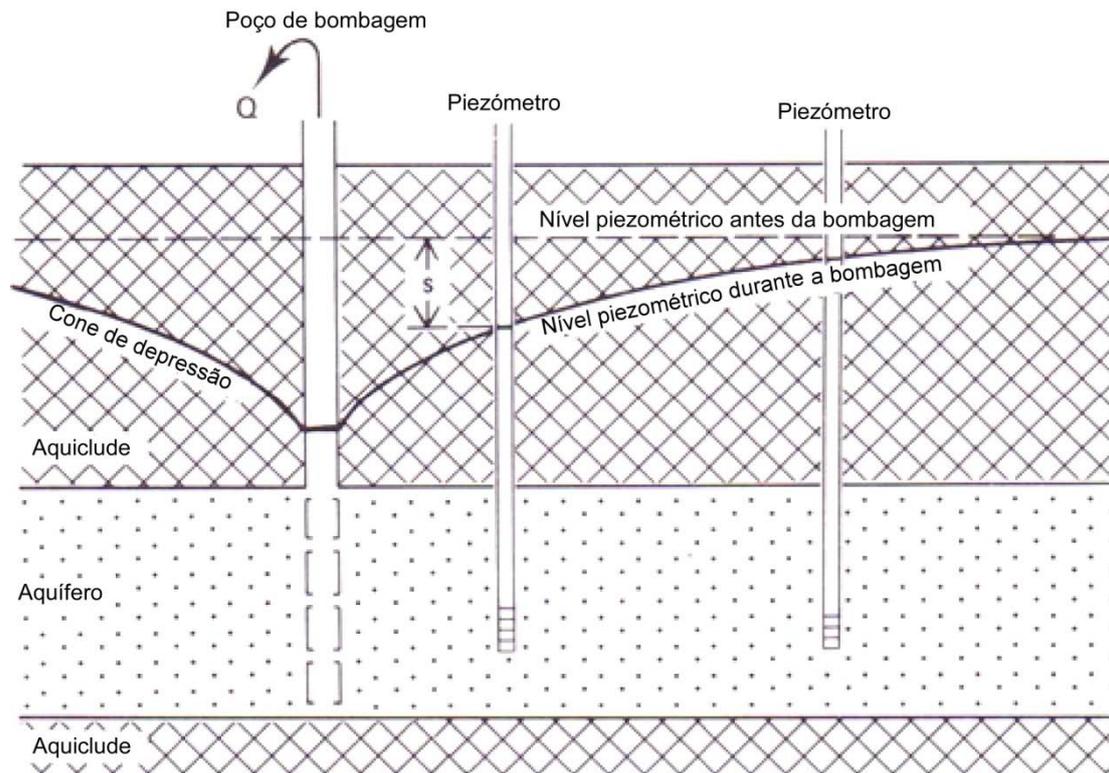


Figura 13 – Representação esquemática do rebaixamento da água no poço devido ao bombeamento de água. (Imagem adaptada de Kruseman e Ridder, 1994).

ensaios a caudal constante em regime permanente, cujos níveis de água não variam ao longo do ensaio, e ensaios de caudal em regime variável, em que no decorrer do ensaio, como consequência do bombeamento de água do poço, os níveis descem progressivamente ao longo do tempo, sendo esta variação dos níveis em função do tempo, que é estudada. No grupo dos ensaios a caudal variável destacam-se os ensaios escalonados, em que se estabelecem diversos patamares (pelo menos 3) cujos caudais de extracção variam e provocam, consequentemente, rebaixamentos distintos.

Independentemente do tipo de ensaio de caudal a utilizar, deve-se, antes de iniciar a extracção de água, medir o nível da água no poço e nos piezómetros (caso existam) de forma a saber-se qual o nível hidrostático do aquífero. Iniciado o bombeamento de água, a mediação dos níveis deverá ser a mais rigorosa possível e, inicialmente, com intervalos de medição muito pequenos, uma vez que na primeira ou nas duas primeiras horas do ensaio, os níveis de água descem rapidamente. Posteriormente, como o ensaio é contínuo, os intervalos de mediação podem ser gradualmente alargados (Kruseman e Ridder, 1994).

Kruseman e Ridder (1994) propõem que os intervalos de medição durante o ensaio de caudal sejam de: 0,5 min 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 finalizar-se o ensaio. Já Martinez e Lopez (1984) propõem, essencialmente, que os intervalos de mediação sejam repartidos regularmente numa escala logarítmica, do seguinte modo: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 80, 100, 120, 150, 180 (t em min), para as primeiras três horas e, depois, deverá continuar as mediações em intervalos de 40 min, 50 min, 1 h, 1,5 h, 2 h, 3 h, etc.

Estas sugestões de intervalos de mediação encontradas na bibliografia citada não necessitam de ser cumpridas rigidamente (como os próprios autores o referem), uma vez que podem ser adaptadas às condições do local, às pessoas disponíveis para a execução do ensaio, entre outros factores. Contudo, em todos os casos, as medições devem ser frequentes na primeira hora do ensaio não só porque, inicialmente, os níveis variam rapidamente mas, também, porque na análise dos dados, o tempo aparece, geralmente, em escala logarítmica (Kruseman e Ridder, 1994; Martinez e Lopez, 1984).

A duração de um ensaio de caudal é difícil de estabelecer previamente, uma vez que depende do tipo de aquífero e do grau de exactidão com que se pretendem obter as suas características hidráulicas (Kruseman e Ridder, 1994). É recomendado que não se economize no período de bombeamento, dado que os custos associados a uma repetição de um ensaio de caudal são muito superiores aos custos associados a algumas horas extras de ensaio (além das previstas). Além da minimização dos custos, o prolongamento do ensaio, até se atingir a estabilização ou pseudo-estabilização dos níveis piezométricos, permite a obtenção de dados mais fidedignos quanto às características hidráulicas do aquífero (Kruseman e Ridder, 1994). Esta estabilização dos níveis ocorre, em alguns casos, a poucas horas após o início do ensaio de caudal, enquanto que noutros casos pode levar dias e até mesmo semanas. Segundo Kruseman e Ridder (1994), para aquíferos confinados atinge-se a estabilização dos níveis após 24 h de bombeamento. Também Martinez e Lopez (1984) sugerem uma duração de 24 h para um ensaio de caudal que pretenda unicamente o cálculo das características hidráulicas do aquífero. Caso se pretenda analisar efeitos de barreiras ou se se trata de aquíferos semiconfinados, estes autores já propõem uma duração entre dois a seis dias de ensaio de caudal.

4.1. Determinação das características hidráulicas do aquífero

Com o intuito de se determinarem as características hidráulicas do aquífero onde está instalada a captação PS1, realizou-se um ensaio a caudal constante. A metodologia deste tipo de ensaio (em regime variável) é muito simples, requerendo, contudo, um trabalho de campo mais intenso e, em geral, um trabalho mais preciso de gabinete comparativamente com os ensaios em regime permanente. Estes ensaios são indispensáveis quando se pretende conhecer os parâmetros hidráulicos dos aquíferos ou saber qual o caudal de exploração mais aconselhado para um poço em função das horas de extracção diárias (Martinez e Lopez, 1984).

O ensaio de caudal realizado, a 22 de Março de 2010, teve a duração de 6h30 sendo que a captação se encontrou em repouso, isto é, sem extracção de água, durante aproximadamente 2 dias e meio.

De acordo com o que foi referido anteriormente, antes de se iniciar o ensaio de caudal foi medido o nível piezométrico do furo, de forma a saber-se qual o valor do nível hidrostático do aquífero, após aproximadamente 2 dias e meio de repouso (sem extracção de água). Posteriormente, foi ligada a bomba de extracção (à frequência de 35 Hz) e foram medidos os níveis de água em intervalos de tempo de: 1 min dos 0 aos 10 min; 2 min dos 10 aos 20 min; 5 min dos 20 aos 60 min; 10 min dos 60 aos 120 min; 20 min dos 120 min até final do ensaio de caudal. A medição dos níveis foi efectuada com uma sonda de nível portátil, marca SEBA, modelo KLL.

A água extraída saía na fábrica, numa saída da tubagem antes da coluna de filtros. Só após 3h30 de bombagem é que a água extraída passou a ser encaminhada para enchimento dos depósitos da unidade de engarrafamento de água. Deste modo, os intervalos de medição dos níveis de água foram ajustados a este fenómeno, tendo-se recommçado as medições de minuto a minuto e assim sucessivamente, de forma a verificar se tal facto provocava alteração nos níveis de água do furo. Por volta das 4h40 de ensaio, alterou-se o depósito de enchimento, mas agora não foram reiniciados os intervalos de medição dos níveis, uma vez que não se tratava de uma alteração tão significativa como a anterior (passar de água extraída sem aproveitamento para água de enchimento de depósitos).

Durante o ensaio de caudal foram recolhidas amostras de água junto da saída de água à entrada da unidade de engarrafamento de água. Estas amostras foram sendo

recolhidas para garrações de plástico de 5 L, aproximadamente, de 2 em 2 min, na primeira hora de ensaio e de 5 em 5 min, no restante tempo do ensaio de caudal.

Foram, ainda, controlados os caudais de extracção, através da sua medição junto da saída de água na unidade de engarrafamento de água de 5 em 5 min, sensivelmente, com auxílio de um bidão de 130 L.

A interpretação dos resultados obtidos neste ensaio de caudal foi efectuada de acordo com o método de Theis (1935). Para a aplicação deste método, assumiram-se os seguintes pressupostos:

- O aquífero é homogéneo, isotrópico e aparentemente infinito;
- O poço é de diâmetro nulo e atravessa completamente a formação permeável;
- O caudal é constante;
- Não existem recargas exteriores;
- A água bombeada produz, de imediato, o rebaixamento do nível no poço e não volta a entrar para o aquífero;
- O fluxo de água é radial e não tem componente vertical.

Segundo Theis, o rebaixamento é dado pela fórmula:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \int_u^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du \quad [1]$$

de onde:

s – rebaixamento (m)

Q – caudal (m^3 /dia)

T – transmissividade (m^2 /dia)

u – função auxiliar cujo valor é: $u = \frac{r^2 S}{4 T t}$ [2]

r – distância do poço ao piezómetro de observação (m)

sendo:

S – coeficiente de armazenamento

t – tempo (dias)

O integral da fórmula denomina-se por função de poço $W(u)$ e não tem uma solução analítica. Os seus valores encontram-se tabelados e dependem de u . Com os valores de $1/u$ e $W(u)$, Theis construiu a chamada curva de Theis, representada na Figura 14 (Martinez e Lopez, 1984).

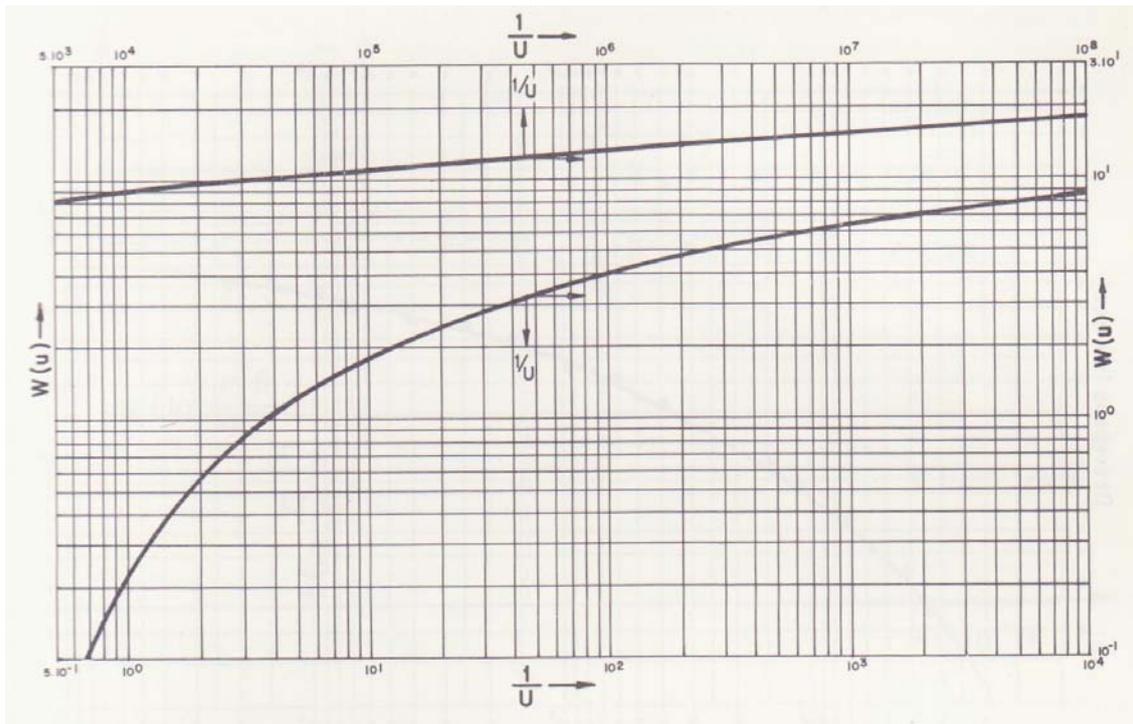


Figura 14 – Curva de Theis. (Imagem retirada de Martinez e Lopez, 1984).

Os dados de campo, rebaixamentos e tempos em que se produziram, devem representar-se em gráficos do tipo:

$$s - t$$

$$s - r^2/t \quad [3]$$

$$s - r^2$$

sendo que o mais usual é representá-los num gráfico logarítmico para os pares de $s - t$ de toda a série de dados do ensaio, obtendo-se, assim, a curva de campo. Esta curva será depois sobreposta à curva de Theis, tomando-se um ponto de coincidência entre as duas

curvas. Assim sendo, descobertos os valores dos pares $1/u$ e $W(u)$ e de s e t , é possível obterem-se os valores de T e S , pelas fórmulas seguintes:

$$T = \frac{Q W(u)}{4\pi s} \quad [4]$$

$$S = \frac{4T t}{r^2 1/u} \quad [5]$$

Existindo a hipótese de que o aquífero onde está implantada a captação PS1 é um aquífero semi-confinado, os dados obtidos em campo também serão interpretados pelo método de Hantush (1956). Este método admite que o efeito do bombeamento de água de um aquífero semi-confinado tem uma tendência rápida do perfil de rebaixamento para a estabilização, uma vez que haverá recarga do aquífero, por drenância vertical através de uma formação semi-permeável (Figura 15).

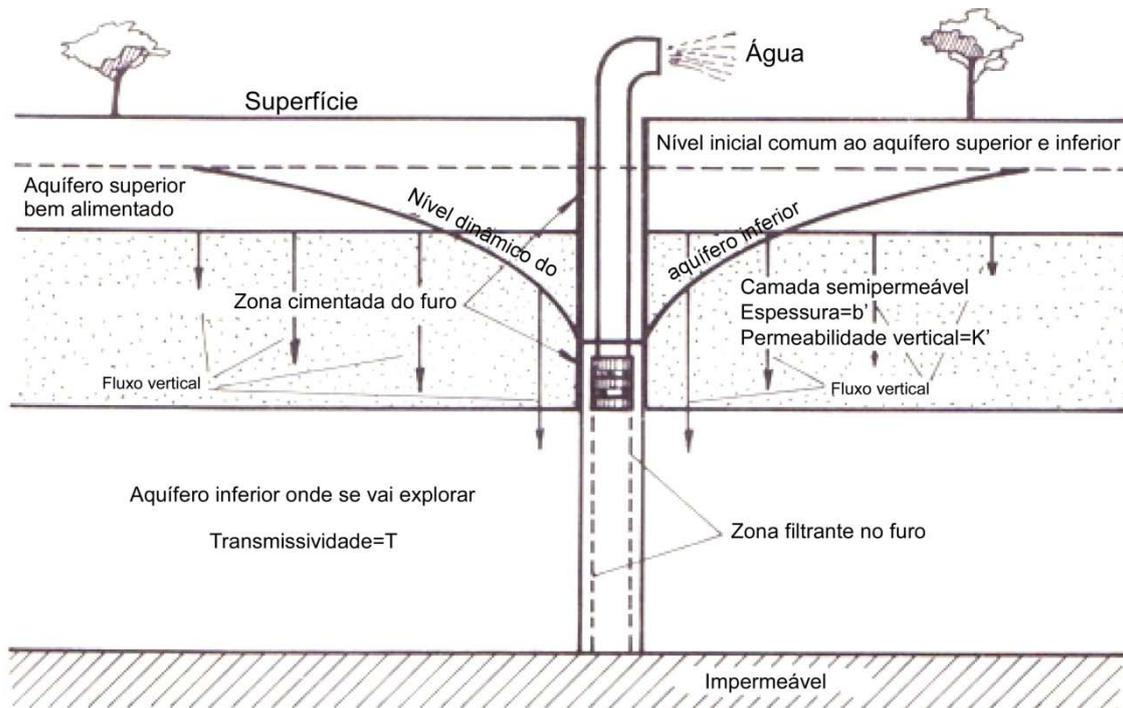


Figura 15 – Representação esquemática da drenância vertical no aquífero semi-confinado. (Imagem adaptada de Martinez e Lopez, 1984).

Pressupõe, assim, que existe um aquífero superior bem alimentado, separado do aquífero inferior semi-confinado por uma formação semi-permeável. Este aquífero superior terá de cumprir determinados requisitos, tais como:

- Ter capacidade de armazenamento suficiente para manter a recarga vertical constante;
- Não ceder água através do poço, uma vez que o poço se encontra cimentado desde a superfície até ao tecto do aquífero inferior;
- Ter o mesmo potencial hidráulico que o aquífero inferior. Assim, ao bombear-se água do aquífero inferior, cria-se um gradiente hidráulico entre ambos os aquíferos de tal forma que se estabelece um fluxo (drenância) através da formação semi-permeável (Martinez e Lopez, 1984; Rubio e Magán, 1998).

Com todas estas limitações e considerando o regime variável, Hantush define este fenómeno de drenância pela seguinte fórmula:

$$s = \frac{Q}{4 \pi T} W(u, r/B) \quad [6]$$

onde:

s – rebaixamento de um ponto situado à distância *r* do poço de bombagem

Q – caudal de bombagem constante

T – transmissividade

W(u, r/B) – função de poço para um aquífero semi-confinado

B – factor de drenância = $\sqrt{\frac{T b}{K'}}$ [7]

sendo que:

b'/K' – resistividade hidráulica, cuja dimensão é de tempo (em dias)

K'/b' – coeficiente de drenância, cuja dimensão é a inversa do tempo (1/dia)

b' – espessura da formação semi-permeável

K' – permeabilidade vertical da formação semi-permeável

A função de poço para um aquífero semi-confinado $W(u, r/B)$ é também um integral sem solução analítica como no caso de Theis e os seus valores em função de $1/u$ e r/B encontram-se representados no gráfico da Figura 16.

A curva representada é a de Theis, com a variação de ter uma série de derivações para cada valor de r/B . Estas derivações de r/B separam-se da curva de Theis para baixo, mostrando para cada derivação um estado de estabilização. Esta tendência de estabilização é devida à recarga por drenância vertical que chega ao aquífero inferior em bombagem. Quanto maior for o valor de drenância, maior é o valor de r/B e mais se separa a derivação da curva teórica de Theis.

O modo operativo é similar ao de Theis: constrói-se a curva de campo $s - \lg t$ ou $lg s - \lg t$ e sobrepõe-se à curva padrão de Hantush que melhor se ajuste. Toma-se um ponto da curva padrão e o seu coincidente na curva de campo obtendo-se, assim, cinco valores: $W(u, r/B)$, $1/u$, s , t , r/B (Martinez e Lopez, 1984; Rubio e Magán, 1998).

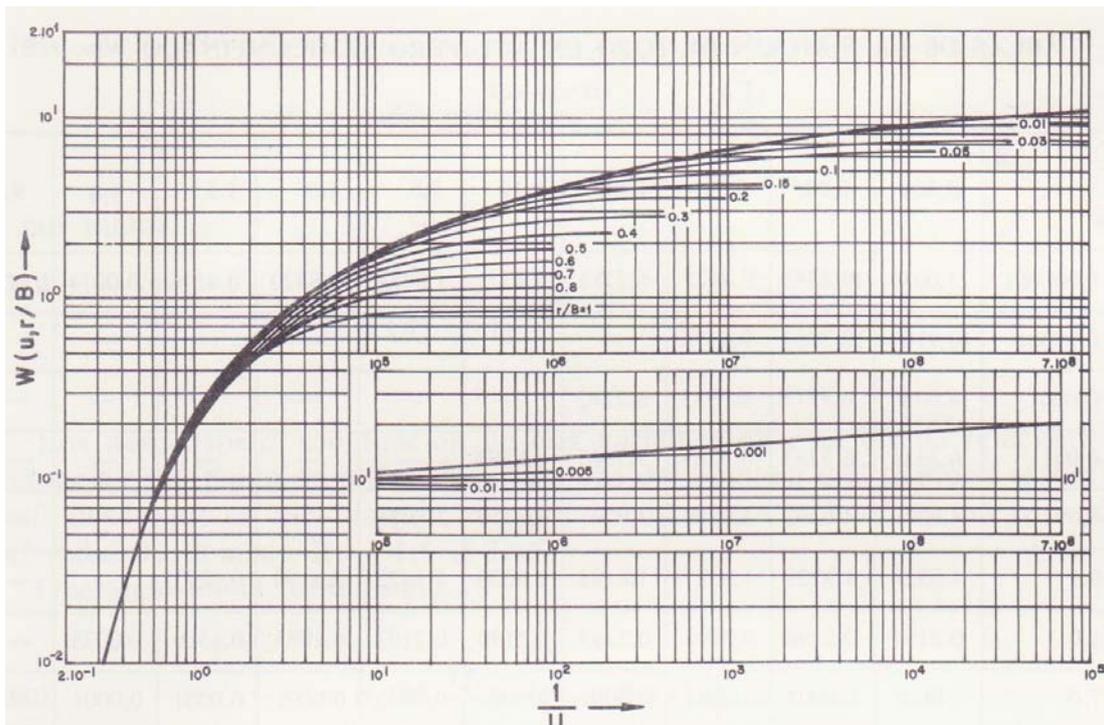


Figura 16 – Função de poço $W(u, r/B)$ num aquífero semi-confinado – Hantush (1956). (Imagem retirada de Martinez e Lopez, 1984).

Uma vez encontrados estes valores, recorrendo às fórmulas [6] e [2] é possível obter-se os valores de T e S , do seguinte modo:

$$T = \frac{Q \cdot W(u, r/B)}{4\pi s} \quad [8]$$

$$S = \frac{4T t}{r^2 \cdot 1/u} \quad [9]$$

Como r e r/B é conhecido, é possível determinar-se o valor de B (Equação 7) (Martinez e Lopez, 1984).

4.2. Avaliação da eficiência da captação

De forma a poder-se avaliar a eficiência da captação PS1, realizou-se um ensaio escalonado. A metodologia deste tipo de ensaios é usual para o cálculo dos coeficientes da fórmula geral dos rebaixamentos:

$$s = AQ + BQ^n \quad [10]$$

sendo que a sua aplicação não necessita de piezómetros de observação (Martinez e Lopez, 1984). Uma vez introduzidos os valores obtidos no ensaio de caudal (Q e s), esta fórmula passa a ter somente três incógnitas: A , B e n , sendo necessário, pelo menos, a realização de três escalões, a diferentes caudais e, se possível, com a mesma duração, para resolver o sistema:

$$\begin{aligned} s_1 &= AQ_1 + BQ_1^n \\ s_2 &= AQ_2 + BQ_2^n \\ s_3 &= AQ_3 + BQ_3^n \end{aligned} \quad [11]$$

sendo que AQ representa o rebaixamento teórico e BQ^n representa as perdas de carga. O coeficiente A obtém-se da fórmula de Jacob:

$$A = 0,183 \frac{1}{T} \log \frac{2,25 T t}{r^2 s} \quad [12].$$

Para maior segurança, convém realizar quatro escalões, para o caso de algum deles produzir anomalias e ter de ser rejeitado (Martinez e Lopez, 1984).

Os caudais a usar deverão ser crescentes, havendo uma certa relação entre eles e não sendo muito díspares uns dos outros, de forma a evitar-se a passagem de regime laminar a turbulento, na mudança de caudal. Quanto à duração de cada escalão, geralmente, oscila entre 0,5 h e 3 h.

Conhecidos os caudais e os respectivos rebaixamentos produzidos, é possível a resolução do sistema de equações [11] por vários procedimentos, sendo que o adoptado neste trabalho será o método de tentativa de valores de n . Aqui, divide-se todo o sistema de equações [11] por Q :

$$\begin{aligned} s_1/Q_1 &= A Q_1 + B Q_1^{n-1} \\ s_2/Q_2 &= A Q_2 + B Q_2^{n-1} \\ s_3/Q_3 &= A Q_3 + B Q_3^{n-1} \end{aligned} \quad [13]$$

Dando a n o valor de 2 e representando s/Q em ordenadas e Q^{n-1} em abcissas, num sistema de eixos métricos, podem obter-se duas situações:

- 1) Uma linha recta com os pares de valores $(s/Q, Q^{n-1})$, o que significa que n é realmente 2. Pode, então, medir-se sobre o gráfico o valor de A (ordenada na origem) e o de B (declive da recta).
- 2) Não se obtém uma linha recta (logo $n \neq 2$) e terá de se proceder à tentativa de um novo valor de n (que oscila entre 1 e 3,5).

O ensaio escalonado realizado na captação PS1, a 26/4/2010, teve a duração de aproximadamente 2 h, em cada escalão, à excepção do último patamar, que somente se realizou por um período de tempo de 1h30. No total foram executados três escalões, em que os diferentes caudais resultaram do aumento da frequência da bomba de extracção: 35, 40 e 45 Hz. Convém salientar que os ensaios se realizaram com recuperação parcial dos níveis (uma vez que houve a necessidade de reiniciar a bomba de extracção, na mudança de escalão) e que a água extraída esteve sempre a ser utilizada para enchimento dos depósitos na unidade de engarrafamento de água.

Quanto aos intervalos de medição dos níveis de água, foram iguais aos adoptados para o ensaio a caudal constante. Já na colheita de amostras de água, diferiu-se um pouco, tendo sido sempre em intervalos de 10 min.

4.3. Determinação da concentração dos sólidos suspensos

A determinação da concentração dos sólidos suspensos, nas amostras de água recolhidas nos ensaios realizados, teve como principal objectivo a avaliação da evolução dos sólidos suspensos nas respectivas amostras e a sua relação com a piezometria e com o caudal de extracção.

Para tal, foram recolhidas amostras de água (para garrações de 5 L) em todos os ensaios de caudal realizados. Posteriormente, procedeu-se à filtração destas amostras usando-se membranas filtrantes de 0,1 μm , 0,22 μm e 0,45 μm , previamente pesadas, numa balança de precisão (sensibilidade – 0,0001 g) e colocadas em caixas de Petri.

As filtrações não se procederam de igual modo para todas as amostras, devido a diversos factores, entre eles, as condições laboratoriais distintas (as amostras referentes ao ensaio a caudal constante foram filtradas no laboratório da unidade de engarrafamento de água, enquanto que as amostras do ensaio escalonado foram realizadas no Laboratório de Águas do Departamento de Ciências da Terra, da Universidade do Minho).

As amostras de água referentes ao ensaio a caudal constante, como referido anteriormente, foram filtradas no laboratório da unidade industrial. Este possuía uma rampa de filtração com capacidade para três filtrações em simultâneo, mas sem possibilidade de recuperação da amostra filtrada para posterior filtração em membranas filtrantes de menor diâmetro (Figura 17).

Assim sendo, optou-se por dividir a amostra de água (5 L) em partes iguais de modo a que uma das partes passasse nos filtros de 0,22 μm e a outra nos de 0,45 μm . Para as amostras 1, 2 e 3 foi usada, excepcionalmente, uma membrana filtrante de 0,1 μm onde se filtraram 300 mL de água, sendo o restante volume dividido pelas membranas filtrantes de 0,22 μm e de 0,45 μm .



Figura 17 – Sistema de filtração usado no laboratório da empresa de engarrafamento de água.

Uma vez filtradas todas as amostras, as membranas filtrantes foram colocadas numa estufa à temperatura de 25°C durante, aproximadamente, dois dias. Posteriormente, pesaram-se as membranas filtrantes, de forma a determinar-se a quantidade de sólidos suspensos. Estas membranas foram, ainda, colocadas num exsiccador durante uma semana e voltadas a pesar.

Como referido, as amostras de água recolhidas durante o ensaio escalonado foram filtradas no Laboratório de Águas do Departamento de Ciências da Terra, da Universidade do Minho (Figura 18). Aqui, o sistema de filtração permitia a recuperação da água filtrada. Deste modo, optou-se por filtrar, primeiramente, a amostra numa membrana filtrante de 0,45 μm e depois numa de 0,22 μm . Devido à elevada quantidade de sólidos suspensos em algumas amostras de água, houve a necessidade de se usarem várias membranas filtrantes de 0,45 μm e, por vezes, de 0,22 μm para a mesma amostra (até seis membranas filtrantes de 0,45 μm /amostra).

A secagem destas membranas filtrantes foi mais morosa que as do ensaio anterior, uma vez que, na ausência de estufas a 25°C, a sua secagem foi efectuada no exsiccador por um período de 3 semanas.



Figura 18 – Sistema de filtração usado no Laboratório de Águas do Departamento de Ciências da Terra da Universidade do Minho.

4.4. Caracterização mineralógica dos materiais retidos nos filtros

A caracterização mineralógica dos materiais retidos nos filtros consistiu em análises por difracção de raios X dos sólidos suspensos das amostras de água recolhidas no decurso dos ensaios de caudal realizados. A porção analisada foi obtida por filtração em membranas de 0,45 μm e 0,22 μm .

A difracção de raios X (DRX) é uma técnica que por si só fornece informações amplas, precisas e detalhadas sobre a qualificação, caracterização e quantificação dos minerais presentes numa amostra (essencialmente, em amostras de argilas ou que contenham elevadas quantidades destas). Além disso, trata-se de uma técnica analítica não destrutiva, rápida e muito versátil, tendo apenas o impedimento de não poder ser aplicada a minerais não cristalinos ou com cristalinidade incipiente.

Como cada mineral tem a sua estrutura própria e o difractograma (diagrama obtido na análise por difracção de raios X) respectivo mostra o modelo de difracção da radiação X nos planos estruturais, cada espécie mineral cristalina tem um modelo de difracção específico, a partir do qual pode ser identificada, mesmo quando faz parte de misturas mais ou menos complexas com outras espécies minerais (Brindley e Brown, 1980; Gomes, 1988; Moore e Reynolds, 1997).

Dado a elevada quantidade de membranas filtrantes usadas nos ensaios de caudal realizados, foram seleccionadas apenas algumas, consideradas representativas das diversas fases do ensaio: inicial, anterior à estabilização do nível piezométrico, durante o patamar de estabilização e no final do ensaio. Assim sendo, para cada ensaio ou escalão foram escolhidas entre 3 a 5 membranas filtrantes de 0,22 μm (excepto num escalão, em que se usou a membrana filtrante de 0,45 μm (E3-43)), num total de 23 (do ensaio a caudal constante e do ensaio escalonado). As referências de cada amostra indicam o ensaio de caudal respectivo, do seguinte modo: referência A, corresponde ao ensaio a caudal constante; referências E1, E2 e E3, compreendem as amostras seleccionadas representativas do escalão E₁, E₂ e E₃ do ensaio escalonado, respectivamente.

As análises por DRX realizaram-se directamente sobre o papel das membranas filtrantes, usando-se um equipamento Philips X'PERT PRO-MPD, com gerador PW3040 de radiação K α -Cu a 50 kV e a 40 mA. O passo foi de 0,02 °2 θ e o tempo de contagem foi de 1,25 s. Foi utilizado o software analítico *X'Pert Graphics and Identify*, desenvolvido pela Philips.

A estimativa da composição mineralógica por DRX dos sólidos suspensos retidos nas membranas filtrantes foi efectuada a partir de picos diagnósticos para as diferentes fases mineralógicas identificadas (Brindley e Brown, 1980; Gomes, 1988; Moore e Reynolds, 1997; Velho *et al.*, 1998).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Caracterização hidráulica da captação e do aquífero

5.1.1. Determinação de parâmetros hidráulicos

No sentido de se determinarem os parâmetros hidráulicos da captação PS1 foi realizado um ensaio de caudal, a 22 de Março de 2010, com a duração de 6h30 (390 min), sendo que a captação esteve em repouso, isto é, sem extracção de água, num período de aproximadamente 2 dias e meio. Após este período de repouso, o nível hidrostático do aquífero era de 6,25 m. Não se dispoñdo de piezómetros, o único parâmetro hidráulico que se poderá determinar é a transmissividade (e a condutividade hidráulica), não sendo possível a determinação do coeficiente de armazenamento, como seria desejado.

No decorrer deste ensaio de caudal foram medidos os rebaixamentos provocados pela bombagem de água, recorrendo a uma sonda de nível portátil, e foram controlados os caudais de extracção, com auxílio de um bidão de 130 L. Os dados obtidos encontram-se representados no gráfico da Figura 19.

Como se pode observar neste gráfico, a evolução dos rebaixamentos registados no decurso do ensaio de caudal pode ser dividida em 2 etapas:

- A) Uma primeira etapa correspondente ao período do ensaio de caudal desde o tempo t_0 até ao momento em que a água extraída passou para enchimento dos depósitos da unidade de engarrafamento de água (aos 211 min) alterando-se, assim, as condições de extracção. Como se pode verificar pelo gráfico da Figura 19, nos primeiros 20 min de ensaio ocorreu uma rápida e acentuada descida do nível piezométrico, atingindo-se um rebaixamento de 17,25 m. Posteriormente, o nível continuou a descer, mas de modo mais lento, atingindo o valor máximo de rebaixamento de 18,22 m aos 210 min, revelando-se uma tendência de pseudo-estabilização. Contudo, dada a curta duração do ensaio de caudal, não foi possível atingir a verdadeira estabilização do nível;
- B) Na segunda etapa, a água bombeada passou a ser encaminhada para o enchimento dos depósitos, devido às necessidades da unidade de engarrafamento de água (uma vez que se trata de uma captação em exploração). Esta alteração

nas condições de extracção originou uma ligeira diminuição do rebaixamento, de 18,22 m para 17,57 m, em apenas 3 min. Após esta pequena quebra inicial no rebaixamento constata-se uma estabilização do nível piezométrico, desde os 213 min até ao final do ensaio de caudal, fixando-se o rebaixamento à volta dos 17,43 m.

Observando-se a evolução do caudal no decorrer do ensaio é possível evidenciarem-se 3 fases distintas:

- 1) Na fase inicial é evidente o arranque progressivo da bomba de extracção, representado pelos valores crescentes de caudal de extracção (19,24 m³/h e 32,41 m³/h), sendo que este último valor, aos 10 min de ensaio de caudal, representa o momento em que a bomba está a funcionar à frequência definida (35 Hz). Seguidamente, observa-se uma ligeira descida dos caudais, rapidamente acompanhada pela sua pseudo-estabilização até aos 195 min. Nesta fase, o caudal médio de extracção é de 30,08 m³/h (8,36 L/s).
- 2) Na segunda fase observa-se uma ligeira diminuição do caudal de extracção para o valor de 29,16 m³/h, num intervalo de tempo de poucos minutos, devido ao facto da água bombeada passar para enchimento do depósito T78, aos 211 min, sendo assim alteradas as condições de extracção. O controlo da caudal passou a ser feito através da variação do volume de água dentro do depósito em enchimento.
- 3) A terceira fase corresponde apenas à alteração do depósito de enchimento (do T78 para o T77, aos 278 min) que, apesar de não ser tão significativa como a alteração anterior, provocou uma ligeira diminuição do caudal.

Não obstante a divisão previamente referida, consideramos que as fases 2 e 3 podem ser agrupadas, dado compreenderem condições de extracção muito semelhantes (extracção de água com aproveitamento para enchimento de depósitos). O caudal de extracção médio para estas fases/condições de extracção é de 25 m³/h (6,95 L/s), valor bastante inferior ao obtido na fase 1 (Q=30,08 m³/h), em que a água extraída não era aproveitada. Convém salientar que o controlo dos caudais de extracção nestas fases foi feito através da variação de volume de água dentro do depósito de enchimento, um método pouco fiável, produzindo dados pouco fidedignos. Tal facto pode verificar-se

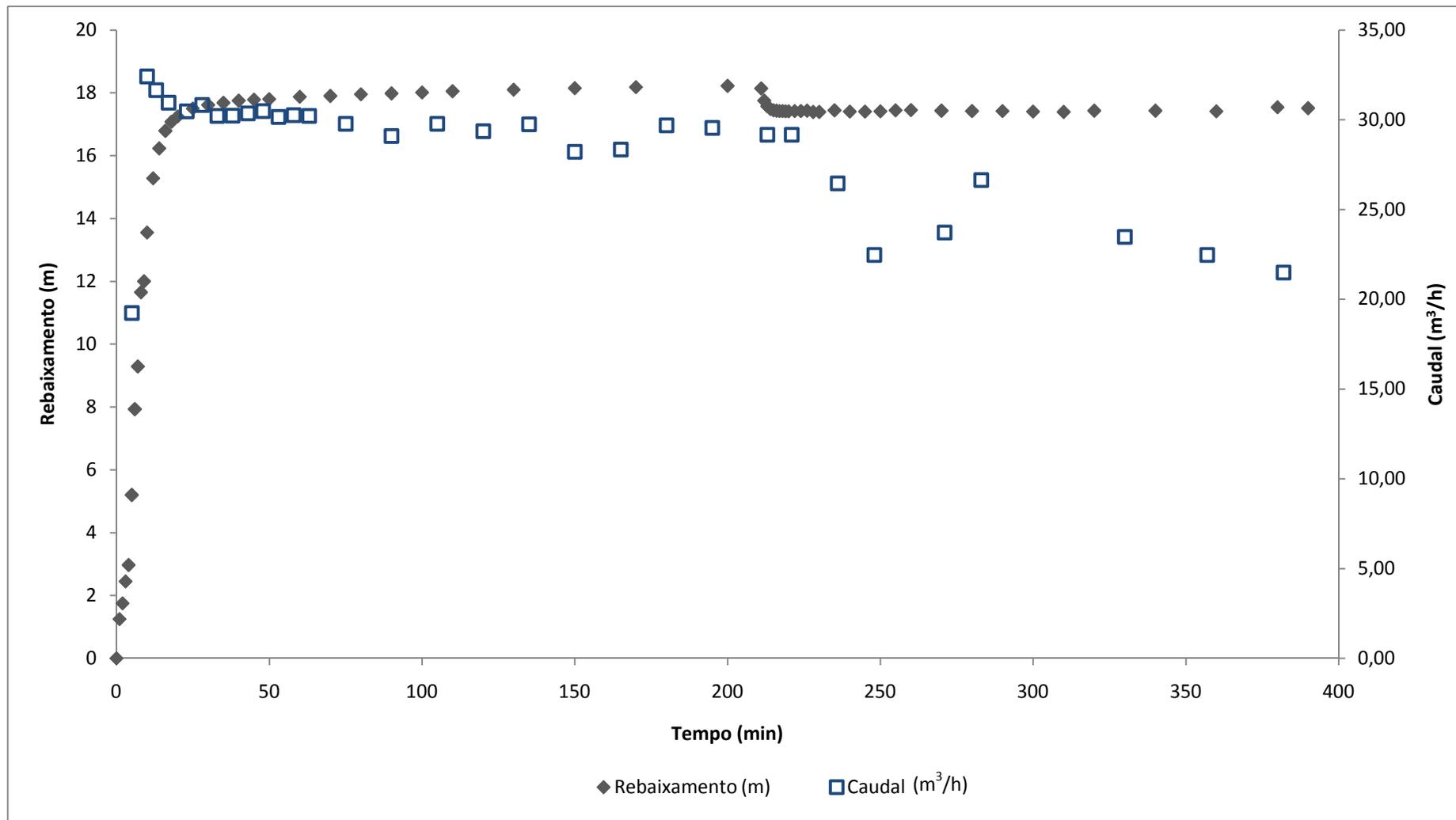


Figura 19 – Evolução do rebaixamento e do caudal de extração no decurso do ensaio de caudal realizado a 22 de Março de 2010.

pela evolução dos caudais que, nestas duas fases, não apresentam qualquer tendência para a estabilização, como ocorreu na fase 1.

Assim sendo, será o valor de $Q=30,08 \text{ m}^3/\text{h}$ ($\cong 721,92 \text{ m}^3/\text{dia}$), correspondente ao caudal de extracção da fase 1, o usado na interpretação matemática dos dados, uma vez que nos permite a determinação dos parâmetros hidráulicos mais correctos e fidedignos.

Comparando, agora, as etapas e as fases em que dividimos a evolução dos rebaixamentos e dos caudais de extracção, podemos agrupar a etapa A (dos rebaixamentos) com a fase 2 (dos caudais), que correspondem ao período do ensaio de caudal em que a água extraída não era aproveitada para enchimento de depósitos, e a etapa B com as fases 3 e 4, correspondendo à segunda e à última parte do ensaio de caudal em que, devido às necessidades da unidade de engarrafamento de água, teve de se encaminhar a água extraída para o enchimento dos depósitos.

No período do ensaio de caudal em que a água não era aproveitada para enchimento dos depósitos verifica-se que, quer nos valores de rebaixamento, quer nos valores dos caudais de extracção, há uma tendência para a pseudo-estabilização após poucos minutos do início do ensaio de caudal. Deste modo, os dados obtidos vão de encontro ao modelo de Hantush, já que o efeito do bombeamento de água de um aquífero semi-confinado tem uma tendência rápida do perfil de rebaixamento para a estabilização, uma vez que haverá recarga do aquífero, por drenância vertical através de uma formação semi-permeável. Esta drenância vertical é feita através de um aquífero superior bem alimentado, que não cede água ao furo e que tem o mesmo potencial hidráulico que o aquífero inferior. Assim, ao bombear-se água do aquífero inferior, cria-se um gradiente hidráulico entre ambos os aquíferos, de tal forma que se estabelece um fluxo vertical através da formação semi-permeável. Daí que, passados poucos minutos após o início do ensaio de caudal, o nível atinja uma pseudo-estabilização. Para a interpretação matemática dos dados de campo será, então, utilizado o método de Hantush, que mais não é que uma derivação do método de Theis (Martinez e Lopez, 1984; Rubio e Magán, 1998).

Da aplicação do método de Hantush aos dados de campo, no programa AquiferTest para Windows, versão 2.55, obtém-se o gráfico da Figura 20. O melhor ajuste da curva de campo ao modelo de Hantush produz um valor de transmissividade igual a $4,12 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{min}$, ou seja, $5,9 \text{ m}^2/\text{dia}$. Este valor é muito inferior aos encontrados noutros locais

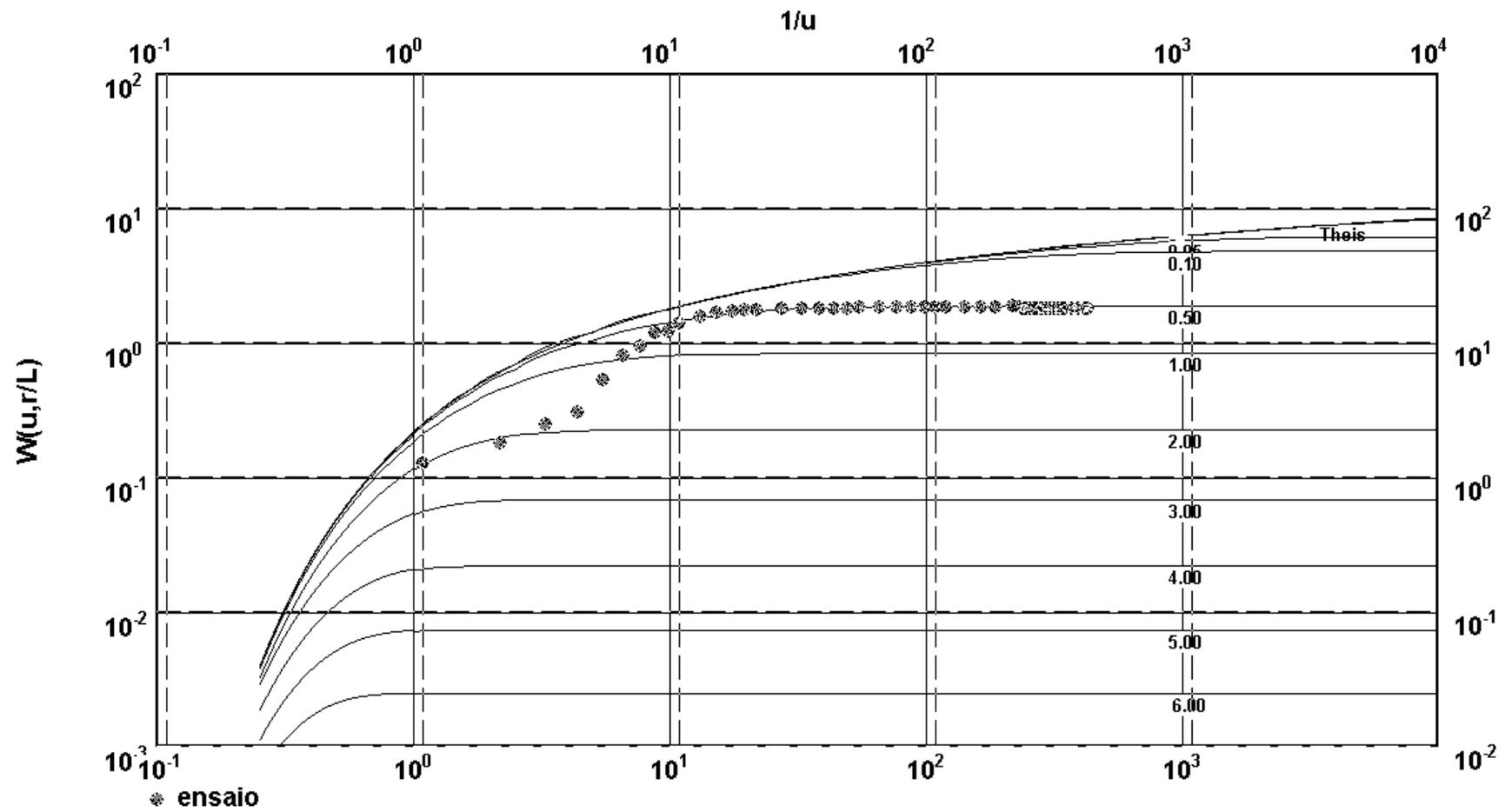


Figura 20 – Sobreposição da curva de campo (do ensaio a caudal constante) à curva padrão de Hantush, uma derivação da curva de Theis (gráfico obtido no AquiferTest).

das mesmas formações geológicas (Almeida *et al.* (2000b)).

Considerando que este ensaio foi realizado a um caudal constante de, aproximadamente, 722 m³/dia, ou seja, 8,36 L/s (considerando, apenas, a etapa do ensaio em que não houve aproveitamento da água bombeada) e que se obteve um rebaixamento total de 18,22 m, o valor de caudal específico obtido é de 36,63 m³/dia/m, isto é, 0,46 L/s/m.

5.1.2. Caracterização hidráulica da captação

Como se referiu no capítulo da metodologia, os ensaios escalonados visam a avaliação da eficiência das captações e, como tal, a sua aplicação não necessita de piezómetros de observação (Martinez e Lopez, 1984).

Os patamares do ensaio escalonado realizado na captação PS1, a 26 de Abril de 2010, tiveram a duração de aproximadamente 2 h cada, à excepção do último escalão, que somente se realizou por um período de tempo de 1h30. No total, foram executados três escalões, em que os diferentes caudais resultaram do aumento da frequência da bomba de extracção: 35, 40 e 45 Hz. A profundidade do nível hidrostático no momento anterior ao início deste ensaio de caudal era de 6,05 m. Convém salientar que os ensaios se realizaram com recuperação parcial dos níveis (uma vez que houve a necessidade de reiniciar a bomba de extracção, na mudança de escalão) e que a água extraída esteve sempre a ser utilizada para enchimento dos depósitos na unidade de engarrafamento de água. Os dados referentes a estes ensaios estão representados no gráfico da Figura 21.

Para simplificar a designação de cada escalão do ensaio de caudal realizado, utilizei como critério as diferentes frequências (F) da bomba de extracção, atribuindo as seguintes nomenclaturas: E₁, para o primeiro patamar, em que, F=35 Hz; E₂, para o segundo escalão, onde F=40 Hz; e E₃, para o terceiro escalão, com F=45 Hz.

Pela observação do gráfico da Figura 21 pode constatar-se que os perfis de rebaixamento dos três escalões do ensaio de caudal realizado apresentam a mesma tendência: numa fase inicial (fase transitória), uma rápida descida do nível piezométrico, seguida de uma estabilização do nível. Uma vez que na mudança de escalão, isto é, na alteração da frequência de extracção da bomba, esta tinha de ser reiniciada, de forma a reconhecer os novos valores de frequência, o ensaio escalonado

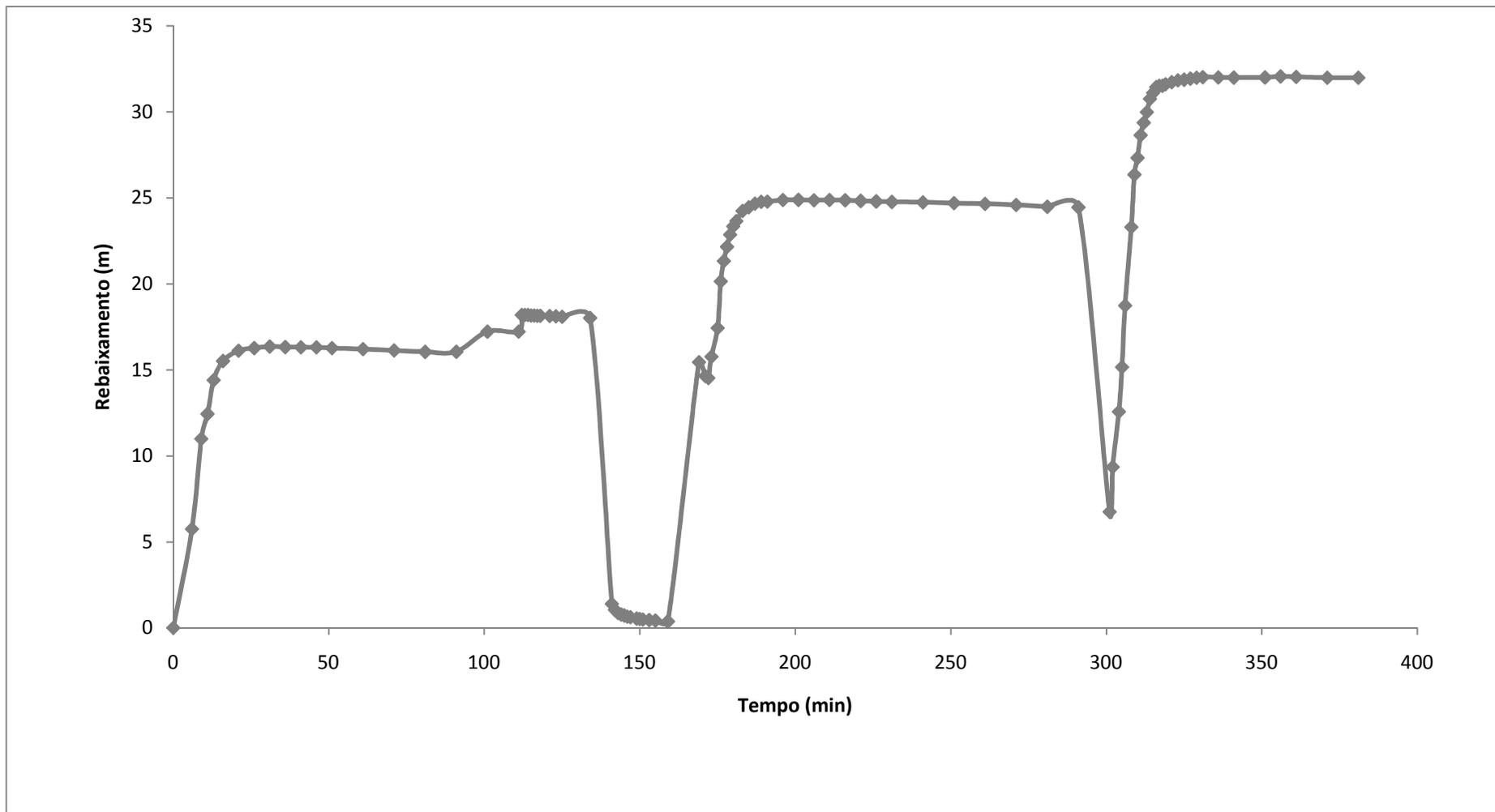


Figura 21 - Evolução do rebaixamento no decurso do ensaio de caudal escalonado realizado a 26 de Abril de 2010.

acabou por ser realizado com recuperação parcial dos níveis.

Observando-se o perfil de rebaixamento para o escalão E_1 constata-se que a fase transitória vai até aos 16 min de ensaio, sendo seguida da estabilização do nível até aos 91 min, com valores médios de -22,21 m ($s=16,16$ m). Depois, devido à mudança de depósito de enchimento, do T77 para o T75 ($V_{T77}=98,4$ m³; $V_{T75}=12,4$ m³), o nível voltou a descer consideravelmente, alcançando um valor de -24,05 m, correspondente a um rebaixamento de 18 m.

Na passagem do escalão E_1 para E_2 , compreendida entre os 134 e os 159 min, a recuperação do nível hidrostático foi quase atingida, chegando o nível piezométrico aos -6,42 m, em apenas 25 min. Esta recuperação quase total do nível pode ser constatada no gráfico, onde se verifica um conjunto de medições de rebaixamentos próximos de zero. No intervalo de tempo referido o nível piezométrico passou dos -24,07 m para os -6,42 m, ou seja, subiu 17,65 m.

Quanto ao perfil de rebaixamento do escalão E_2 verifica-se que a sua fase transitória, de aproximadamente 24 min, vai até aos 183 min de ensaio. Seguidamente, como não houve alteração no depósito de enchimento, o nível estabilizou por volta dos -30,75 m, correspondendo a um rebaixamento de 24,7 m.

O intervalo de tempo compreendido entre os 291 e os 301 min de ensaio de caudal corresponde à passagem do escalão E_2 para o E_3 . Aqui, o nível piezométrico voltou a subir rapidamente, para os -12,80 m.

O perfil do escalão E_3 inicia-se aos 301 min de ensaio e após 14 min termina a fase transitória. É durante esta fase que ocorre uma alteração nos depósitos de enchimento, passando do T75 para o T76 ($V_{T75}=95,8$ m³; $V_{T76}=11,9$ m³), porém sem alteração da tendência geral do perfil de rebaixamento. Dos 315 min em diante, atinge-se a fase de estabilização do nível, mantendo-se a tendência do perfil, mesmo após alteração dos depósitos de enchimento, do T76 para o T78 ($V_{T76}=28,4$ m³; $V_{T78}=14,5$ m³). Esta última alteração não provocou mudanças no perfil de rebaixamento do escalão E_3 , possivelmente, porque os depósitos em causa tinham volumes próximos, o que não acontecia nas alterações de depósitos anteriores em que se passava de depósitos próximos do seu limite de capacidade (100 m³), para depósitos com pouco volume de água. Deste modo, a pressão exercida pelos depósitos com maior volume de água é superior à exercida pelos depósitos que se encontram com pouca água. Logo, ao exercerem menos pressão, os depósitos com menor volume de água vão “facilitar” a extracção de água e, assim, provocar rebaixamentos mais acentuados.

Para o escalão E_3 pode considerar-se que o nível piezométrico estabilizou por volta dos -37,91 m, correspondente ao rebaixamento de 31,86 m.

Para a interpretação matemática destes dados do ensaio escalonado é necessário, primeiramente, seleccionar os valores de rebaixamentos e caudais médios para cada escalão. Assim sendo, considerar-se-ão os valores máximos de rebaixamentos obtidos nas fases de estabilização enumeradas anteriormente (no caso do escalão E_1 , vai-se considerar apenas a primeira fase de estabilização, antes da alteração de depósito de enchimento). As linhas horizontais colocadas no gráfico da Figura 22 mostram que os valores máximos de rebaixamentos são muito semelhantes aos valores médios, nas fases de estabilização dos níveis. Assim sendo, a utilização destes valores é aceitável.

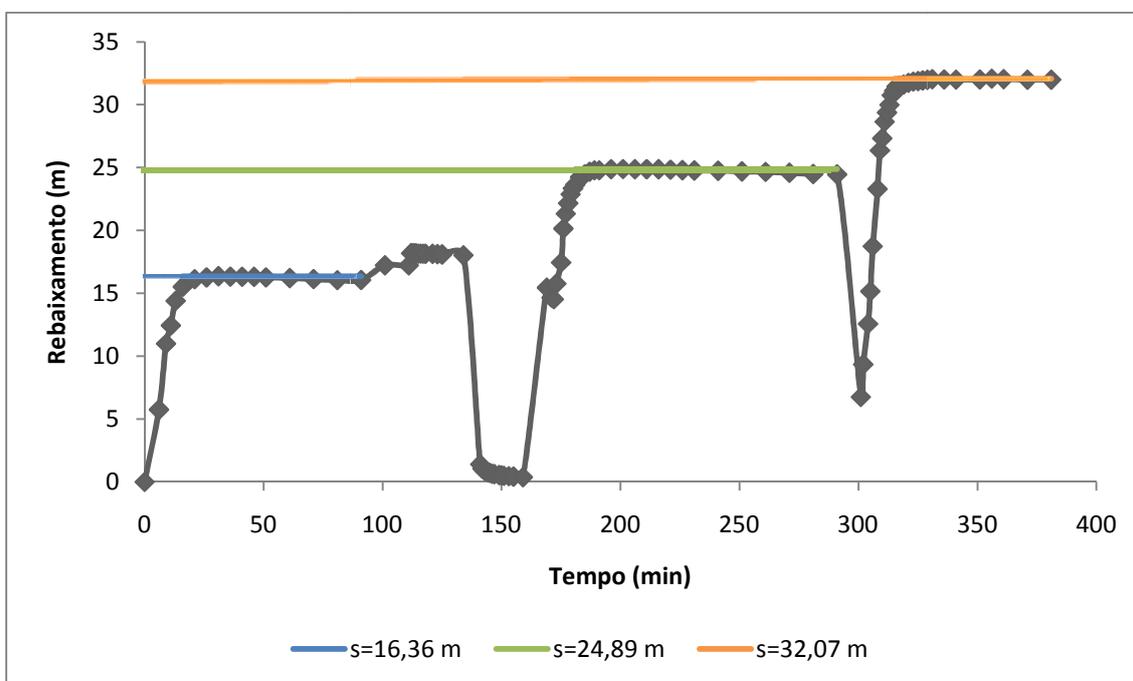


Figura 22 – Indicação dos rebaixamentos máximos de cada escalão do ensaio de caudal escalonado.

Os valores dos caudais de extracção para cada escalão foram obtidos através das variações de volume de água nos depósitos de enchimento, uma vez que foi o único método disponível para o controlo dos caudais. Assim sendo, para o escalão E_1 , o caudal de extracção foi calculado através da variação de volume de água no depósito T77 dos 11 aos 91 min de ensaio. No caso do escalão E_2 , como a água esteve sempre a ser encaminhada para o enchimento do depósito T75, o caudal de extracção foi calculado para todo o intervalo de tempo do escalão (dos 171 aos 291 min). Já no caso

do escalão E₃, apenas se considerou a variação de volume de água no decorrer do enchimento do depósito T76 (somente 30 min).

Os valores de rebaixamentos máximos e caudais médios para cada escalão encontram-se expressos na Tabela 6 e representados no gráfico da Figura 23.

Tabela 6 – Valores de rebaixamentos máximos e de caudais médios para cada escalão do ensaio de caudal realizado a 26 de Abril de 2010.

| Escalão | s (m) | Q (m ³ /dia) |
|----------------|---------|---------------------------|
| E ₁ | 16,36 | 516,64 |
| E ₂ | 24,89 | 806,71 |
| E ₃ | 32,07 | 1050,00 |

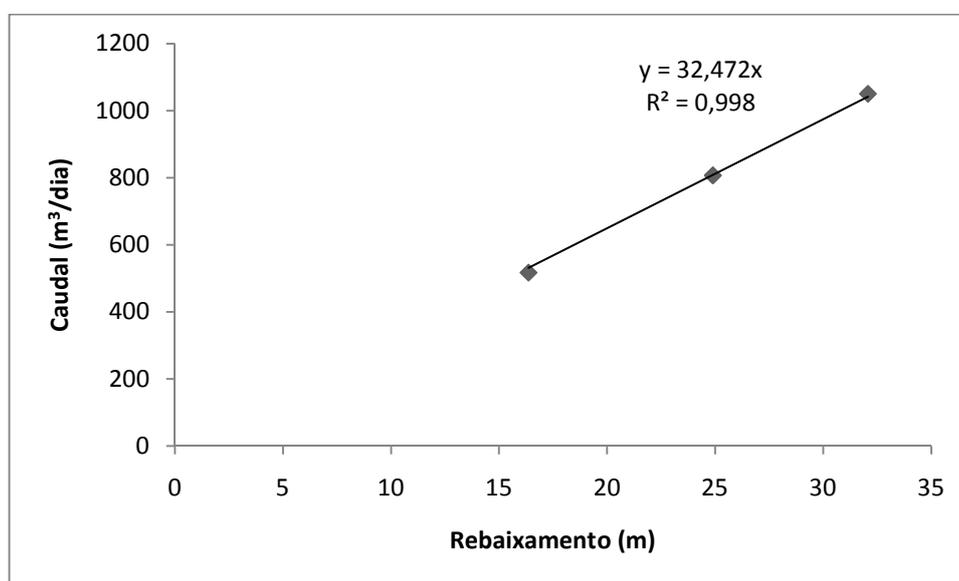


Figura 23 - Rebaixamentos máximos em função dos caudais médios dos três escalões do ensaio de caudal realizado a 26 de Abril de 2010.

Como se pode verificar na Figura 23, a curva característica Q - s é uma recta que passa na origem ($R^2=0,998$), sendo Q directamente proporcional a s . Como referem Martinez e Lopez (1984), a obtenção desta curva característica (uma recta que passa na origem) significa que estamos perante um aquífero cativo, sem perdas de carga no poço, facto reforçado pelo gráfico da Figura 24, em que se expressam os caudais específicos (Tabela 7) em função de s . Aqui, a curva característica Q/s - s é uma recta subparalela ao eixo dos rebaixamentos.

Os mesmos autores referem ainda que, quando se admite que $n=1$, depende-se da equação geral dos rebaixamentos [10] que o rebaixamento é proporcional ao caudal, não

sendo possível separar cada um dos coeficientes A e B . Nesses casos, o regime é laminar e as perdas de carga, embora possam existir, têm efeitos práticos depreciáveis, tendo em conta que A é muito maior que B .

Tabela 7 – Valores de caudais específicos para cada escalão do ensaio de caudal realizado a 26 de Abril de 2010.

| Escalão | s (m) | Q/s ($m^3/dia/m$) |
|----------------|---------|-----------------------|
| E ₁ | 16,36 | 31,58 |
| E ₂ | 24,89 | 32,41 |
| E ₃ | 32,07 | 32,74 |

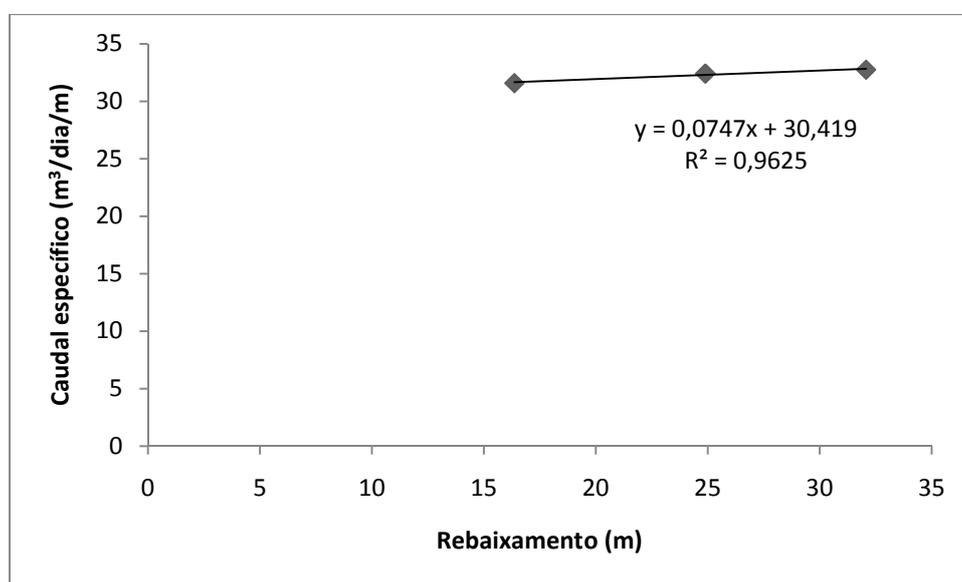


Figura 24 – Caudais específicos em função dos rebaixamentos para cada escalão do ensaio de caudal realizado a 26 de Abril de 2010.

Assim, tratando-se de um aquífero cativo sem perdas de carga a funcionar em regime laminar ($n=1$), o termo BQ^n anula-se e o rebaixamento fica a depender unicamente do caudal de extracção.

Ao expressarmos graficamente $s-Q$ (Figura 25), obtém-se uma recta de equação $s=0,0308.Q$, sendo que o declive dela corresponde ao valor do coeficiente A .

A captação PS1 é, neste sentido, uma captação de água eficiente, sem perdas de carga lineares e não lineares significativas.

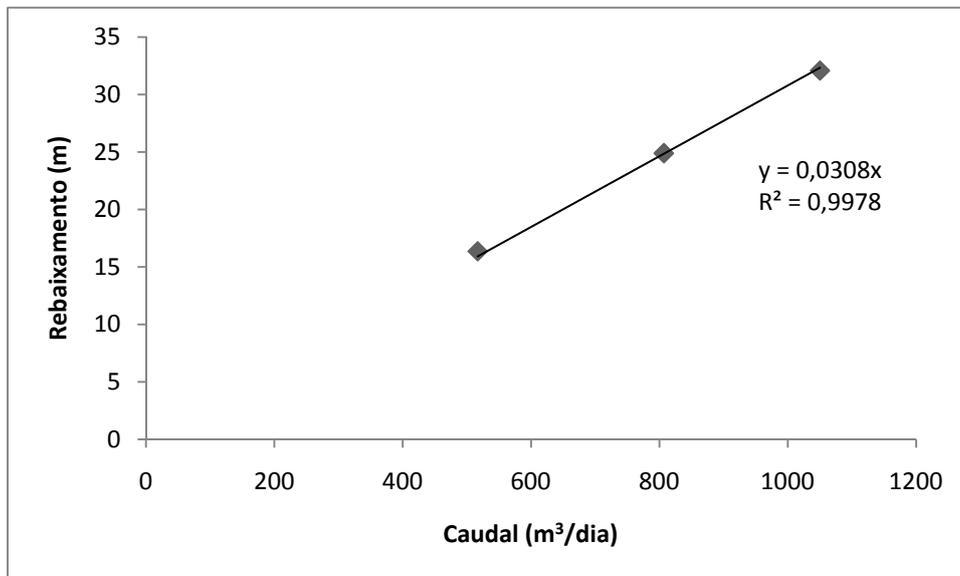


Figura 25 – Variação dos rebaixamentos em função dos caudais de extracção, considerando que não existem perdas de carga.

Comparando os valores de caudais específicos obtidos em ambos os ensaios de caudal realizados, constata-se que a média dos caudais específicos obtidos no ensaio escalonado ($Q/s=32,24 \text{ m}^3/\text{dia}/\text{m}$) é ligeiramente inferior ao caudal específico obtido no ensaio a caudal constante ($Q/s=36,63 \text{ m}^3/\text{dia}/\text{m}$). Esta diferença poderá estar relacionada com o facto do ensaio a caudal constante ter sido realizado em condições que permitiram a obtenção de dados mais fidedignos para a caracterização hidráulica do aquífero, isto porque corresponde à bombagem de água sem aproveitamento para o enchimento de depósitos. Já no caso do ensaio escalonado, a água bombeada foi sempre encaminhada para enchimento, dadas as necessidades da unidade de engarrafamento de água.

5.2. Sólidos em suspensão

Como referido no capítulo da metodologia, a determinação da concentração dos sólidos suspensos nas amostras de água recolhidas teve como principal objectivo a análise da evolução da concentração dos sólidos suspensos no decurso dos ensaios de caudal realizados e a sua relação com a piezometria.

Para tal, foram recolhidas amostras de água (para garrações de 5 L) em todos os ensaios de caudal realizados. Posteriormente, procedeu-se à filtração destas amostras usando-se membranas filtrantes de 0,1 μm , 0,22 μm e 0,45 μm , previamente pesadas e colocadas em caixas de Petri.

5.2.1. Ensaio a caudal constante

Para as amostras referentes ao ensaio a caudal constante (realizado a 22 de Março de 2010), a filtração ocorreu no Laboratório da unidade de engarraamento de água, onde não havia possibilidade da recuperação do filtrado para posterior filtração em membranas filtrantes de porosidade mais fina. Desse modo, dividiu-se a amostra em duas porções alíquotas, sendo uma delas filtrada em membranas de 0,45 μm e a outra em membranas de 0,22 μm (à exceção das amostras 1, 2 e 3, em que se filtraram 300 mL de amostra numa membrana filtrante de 0,1 μm , tendo o restante volume sido dividido pelas membranas filtrantes de 0,45 μm e 0,22 μm). Os dados obtidos relativos à concentração de sólidos suspensos nas amostras encontram-se representados pelos gráficos das Figuras 26 e 27.

No gráfico da Figura 26 pode observar-se a evolução da concentração de sólidos suspensos no decurso do ensaio de caudal, nas membranas filtrantes de 0,45 μm e de 0,22 μm , separadamente. Como se pode verificar, ambas apresentam a mesma tendência de evolução, tendo os seus picos de concentração de sólidos suspensos entre os 20 e os 100 min de ensaio, sensivelmente. Para uma melhor discussão da evolução da concentração de sólidos suspensos, analisemos o gráfico da Figura 27, onde está representada a evolução da concentração total de sólidos suspensos no decorrer do ensaio. Aqui, verificamos que nos primeiros 18 min de ensaio a concentração total de sólidos suspensos é baixa, por volta dos 0,21 mg/L. Posteriormente, dá-se uma acentuada subida destes valores, evidenciando-se dois picos de concentração máxima: 5,68 mg/L, aos 39 min e 7,62 mg/L, aos 64 min, ou seja, em apenas 46 min de ensaio, a caudal constante, a concentração total de sólidos suspensos aumentou cerca de 36 vezes.

Após estes picos, a concentração total de sólidos suspensos começa a diminuir, chegando ao valor de 1,10 mg/L, aos 135 min. A partir daqui, a diminuição nos valores

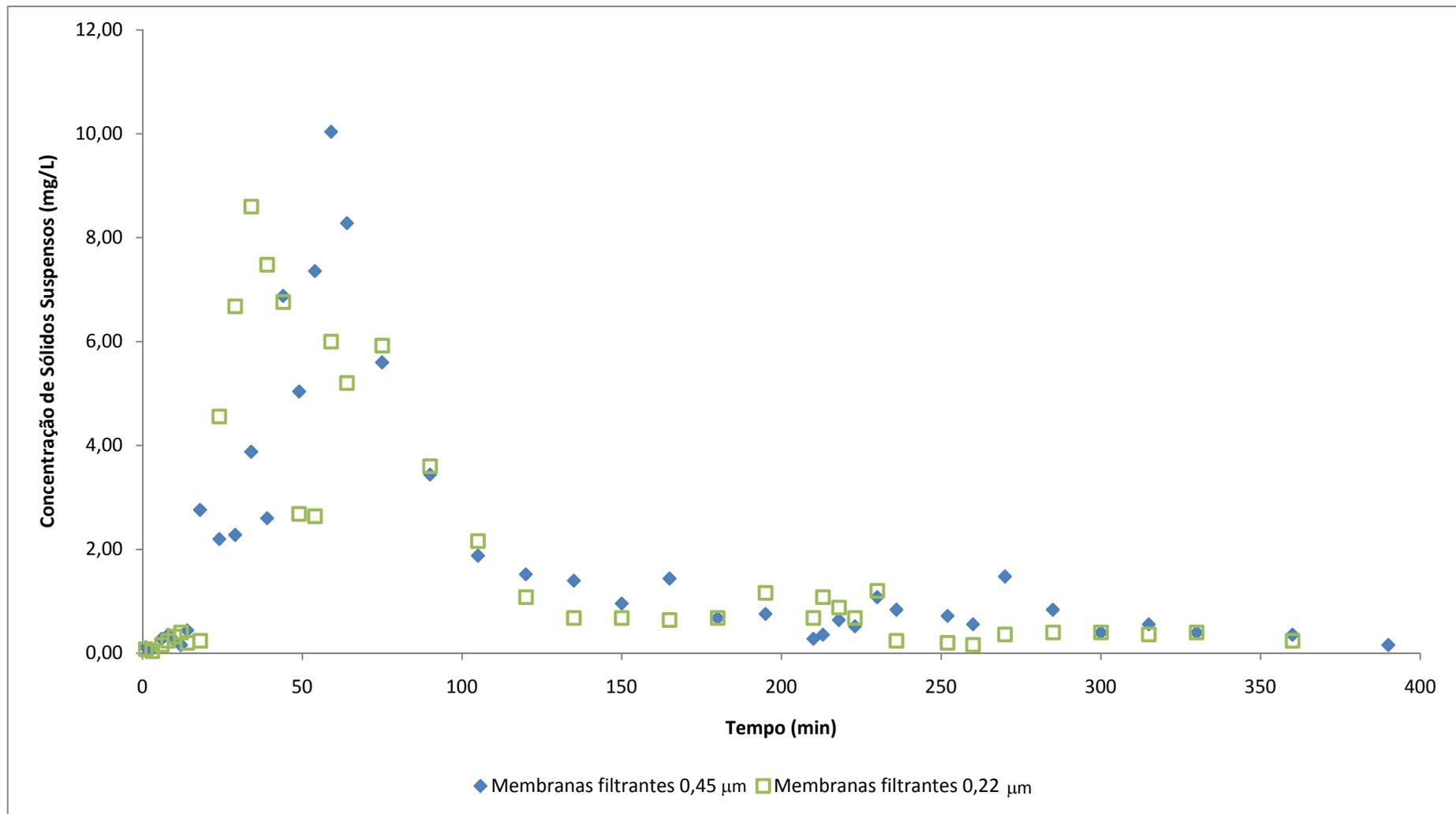


Figura 26 – Evolução da concentração de sólidos suspensos nas membranas filtrantes de 0,45 μm e 0,22 μm , ao longo do ensaio de caudal realizado a 22 de Março de 2010.

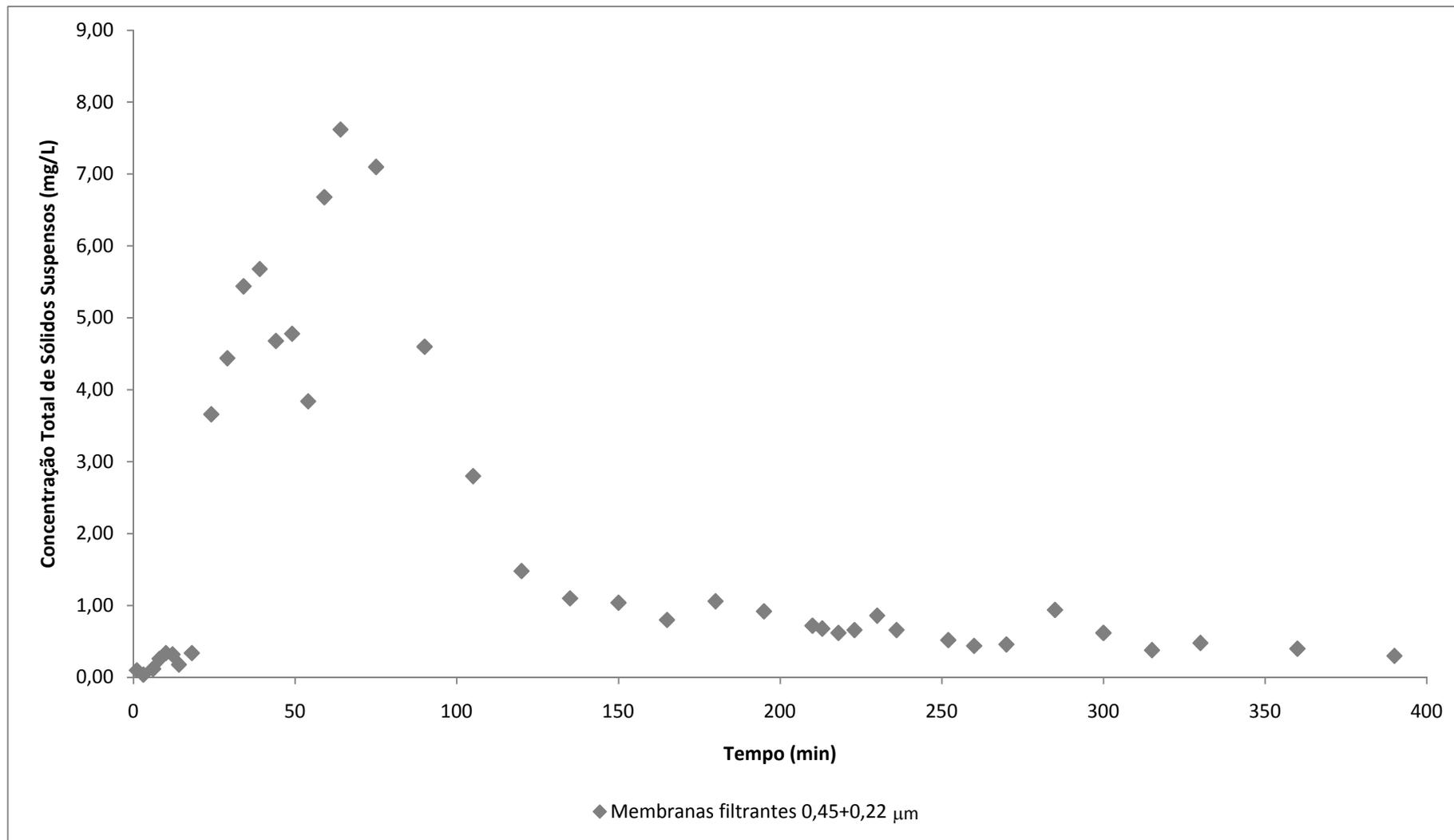


Figura 27 – Evolução da concentração total de sólidos suspensos nas membranas filtrantes de 0,45 μm e 0,22 μm, ao longo do ensaio de caudal realizado a 22 de Março de 2010.

de concentração total de sólidos suspensos ocorre mais lentamente, sugerindo uma fase de pseudo-estabilização até aos 285 min, onde a concentração é de 0,94 mg/L.

Após este ponto, dá-se uma pequena quebra nos valores de concentração de sólidos suspensos, finalizando-se o ensaio de caudal, aos 390 min, com uma concentração de 0,30 mg/L.

Na Figura 28 podemos observar a evolução da concentração total de sólidos suspensos e dos rebaixamentos no decurso do ensaio de caudal. Numa primeira análise, verifica-se que os picos de concentração total de sólidos suspensos, assim como a fase de rápido aumento destes valores (até ao pico máximo de 7,62 mg/L), apresentam um atraso relativamente à fase transitória do perfil de rebaixamento, que termina por volta dos 20 min. Neste momento, as concentrações totais de sólidos suspensos ainda se encontram por volta dos 0,34 mg/L. Como referido anteriormente, os picos de concentração de sólidos suspensos ocorrem aos 39 min e aos 64 min de ensaio, quando o perfil de rebaixamento já se encontra pseudo-estabilizado. Este desfasamento entre os dois perfis (rebaixamentos e concentrações totais de sólidos suspensos) dever-se-á ao facto da bomba arrancar em modo progressivo e a água demorar alguns minutos até chegar à unidade de engarrafamento de água, onde nos encontrávamos a recolher as amostras de água. Assim, o aumento da concentração total de sólidos suspensos na água, provocado pelo aumento progressivo do caudal, só vai ser evidenciado após alguns minutos de ensaio (Figura 29). Além disso, o aquífero apresenta uma determinada elasticidade que lhe permite, nos primeiros minutos de ensaio, ajustar-se às alterações provocadas pela bombagem de água, não havendo arrastamento de materiais do aquífero. Contudo, com o aumento progressivo do caudal (cujo valor máximo atinge os 32,41 m³/h), o aquífero acaba por “ceder”, havendo um aumento acentuado de sólidos suspensos na água. Este aumento termina aos 64 min de ensaio, com um valor máximo de 7,62 mg/L de sólidos suspensos na água. A esta altura, quer o perfil de rebaixamento, quer o perfil de evolução dos caudais de extracção encontram-se pseudo-estabilizados (Figuras 28 e 29). Após este pico máximo de concentração, observa-se um acentuado decréscimo na concentração total de sólidos suspensos até aos 120 min (passando-se de 7,62 mg/L para 1,48 mg/L), seguido de uma pseudo-estabilização até ao momento em que se procedeu ao encaminhamento da água extraída para enchimento dos depósitos (Figura 28).

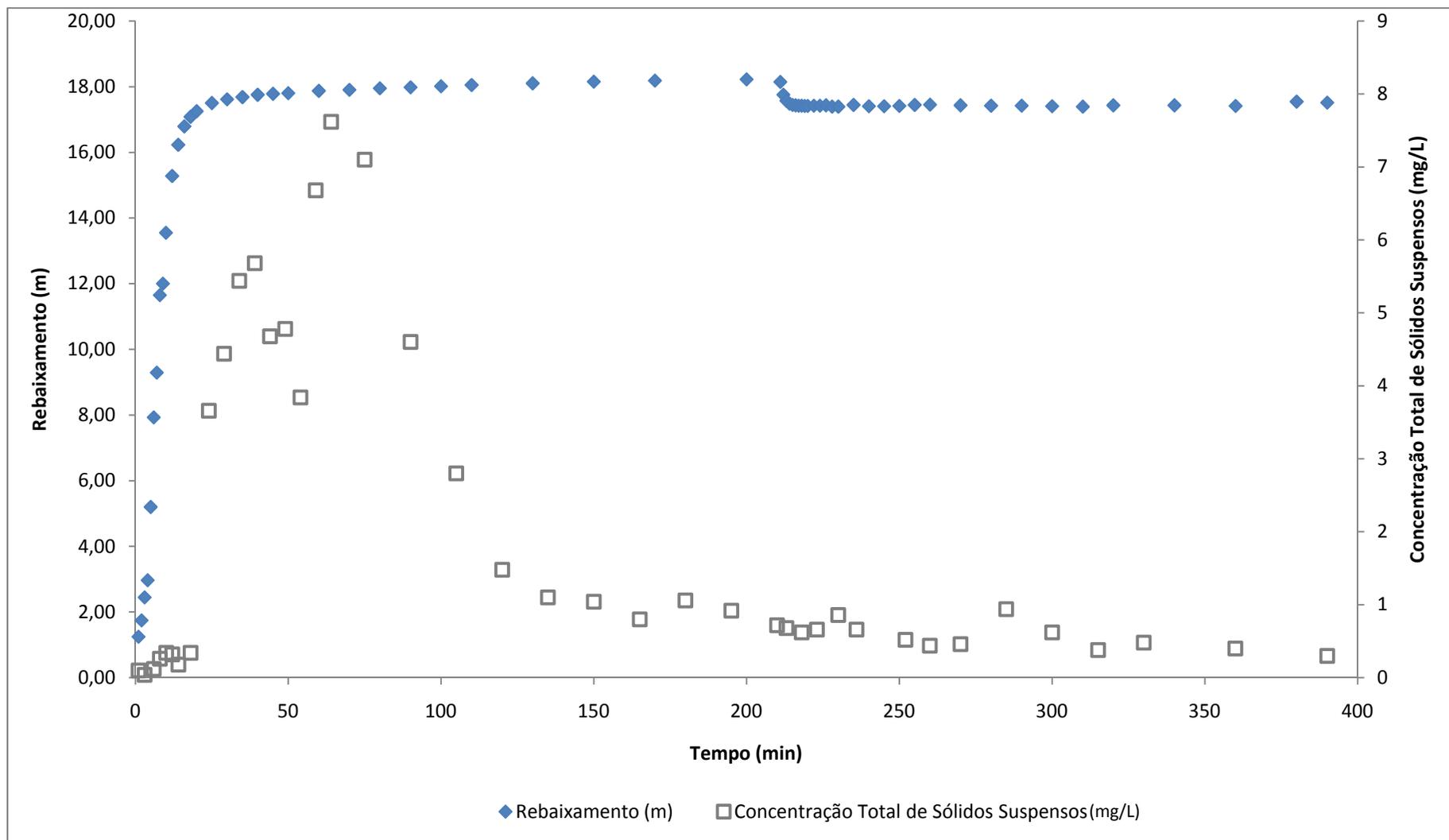


Figura 28 – Evolução do rebaixamento e da concentração total de sólidos suspensos, ao longo do ensaio de caudal realizado a 22 de Março de 2010.

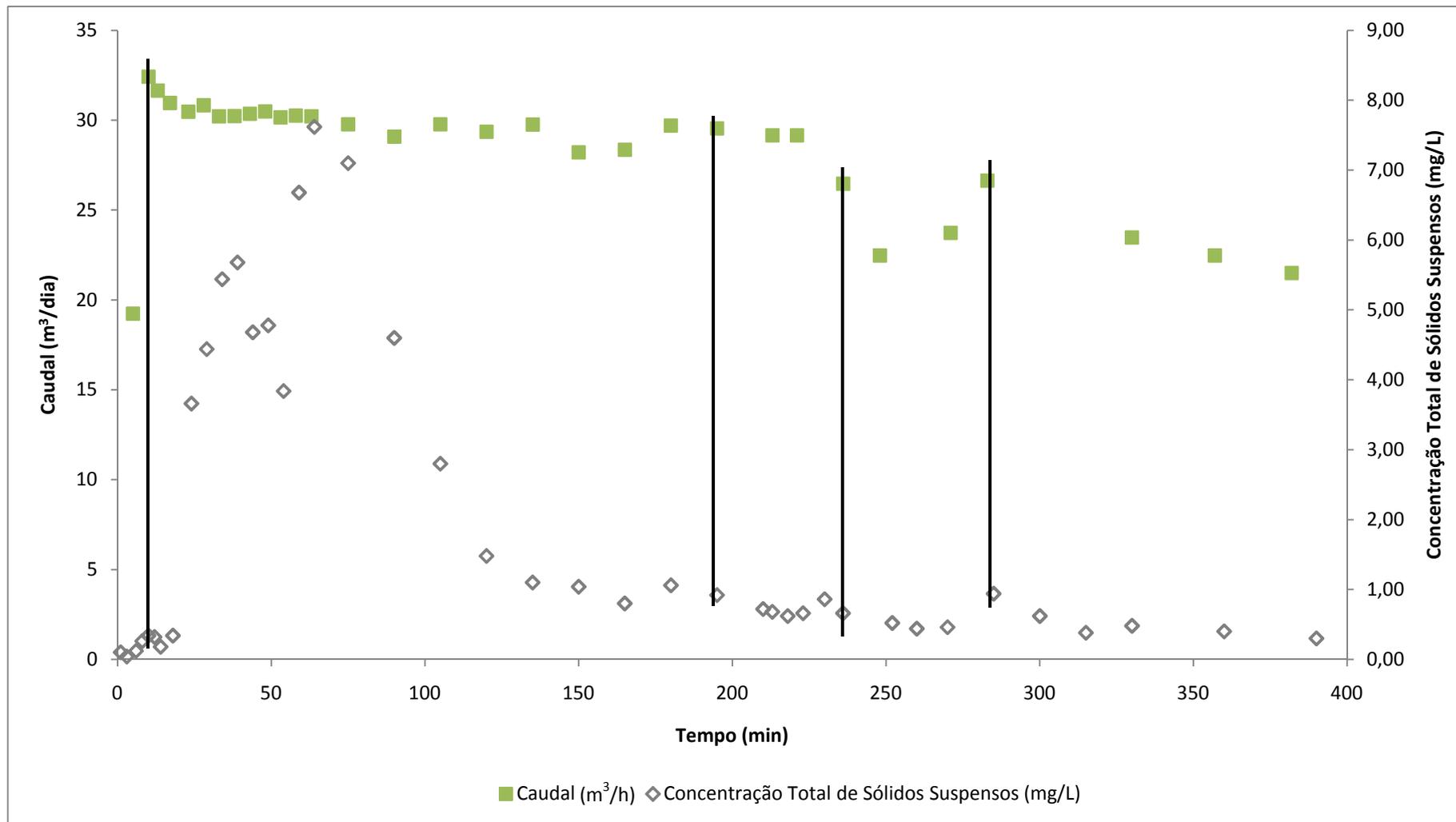


Figura 29 – Evolução do caudal e da concentração total de sólidos suspensos, ao longo do ensaio de caudal realizado a 22 de Março de 2010. As linhas verticais, a preto, indicam momentos importantes, em que alterações no caudal de extração provocaram variações na concentração de sólidos suspensos.

Após esta alteração nas condições de extracção de água verifica-se um pequeno decréscimo na concentração total de sólidos suspensos (de 0,20 mg/L), seguido de uma nova pseudo-estabilização (Figura 28). Nesta pseudo-estabilização é possível evidenciarem-se três patamares distintos (Figura 29):

- a) dos 195 aos 236 min, correspondente aos momentos subsequentes ao início do enchimento dos depósitos, onde há ligeira diminuição do caudal, acompanhada do decréscimo da concentração total de sólidos suspensos;
- b) dos 236 até aos 270 min, onde uma diminuição de 4 m³/h no caudal se reflecte numa ligeira diminuição na concentração total de sólidos suspensos, comparativamente aos valores do patamar anterior;
- c) dos 283 min até final do ensaio de caudal. Aqui, uma subida no caudal de extracção, devida à mudança de depósito de enchimento, provocou de imediato uma subida na concentração total de sólidos suspensos. Após este momento, quer os caudais, quer os valores da concentração total de sólidos suspensos foram diminuindo, tendendo para uma estabilização no caso da concentração de sólidos suspensos.

Em suma, pode-se afirmar que as alterações nos caudais de exploração, resultantes de alterações nas condições de extracção, tal como, mudança de depósito de enchimento, induzem a variações nas concentrações de sólidos suspensos na água. Como se pode constatar, um aumento ou diminuição no caudal de extracção provoca, de imediato, aumento ou diminuição da concentração total de sólidos suspensos na água, respectivamente.

5.2.2. Ensaio escalonado

A filtração das amostras de água recolhidas no ensaio escalonado ocorreu no Laboratório de Águas do Departamento de Ciências da Terra da Universidade do Minho. Aqui, o sistema de filtração permitiu a recuperação da água filtrada tendo-se, assim, optado por filtrar, primeiramente, a amostra numa membrana filtrante de 0,45 µm e depois numa de 0,22 µm. Devido à elevada quantidade de sólidos suspensos em algumas amostras de água, houve a necessidade de se usarem várias membranas filtrantes de 0,45 µm e, por vezes, de 0,22 µm para a mesma amostra. Os dados obtidos

relativos à concentração de sólidos suspensos nas amostras recolhidas encontram-se representados nas Figuras 30 e 31.

No gráfico da Figura 30 encontra-se a evolução da concentração de sólidos suspensos nas membranas filtrantes de 0,45 μm e 0,22 μm . Primeiramente, observa-se que até aos 210 min de ensaio só se usaram membranas filtrantes de 0,22 μm . Neste período, a concentração total de sólidos suspensos não variou muito, encontrando-se por volta dos 2,38 mg/L, à excepção dos dois últimos pontos ($t=200$ e $t=210$ min), onde as concentrações atingem valores muito acima da média anterior: 9,98 mg/L e 19,14 mg/L, respectivamente.

A partir dos 220 min de ensaio, já temos valores de concentração de sólidos suspensos nas membranas filtrantes de 0,45 μm , ficando os valores relativos às membranas filtrantes de 0,22 μm reduzidos a 0,07 mg/L.

Quanto à evolução da concentração de sólidos suspensos nas membranas filtrantes de 0,45 μm observam-se dois picos máximos: 100,04 mg/L, aos 350 min, e 105,78 mg/L, aos 360 min. Entre os 220 e os 240 min também há um pico, mas de menor dimensão (concentração máxima de 37,70 mg/L). No período compreendido entre os 250 e os 320 min de ensaio, a concentração de sólidos suspensos nas membranas de 0,45 μm não varia muito, tendo como valor médio 6,95 mg/L. Dos 330 min aos 380 min é onde se encontram os maiores valores de concentração de sólidos suspensos nas membranas de 0,45 μm .

Analisando o gráfico da Figura 31, onde se encontram as concentrações totais de sólidos suspensos (das membranas filtrantes de 0,45 μm + 0,22 μm) em função do tempo, observa-se uma fase inicial mais ou menos estável, com valores na ordem dos 2,38 mg/L, correspondentes unicamente à concentração de sólidos suspensos retidos nos filtros de 0,22 μm . Posteriormente, dos 200 aos 240 min observa-se um pico, cujos primeiros dois pontos correspondem ainda à concentração de sólidos suspensos só em membranas filtrantes de 0,22 μm , mas com valores elevados (já referidos anteriormente e evidentes no gráfico da Figura 30). Os pontos dos 220 a 240 min correspondem já à soma dos sólidos suspensos de 0,45 μm e 0,22 μm . Mas, como a concentração de sólidos suspensos referente a 0,22 μm é mínima, os elevados valores encontrados aqui

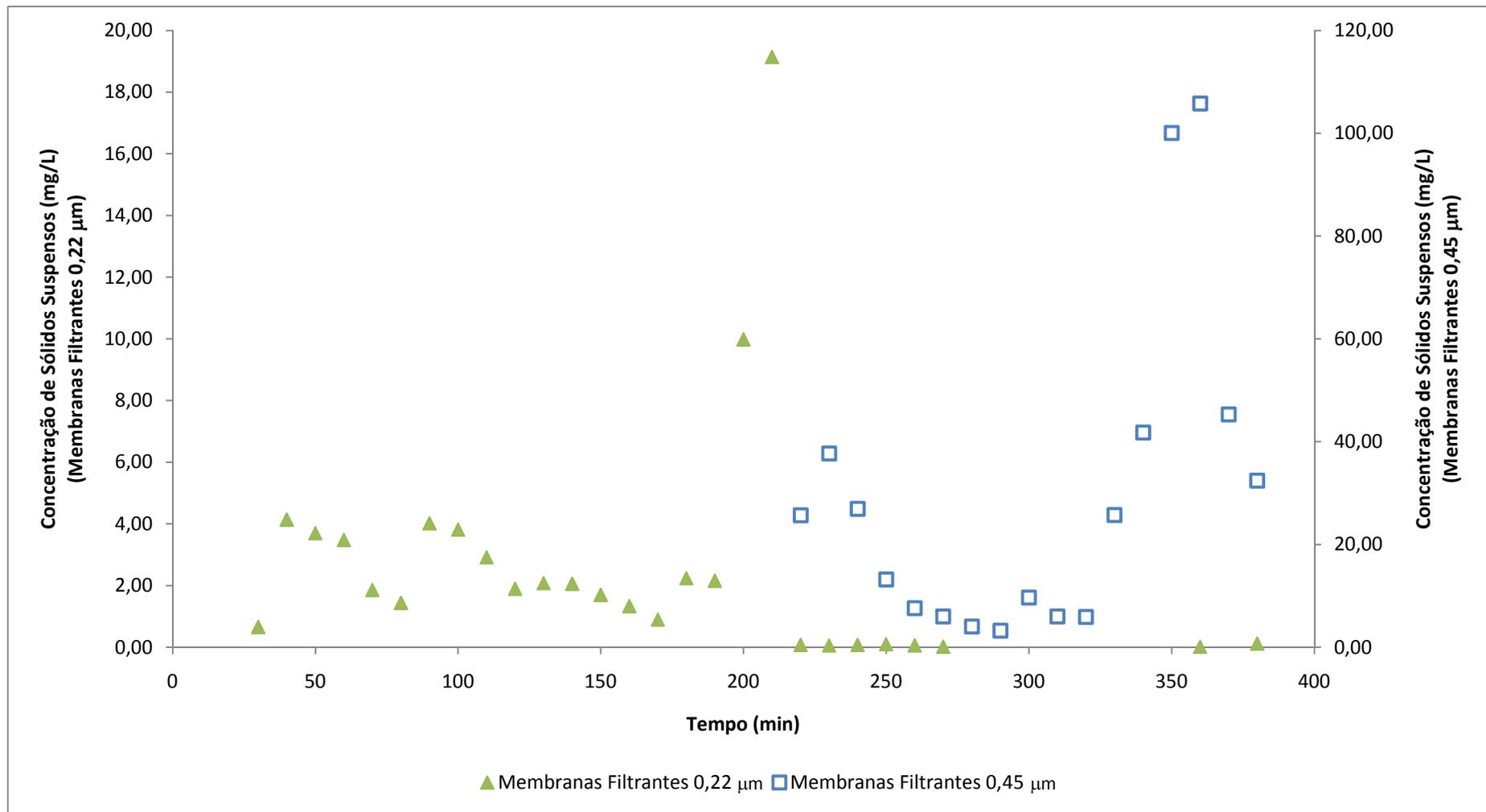


Figura 30 – Evolução da concentração de sólidos suspensos nas membranas filtrantes de 0,45 µm e 0,22 µm, ao longo do ensaio de caudal escalonado realizado a 26 de Abril de 2010.

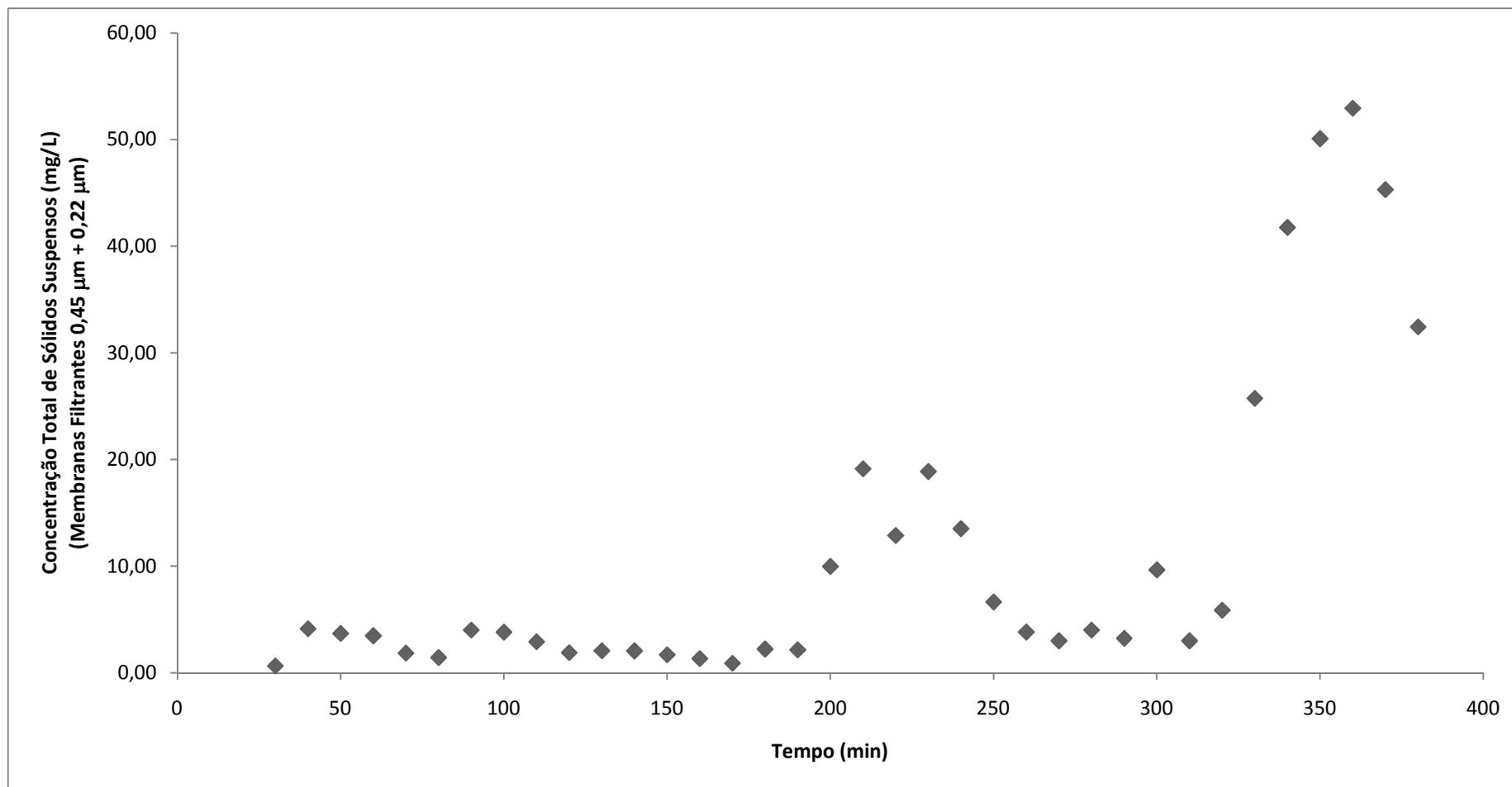


Figura 31 – Evolução da concentração total de sólidos suspensos nas membranas filtrantes de 0,45 μm e 0,22 μm, ao longo do ensaio de caudal escalonado realizado a 26 de Abril de 2010.

devem-se quase inteiramente à concentração de sólidos suspensos encontrados nas membranas de 0,45 μm .

Dos 250 aos 320 min, os valores encontrados devem-se, também, quase exclusivamente à concentração de sólidos suspensos obtida nas membranas filtrantes de 0,45 μm , com valores médios na ordem dos 7,49 mg/L, à exceção do ponto correspondente ao $t=300$ min, em que a concentração total de sólidos suspensos é de 9,66 mg/L. Dos 330 min até ao final do ensaio, temos outro pico, o mais elevado, nos valores de concentração total de sólidos suspensos, atingindo-se o valor máximo de 52,93 mg/L.

Comparando, por último, a evolução da concentração total de sólidos suspensos na água com os rebaixamentos obtidos ao longo do ensaio escalonado (Figura 32), constatamos que a primeira fase, mais ou menos estável relativamente à concentração de sólidos suspensos, com valores médios de 2,38 mg/L, corresponde ao escalão E_1 e a parte do escalão E_2 . Neste escalão (E_2), o pico de concentração total de sólidos suspensos ocorre com um atraso, comparativamente, com a fase transitória do perfil de rebaixamento, como já tinha ocorrido no ensaio a caudal constante.

Após este pico, dos 200 aos 240 min de ensaio, a concentração de sólidos suspensos reduz-se para valores da ordem dos 7,49 mg/L. No escalão E_3 , como há aumento do caudal de extracção, verifica-se um novo pico de concentração, atingindo os valores mais altos registados em todos os ensaios.

A evolução da concentração total de sólidos suspensos obtida no ensaio escalonado foi ao encontro do ocorrido no ensaio a caudal constante: sempre que há uma variação do caudal, há uma alteração imediata da quantidade de sólidos suspensos na água, no mesmo sentido (caso o caudal aumente, a concentração total de sólidos suspensos também aumenta, e vice-versa). Tal relação pode ser visualizada pelos dados presentes na Tabela 9, onde temos os valores de caudais de extracção acompanhados pelos rebaixamentos máximos provocados e pelas concentrações totais de sólidos suspensos que determinado caudal de extracção provoca.

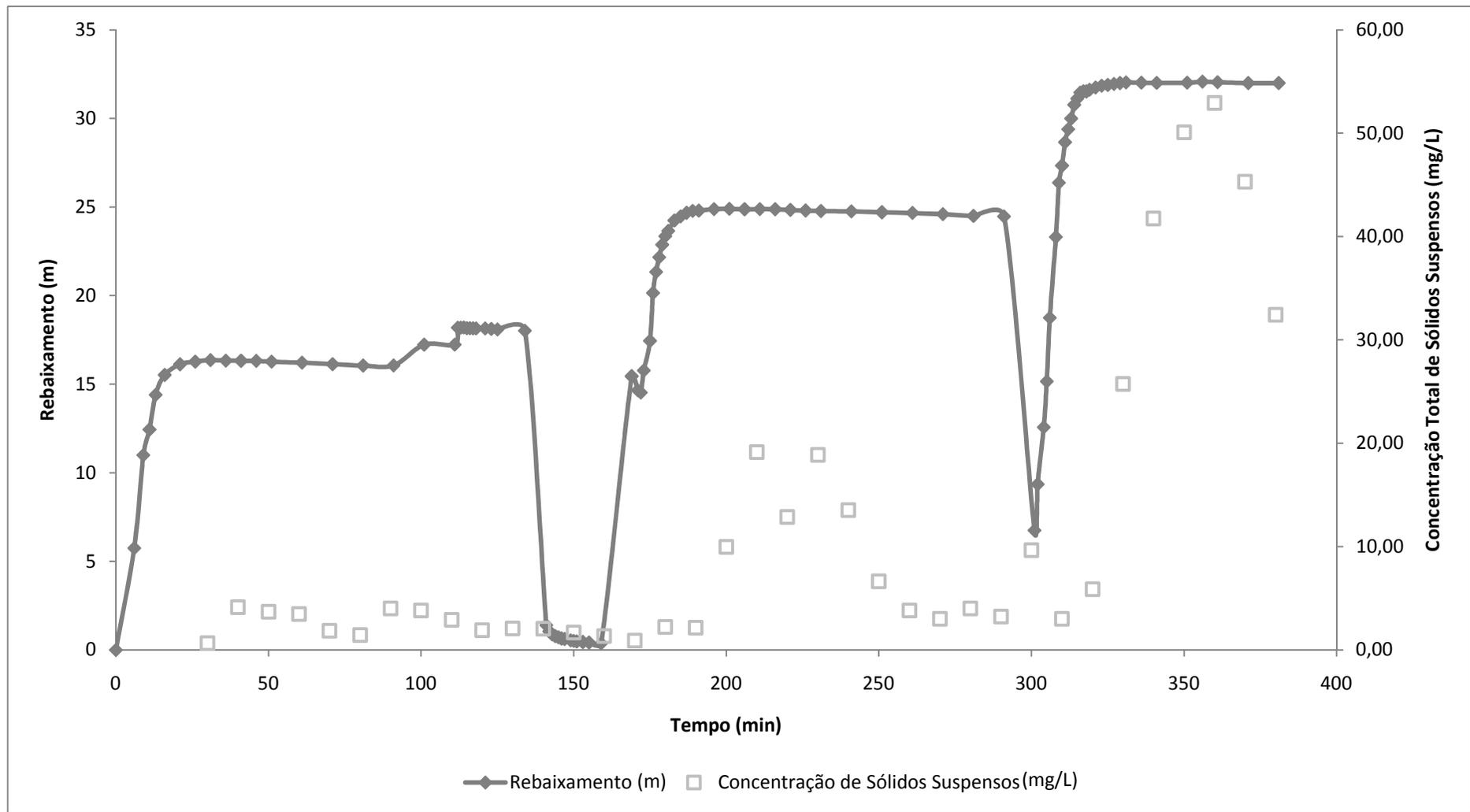


Figura 32 – Evolução do rebaixamento e da concentração total de sólidos suspensos ao longo do ensaio de caudal escalonado realizado a 26 de Abril de 2010.

Em suma, pode-se dizer que não é só a simples variação do caudal de extracção que faz variar o rebaixamento e, conseqüentemente, a quantidade de sólidos transportados na água, isto porque, como vimos anteriormente, o modo como se alteram os caudais de extracção afectam e muito o regime do aquífero. O simples facto de alternarmos de depósito de enchimento é suficiente para provocar modificações do caudal de extracção, ainda que a bomba esteja na mesma frequência de funcionamento, e, conseqüentemente, na quantidade de sólidos suspensos na água (Figuras 28 e 29).

5.3. Caracterização mineralógica dos materiais retidos nos filtros

A caracterização mineralógica dos materiais retidos nos filtros consistiu em análises por DRX dos sólidos suspensos retidos nas membranas filtrantes. Dado a elevada quantidade de membranas filtrantes usadas nos ensaios de caudal realizados, foram seleccionadas apenas algumas, consideradas representativas das diversas fases dos ensaios.

Os resultados das estimativas da composição mineralógica por DRX dos sólidos suspensos retidos nas membranas filtrantes encontram-se na Tabela 8, sendo que esta estimativa foi efectuada a partir de picos diagnósticos para as diferentes fases mineralógicas identificadas (Brindley e Brown, 1980; Gomes, 1988; Moore e Reynolds, 1997; Velho *et al.*, 1998).

Para a análise dos dados obtidos, serão discutidas as estimativas da composição mineralógica por DRX para cada ensaio de caudal realizado, sendo que as referências de cada amostra indicam o ensaio de caudal respectivo, como referido anteriormente na metodologia.

De um modo geral, as fases mineralógicas identificadas por DRX dos sólidos suspensos retidos nas membranas filtrantes englobam quartzo, feldspato potássico, plagioclase, moscovite e, em menor quantidade, minerais argilosos 2:1 (por ex: vermiculite, esmectite, interestratificados vermiculíticos) e 1:1 (caulinite), assim como, alguma goethite, entre os óxidos de ferro.

Quanto às amostras do ensaio a caudal constante verifica-se uma predominância da moscovite, com estimativas entre os 60% e os 70%, à excepção da amostra A-11 em que este valor cai para os 5%, enquanto o feldspato potássico atinge 38%. No caso desta amostra há a referir que a plagioclase tem o maior valor comparativamente com as restantes amostras do ensaio a caudal constante.

Tabela 8 – Estimativa (em %) da composição mineralógica por DRX dos sólidos suspensos retidos nas membranas filtrantes. Qz - quartzo; FK - feldspato potássico; Pl - plagioclase; Mo - moscovite; 2:1 - minerais argilosos 2:1; 1:1 - minerais argilosos 1:1; Goe - goethite; tr - vestigial; - não detectado.

| Minerais | Qz | FK | Pl | Mo | 2:1 | 1:1 | Goe | |
|-------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|------------|------|
| Picos diagnósticos (Å) | 4,25 | 3,24 | 3,18-3,20 | 10 | 15-14 | 12 | 7 | 4,18 |
| Amostras | | | | | | | | |
| A-9 | 9 | 10 | 7 | 61 | 3 | tr | 11 | - |
| A-11 | 27 | 38 | 27 | 5 | - | - | 2 | - |
| A-26 | 12 | - | - | 64 | 2 | tr | 22 | - |
| A-27 | - | - | 12 | 71 | tr | - | 17 | - |
| E1-18 | 13 | 6 | - | 54 | 11 | tr | 16 | tr |
| E1-23 | 11 | 11 | - | 56 | 9 | tr | 14 | - |
| E1-25 | - | 26 | - | 54 | 7 | tr | 14 | - |
| E2-30 | 6 | 10 | - | 59 | 10 | tr | 15 | - |
| E2-35 | 27 | 18 | 40 | 12 | tr | 0 | 2 | tr |
| E2-41 | 15 | 8 | 46 | 22 | 2 | tr | 7 | - |
| E3-43 | 6 | 82 | - | 6 | 2 | tr | 4 | - |
| E3-44 | 29 | 13 | 19 | 27 | 4 | tr | 8 | - |
| E3-48 | 43 | 11 | 41 | 4 | - | - | 1 | - |

Nas amostras relativas ao escalão E₁ do ensaio escalonado, continuamos a observar a predominância da moscovite, apesar dos valores serem ligeiramente inferiores (cerca de 55%) aos encontradas nas amostras do ensaio a caudal constante. As quantidades de feldspato potássico são baixas (máximo de 26%). Há, ainda, vestígios de goethite, na amostra E1-18.

Relativamente às amostras do escalão E₂ constata-se que, de um modo geral, a quantidade de moscovite é inferior à encontrada no escalão anterior, apesar de na amostra E2-30 a moscovite atingir 59%. É também neste escalão que a goethite surge

em quantidades vestigiais. As quantidades de feldspato potássico também diminuem, comparativamente com as encontradas no escalão anterior. Volta-se a encontrar plagioclase com os valores mais elevados de entre todas as amostras representativas dos ensaios de caudal realizados.

Por último, no escalão E₃ é o feldspato potássico que ocorre em maior quantidade, (82%) na amostra E3-43 (cuja membrana filtrante é de 0,45 µm). À excepção desta amostra, a quantidade de feldspato potássico é semelhante à encontrada nas restantes amostras. A plagioclase surge em baixas quantidades, assim como a moscovite.

O quartzo surge em maiores quantidades nas amostras referentes ao escalão E₃ do ensaio escalonado.

De entre as amostras de sólidos suspensos e depositados nas membranas filtrantes, foram escolhidas apenas algumas (das representativas de cada ensaio de caudal, já referidas na metodologia) em que a quantidade de sólidos era minimamente suficiente para uma análise por DRX (Tabela 8) tendo em consideração que a análise foi realizada directamente sobre o papel das membranas filtrantes. No entanto, a quantidade de amostra era demasiado pequena para a identificação dos minerais argilosos cuja metodologia é referida em tratados como Brindley e Brown (1980) e Moore e Reynolds (1997). Por essa razão, na Tabela 8 surgem minerais argilosos 2:1 cujo padrão de difracção indica a presença de fases entre 15 Å e 14 Å e, também, fases vestigiais a cerca de 12 Å. Estes minerais 2:1 poderão corresponder a vermiculites, interstratificados mica-vermiculite e/ou esmectites. Os minerais 1:1 correspondem, sem qualquer dúvida, aos minerais do grupo da caulinite.

Na Figura 33 observam-se os padrões de difracção dos principais minerais identificados (quartzo, feldspato potássico e moscovite), cujos valores dos picos diagnósticos são indicados na Tabela 8. Relativamente aos minerais argilosos, a caulinite identifica-se pelos picos assimétricos e alargados a 7,19 Å e a 3,56 Å, assinalando a sua baixa cristalinidade. A 14,33 Å ocorre um pico muito alargado e assimétrico, particularmente para o lado dos grandes ângulos 2θ. Esta fase poderá, como referido anteriormente, corresponder a uma vermiculite e/ou a esmectite. O interstratificado mica-vermiculite identifica-se por reflexões a 26,75 Å, 12,26 Å e 3,43 Å. Trata-se de interstratificados com uma certa regularidade mas que ocorrem em

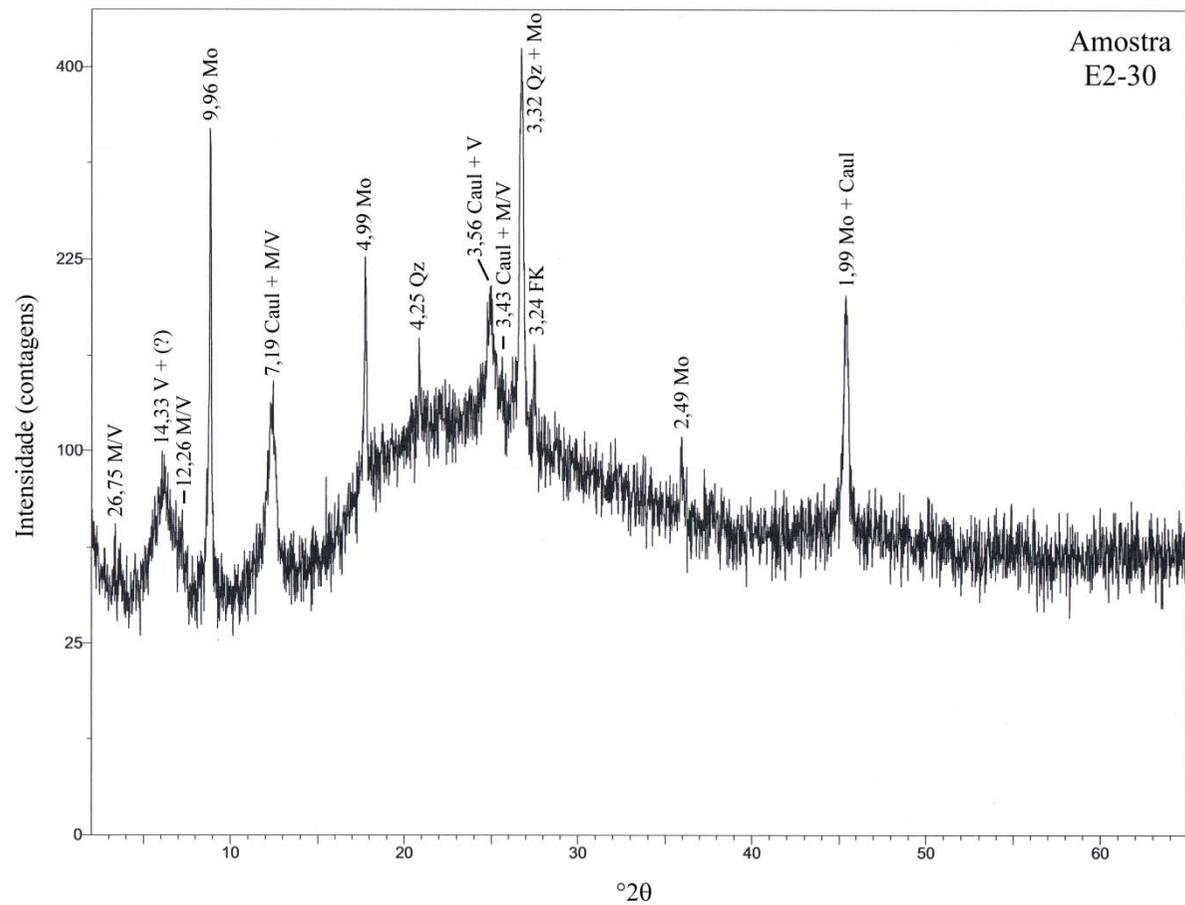


Figura 33 – Padrão de DRX da amostra E2-30 desordenada, mostrando os valores de d (em Å) dos diferentes minerais constituintes. Notar que, associado à presença de vermiculite (V), o ponto de interrogação significa que poderão existir outros minerais argilosos associados. A simbologia pode ser observada na legenda da Tabela 8, à exceção de M/V que corresponde ao interestratificado mica-vermiculite.

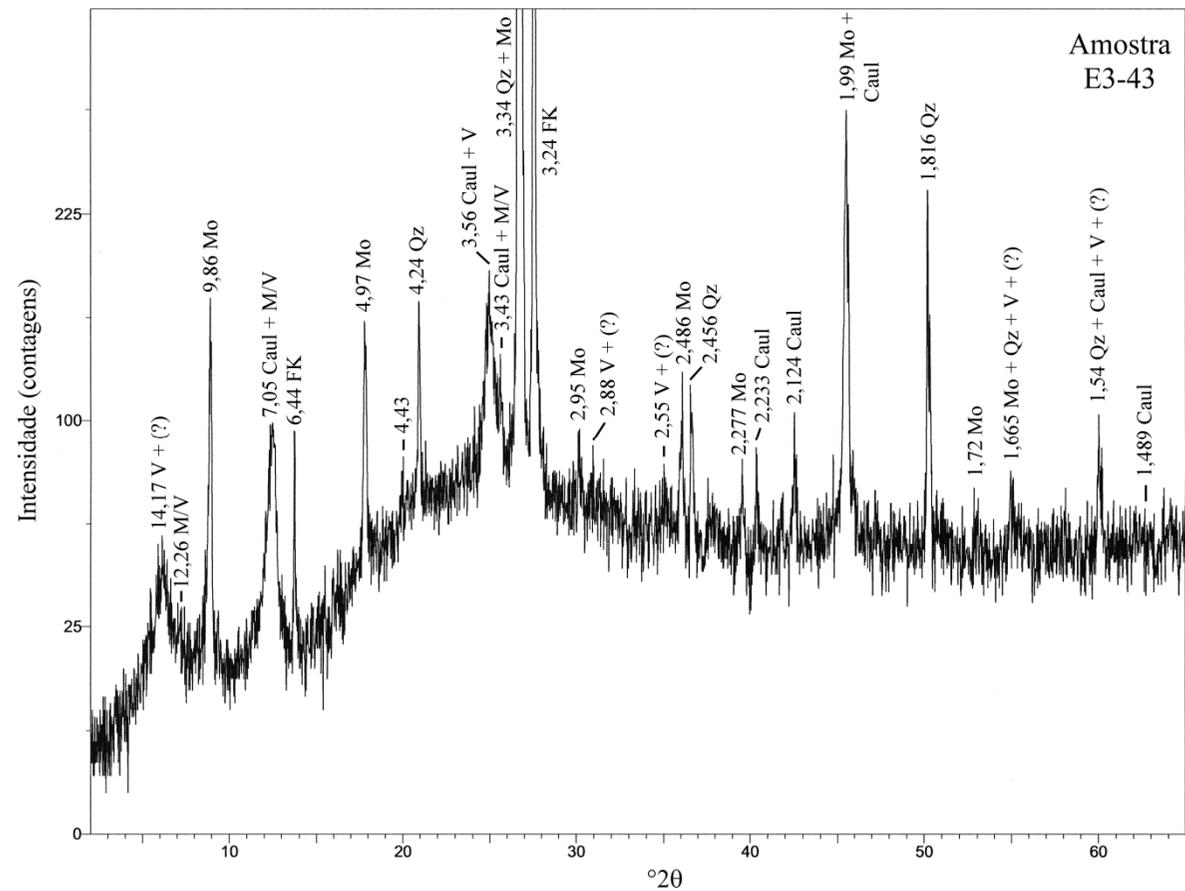


Figura 34 – Padrão de DRX da amostra E3-43 desordenada, mostrando os valores de d (em Å) dos diferentes minerais constituintes. Notar que, associado à presença de vermiculite (V), o ponto de interrogação significa que poderão existir outros minerais argilosos associados. A simbologia pode ser observada na legenda da Tabela 8, à exceção de M/V que corresponde ao interestratificado mica-vermiculite.

muito pequena quantidade e, por essa razão, dificilmente identificáveis. A identificação dos minerais argilosos, não tendo sido feita na fracção $<2 \mu\text{m}$ (orientada), limitou a sua identificação.

Na Figura 34, para além da identificação de quartzo, feldspato potássico e moscovite, com os seus padrões de difracção característicos, observa-se a presença de caulinite a $7,05 \text{ \AA}$ e $3,56 \text{ \AA}$, além de uma série de reflexões características (001 e hkl). Os picos da caulinite são também muito alargados e assimétricos, como observado na Figura 33. As fases vermiculíticas e as dos interestratificados vermiculíticos apresentam os mesmos padrões de difracção que o observado na Figura 33, muito embora nesta amostra pareça tratar-se de um insterestratificado irregular.

6. PLANO DE EXPLORAÇÃO

Como referido no capítulo anterior, a captação PS1 é uma captação eficiente, implantada num aquífero confinado, sem perdas de carga significativas, a funcionar em regime laminar ($n=1$). Assim sendo, na equação geral dos rebaixamentos [10], o termo BQ^n anula-se e o rebaixamento fica a depender unicamente do caudal de extracção (Martinez e Lopez, 1984).

Tratando-se de uma captação em exploração, nomeadamente para engarrafamento de água, é fundamental existir um plano de exploração sustentado que tenha em consideração os aspectos quantitativos e qualitativos da água captada, de tal forma que a contínua extracção de água não altere o regime de funcionamento do aquífero, nem mesmo as suas propriedades, prolongando-se, assim, o tempo de vida da captação e a sustentabilidade do recurso. Neste sentido, no presente capítulo vão ser analisados aspectos importantes mencionados no capítulo anterior e será apresentado um plano que sustente a exploração da captação de água de nascente em estudo, em função dos dados obtidos no decorrer deste trabalho.

De entre as constatações que se fizeram na discussão dos resultados dos ensaios de caudal realizados, destacam-se os efeitos que pequenas alterações no regime de extracção de água (tal como, a simples alteração de depósitos de enchimento) têm sobre os caudais de extracção e, conseqüentemente, sobre os rebaixamentos provocados e, em última análise, sobre a quantidade de sólidos suspensos transportados desde a captação até aos depósitos de enchimento. Para uma melhor compreensão, analisemos os ensaios de caudal realizados em separado: ensaio a caudal constante e ensaio escalonado.

No ensaio a caudal constante verifica-se, numa primeira análise, que os rebaixamentos observados dependem dos caudais de extracção (Figura 19). A fase transitória do ensaio demonstra o arranque progressivo da bomba de extracção, terminando aos 10 min de ensaio, quando a bomba debita o seu valor máximo de caudal ($32,41 \text{ m}^3/\text{h}$). A fase transitória prolonga-se até aos 20 min de ensaio, manifestando-se por uma descida rápida do nível piezométrico (de $-6,25 \text{ m}$ para $-23,50 \text{ m}$). Segue-se uma fase de pseudo-estabilização dos níveis e dos caudais, atingindo-se um rebaixamento máximo de $18,22 \text{ m}$ (aos 210 min) e um caudal médio de $30,08 \text{ m}^3/\text{h}$. Após o encaminhamento da água extraída para enchimento de depósitos, aos 211 min, verifica-

se uma quebra acentuada no caudal de extração e, conseqüentemente, uma subida do nível piezométrico (Figura 19). O caudal de extração passa para 25 m³/h e o rebaixamento para os 17,23 m.

Analisando agora estes dados com a evolução da concentração total dos sólidos suspensos (Figura 28), verifica-se que os picos de concentração total de sólidos suspensos apresentam um atraso relativamente à fase transitória do ensaio (a esta altura do ensaio de caudal, as concentrações totais de sólidos suspensos ainda se encontram por volta dos 0,34 mg/L). Estes picos de concentração de sólidos suspensos ocorrem entre os 20 e os 135 min, altura em que o perfil de rebaixamento se encontra praticamente estabilizado.

Este desfasamento, de aproximadamente 2 h, entre os dois perfis (rebaixamentos e concentrações totais de sólidos suspensos) dever-se-á ao facto da bomba arrancar em modo progressivo e da água demorar alguns minutos até chegar à unidade de engarrafamento de água, local onde foram recolhidas as amostras de água. Além disso, a transmissão da perturbação induzida pela bombagem a zonas mais afastadas da captação não é imediata, o que faz com que alterações provocadas pela bombagem não provoquem arrastamento de materiais do aquífero nos momentos iniciais. Contudo, com o progressivo aumento do caudal (cujo máximo valor atinge os 32,41 m³/h), ocorre um aumento acentuado de sólidos suspensos na água. Este aumento termina aos 64 min de ensaio, com um valor máximo de 7,62 mg/L de sólidos suspensos na água. A esta altura, quer o perfil de rebaixamento, quer o perfil de evolução dos caudais de extração encontram-se praticamente estabilizados (Figuras 28 e 29).

Após este pico máximo de concentração, observa-se um acentuado decréscimo na concentração total de sólidos suspensos até aos 120 min (passando-se de 7,62 mg/L para 1,48 mg/L), seguido de uma pseudo-estabilização, até ao momento em que se procedeu ao encaminhamento da água extraída para enchimento dos depósitos. Após este momento, verifica-se um pequeno decréscimo na concentração total de sólidos suspensos, seguido de uma nova pseudo-estabilização (Figura 28). Nesta fase, é possível evidenciarem-se três patamares distintos, em que alterações nos caudais de extração, resultantes de alterações nas condições de extração (nomeadamente, mudança de depósito de armazenamento), provocam de imediato alterações na concentração de sólidos suspensos na água (Figura 29). Tal como se pode constatar pelo gráfico da Figura 29, um aumento ou diminuição no caudal de extração provoca, de

imediate, aumento ou diminuição da concentração total de sólidos suspensos na água, respectivamente.

Tal como ocorreu no ensaio a caudal constante, no ensaio escalonado verifica-se que os rebaixamentos dependem dos caudais de extracção, apresentando a mesma tendência que estes: inicialmente, uma fase transitória de rápida variação dos valores, seguida de uma fase de pseudo-estabilização (Figura 21). A fase transitória nos três patamares deste ensaio foi idêntica em todos eles, com uma duração média de 18 min, valor muito próximo do encontrado no ensaio a caudal constante (fase transitória de 20 min). Os rebaixamentos máximos de cada patamar e os respectivos caudais de extracção definem uma relação linear (Figura 23).

Comparando a evolução da concentração total de sólidos suspensos na água com os rebaixamentos obtidos ao longo do ensaio escalonado (Figura 32), constata-se que a primeira fase corresponde ao escalão E_1 e a parte do escalão E_2 . Neste último escalão, o pico de concentração total de sólidos suspensos ocorre com um atraso de cerca de 60 a 70 min, comparativamente com a fase transitória do perfil de rebaixamento, como já tinha ocorrido no ensaio a caudal constante. Após este pico, dos 200 aos 240 min de ensaio, os valores de concentração de sólidos suspensos reduzem-se para valores na ordem dos 7,49 mg/L.

No escalão E_3 , como há aumento do caudal de extracção, verifica-se um novo pico de concentração, atingindo os valores mais elevados de todos os escalões. Aqui, manifesta-se também o atraso do pico de concentração de sólidos suspensos, comparativamente com a fase transitória do perfil de rebaixamento. Porém, não é possível de quantificar, na realidade, dado que neste escalão os valores de concentração de sólidos suspensos obtidos estão todos englobados no pico de concentração. Teria de se ter prolongado mais um pouco a duração deste escalão, para se poder visualizar a tendência subsequente. Uma vez que a parte descendente do pico de concentração apresenta um declive muito semelhante ao da parte ascendente, pode-se admitir que, atendendo a que foram necessários 40 min de ensaio para se atingir o pico máximo de concentração de sólidos suspensos (= 52,93 mg/L), serão necessários outros 40 min até os valores da concentração de sólidos suspensos pseudo-estabilizarem. Assim sendo, neste último escalão, o atraso entre o pico de concentração de sólidos suspensos e a fase transitória do perfil de rebaixamento será de 80 min, aproximadamente.

A evolução da concentração total de sólidos suspensos observada no ensaio escalonado foi, assim, ao encontro do ocorrido no ensaio a caudal constante: sempre que há uma variação do caudal, há uma alteração imediata da quantidade de sólidos suspensos na água, no mesmo sentido (Tabela 9). Quanto aos desfasamentos observados entre o pico de concentração de sólidos suspensos e a fase transitória do perfil de rebaixamento observam-se também atrasos relevantes, por volta dos 70 a 120 min.

De acordo com o que foi dito, os principais problemas com que nos deparamos na exploração da captação PS1 são: variações dos caudais de extracção devido a efeitos de pressão causados pela coluna de água dentro dos depósitos; oscilações do nível piezométrico e, conseqüentemente, movimentação de consideráveis quantidades de sólidos suspensos na água, resultantes das variações nos caudais de extracção.

De forma a eliminar os efeitos de pressão sobre a coluna de água bombeada e que afectam o caudal de extracção, propõe-se a colocação de um depósito de recepção de água, na unidade de engarrafamento de água. Este será colocado antes da coluna de filtros, ou seja, receberá a água da tubagem logo que esta chegue à unidade de engarrafamento de água, sendo que a entrada de água deverá ser por cima do depósito, como representado esquematicamente na Figura 35. Desta forma, os efeitos de pressão provocados pela carga de água nos depósitos de enchimento, que actualmente afectam os caudais de extracção, serão eliminados.

A partir do depósito de recepção sairá água para a coluna de filtros e daqui para o enchimento dos depósitos de armazenamento de água.

Em suma, a única alteração estrutural será a da colocação de um depósito de recepção, com entrada da água pela parte superior. Daqui, a água segue o seu percurso normal: coluna de filtros → depósitos de armazenamento de água.

Uma vez eliminados os efeitos de pressão, com a colocação de um depósito de recepção, ficamos com o problema das variações de caudais, por mudanças em depósitos de enchimento, eliminado. Deste modo, restam-nos as oscilações do nível

piezométrico e da quantidade de sólidos suspensos na água com elas relacionados. Para tal, debruçemo-nos sobre os dados apresentados na Tabela 9.

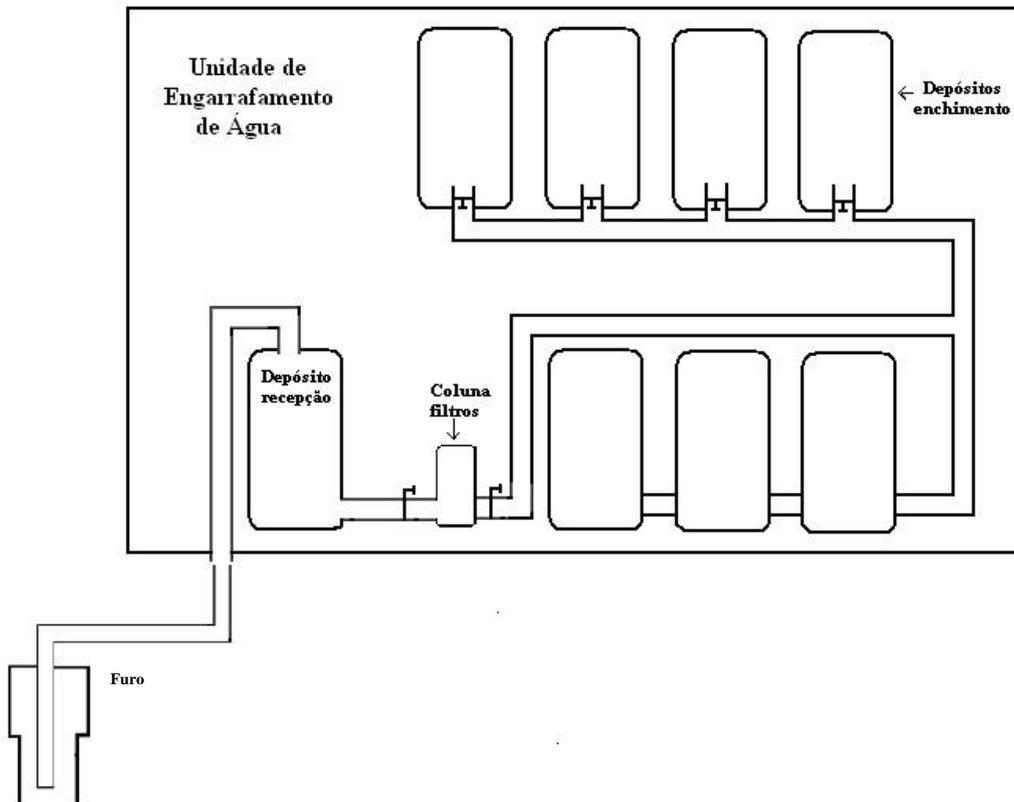


Figura 35 – Esquema representativo da colocação do depósito de recepção de água e seu encaminhamento para coluna de filtros e, posteriormente, para os depósitos de armazenamento.

Nesta tabela são apresentados os valores de caudais de extracção, acompanhados com os respectivos rebaixamentos máximos e as concentrações totais de sólidos suspensos (em mg/L/h, g/m³/h, g/m³/dia, kg/m³/ano e kg/dia). Os valores apresentados para o ensaio a caudal constante foram separados nas duas etapas já consideradas no capítulo anterior (Etapa A - período do ensaio de caudal desde o tempo t_0 até ao momento em que a água extraída passou para enchimento dos depósitos, ou seja, até aos 210 min; Etapa B – período do ensaio de caudal em que a água bombeada esteve a ser encaminhada para o enchimento dos depósitos, isto é, dos 211 min até final do ensaio) e os valores do escalão E₂ estão apresentados quer para o total do escalão, quer para o período sem o pico de concentração de sólidos suspensos na água. No caso dos escalões E₁ e E₃ não se procedeu ao cálculo das concentrações de sólidos suspensos com e sem os picos de concentração, uma vez que, no primeiro caso, não é detectado nenhum pico

relevante e, no segundo caso, não se atingiu a fase de pseudo-estabilização das concentrações de sólidos suspensos (Figura 32).

Tabela 9 – Caudais médios de extracção, respectivos rebaixamentos máximos provocados e concentrações totais de sólidos suspensos.

| | Q (m ³ /h) | s (m) | Concentração Sólidos Suspensos (g/m ³ /h) | Concentração Sólidos Suspensos (g/m ³ /dia) | Concentração Sólidos Suspensos (kg/ m ³ /ano) | Concentração Sólidos Suspensos (kg/dia) |
|---|----------------------------|------------|---|---|---|--|
| E₁ | 21,53 | 16,36 | 2,76 | 66,24 | 24,18 | 1,43 |
| Ensaio a caudal constante (1ª etapa) | 30,08 | 18,22 | 0,74 | 17,76 | 6,48 | 0,53 |
| Ensaio a caudal constante (2ª etapa) | 25,00 | 17,43 | 0,19 | 4,56 | 1,66 | 0,11 |
| E₂ (total) | 33,61 | 24,89 | 3,36 | 80,64 | 29,43 | 2,71 |
| E₂ (sem pico concentração) | 33,61 | 24,89 | 2,59 | 62,16 | 22,69 | 2,09 |
| E₃ | 43,75 | 32,07 | 22,23 | 533,52 | 194,73 | 23,34 |

A última coluna da Tabela 9 corresponde à concentração de sólidos suspensos obtida no final de um dia de extracção, para valores de caudais médios dos patamares apresentados. Assim, a título de exemplo, para um caudal de 21,53 m³/h estima-se que, no final de um dia de extracção (24 h), a concentração de sólidos suspensos arrastados seja de 1,43 kg/dia.

Numa primeira análise aos dados apresentados, verifica-se que a relação entre os caudais e os rebaixamentos se mantém nos dois ensaios de caudal realizados, como se pode constatar no gráfico da Figura 36. De facto, existe uma relação linear entre os caudais de extracção e os rebaixamentos provocados de tal forma que, uma vez dado um valor de caudal, é possível estimar-se o rebaixamento provocado.

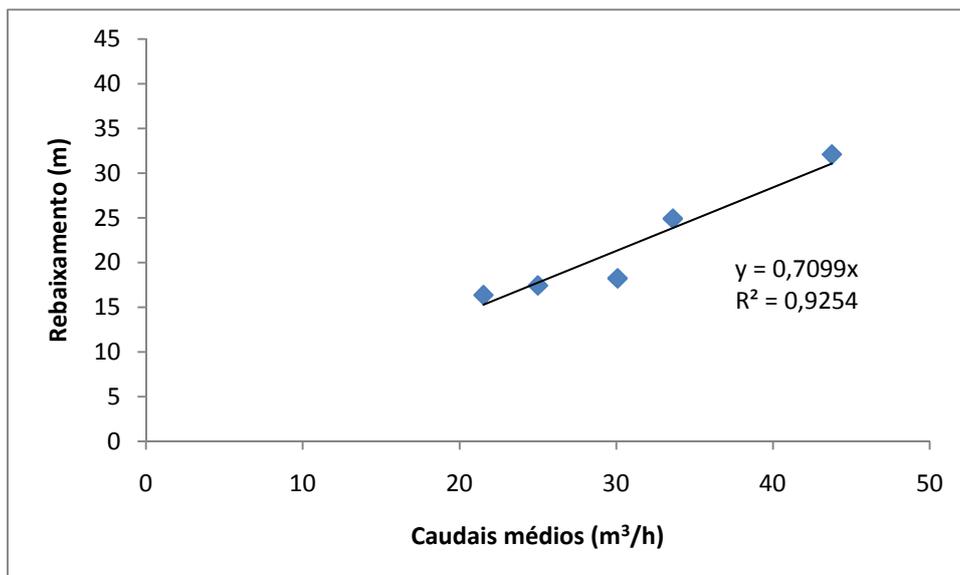


Figura 36 – Evolução dos rebaixamentos em função dos caudais de extracção, nos ensaios de caudal realizados.

Da comparação dos caudais de extracção com as concentrações de sólidos suspensos é possível constatar-se, numa primeira análise, que existe uma relação entre ambos: um aumento nos caudais de extracção provoca aumento acentuado da concentração de sólidos suspensos. Esta relação está representada na Figura 37, onde temos os máximos e mínimos de concentração de sólidos suspensos de cada ensaio de caudal (para a 1ª etapa do ensaio a caudal constante e para os 3 escalões do ensaio escalonado) em função dos caudais médios de extracção. No caso do ensaio a caudal constante foram usados apenas os valores de caudal e concentrações de sólidos suspensos referentes à primeira etapa do ensaio, em que a água extraída não era aproveitada para enchimento dos depósitos, uma vez que foi nesta etapa que se evidenciou o pico de máxima concentração de sólidos suspensos.

No gráfico da Figura 37 pode-se constatar que entre os caudais de extracção e as concentrações máximas de sólidos suspensos existe uma relação exponencial, representada pela equação:

$$Conc.máx = 0,2918 e^{0,1186.Q} \quad [14]$$

Uma vez que para o escalão E₃ não dispomos do valor mínimo de concentração de sólidos suspensos, dado que apenas temos valores referentes ao pico máximo de concentração de sólidos suspensos, o seu valor foi estimado a partir dos valores

mínimos de concentração dos ensaios anteriores. Deste modo, entre concentrações mínimas de sólidos suspensos e os caudais de extracção pode admitir-se que existe uma relação linear, representada pela equação:

$$Conc_{.min} = 0,1322.Q - 1,8854 \quad [15].$$

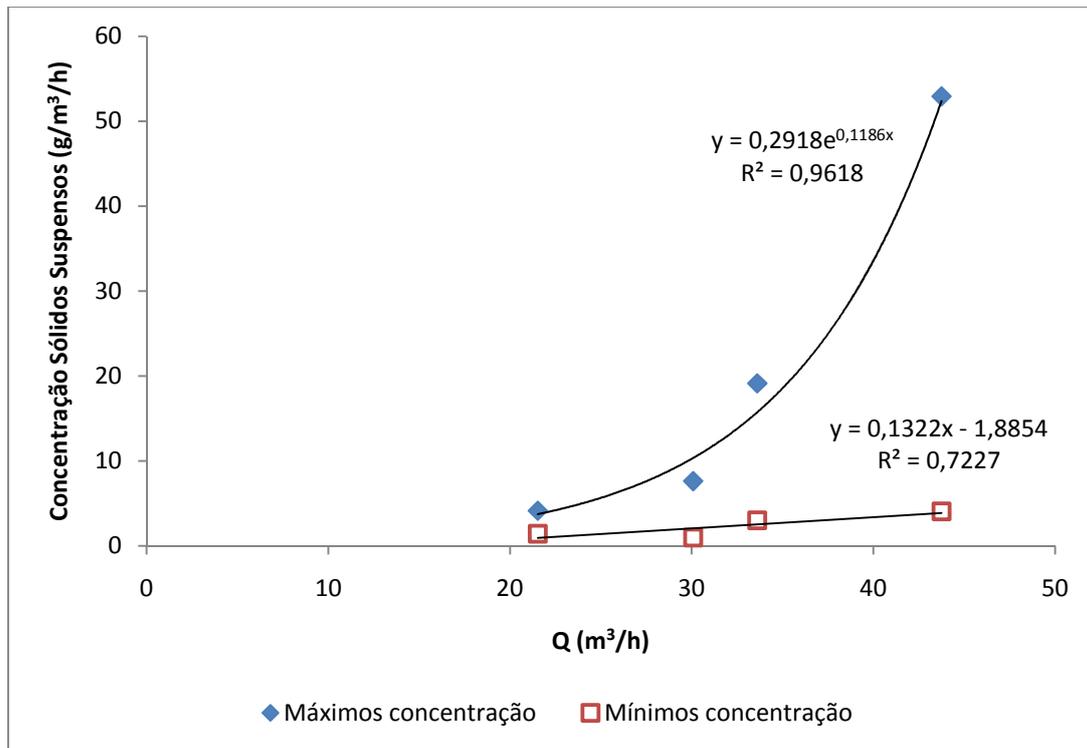


Figura 37 – Máximos e mínimos de concentração de sólidos suspensos em cada escalão do ensaio em função dos caudais médios de extracção.

Como se pode verificar, o aumento do valor da concentração máxima de sólidos suspensos ocorre de modo exponencial, uma vez que os picos de concentração de sólidos suspensos ocorrem nas fases transitórias dos ensaios de caudal. Contrariamente, os valores de concentrações mínimas de sólidos suspensos só ocorrem após os picos de concentração, ou seja, quando o ensaio já se encontra numa fase pseudo-estabilizada. Desta forma, os máximos de concentração aumentam de modo exponencial, enquanto que os mínimos de concentração, apresentam um aumento linear. Este facto pode também ser observado na Figura 32, onde se verifica que os picos de concentração de sólidos suspensos vão sendo cada vez mais acentuados à medida que o rebaixamento é maior (provocado pelo aumento do caudal de extracção).

Assim sendo, um pequeno incremento no caudal de extracção pode provocar um aumento mais ou menos acentuado na quantidade de sólidos suspensos na água, dependente da fase em que se encontra o ensaio de caudal.

Por último, olhando-se para os caudais de extracção e as respectivas concentrações de sólidos suspensos, no final de um dia de extracção contínua é possível verificar-se que, para caudais de extracção na ordem dos 22 m³/h, as concentrações diárias de sólidos suspensos são da ordem de 1,43 kg/dia. Estes valores são relativamente superiores aos encontrados na 2^a etapa do ensaio a caudal constante, em que as condições de extracção e frequência da bomba eram iguais (F=35 Hz). Contudo, no caso do ensaio a caudal constante, quando encaminhamos a água para enchimento dos depósitos, o pico de concentração de sólidos suspensos já tinha passado, na etapa anterior (1^a etapa). Além disso, no escalão E₁ não se evidenciou nenhum pico de concentração de sólidos suspensos relevante, não tendo sido possível efectuar os cálculos da concentração média de sólidos suspensos sem contabilizar o respectivo pico de concentração. Assim sendo, vamos admitir que para caudais de extracção na ordem dos 25 m³/dia, a concentração diária de sólidos suspensos será da ordem dos 0,11 kg/dia.

Apesar de tudo, as concentrações diárias de sólidos suspensos para os caudais referidos são bastante inferiores aos valores obtidos para caudais de extracção relativamente superiores (+10 m³/h). Aqui, para um caudal de extracção de 33,61 m³/h, verifica-se que a água extraída perde qualidade, na medida em que arrasta elevadas quantidades de sólidos suspensos, com valores de concentração diária de sólidos suspensos de 2,71 kg/dia, caso a extracção se inicie a este caudal no tempo $t=0$ e a água bombeada seja de imediato encaminhada para o enchimento dos depósitos. Porém, como referido anteriormente, há um atraso do pico de concentração de sólidos suspensos em relação ao perfil de rebaixamento. Assim, caso se elimine este pico, os valores de concentração diária de sólidos suspensos baixa um pouco (2,09 kg/dia).

Para caudais superiores ao considerado, nomeadamente $Q=43,75$ m³/h, a concentração diária de sólidos suspensos sofre um aumento de cerca de 10 vezes, indo ao encontro ao que foi referido anteriormente: a concentração de sólidos suspensos aumenta acentuadamente em relação ao aumento dos valores de caudais de extracção (Figura 37).

De acordo com o referido anteriormente, para a extracção de água sem grandes perdas de qualidade da mesma, isto é, sem arrastamento de consideráveis quantidades de sólidos suspensos, aconselha-se que os caudais de extracção sejam por volta dos 25 m³/dia, para que a quantidade diária de sólidos suspensos seja baixa, isto é, a água bombeada seja de maior qualidade. Assim, para este valor de caudal de extracção teríamos concentrações diárias de sólidos suspensos na ordem dos 0,11 kg/dia, com a bomba a funcionar à frequência de 35 Hz.

No caso das necessidades da unidade de engarrafamento obrigarem a um incremento do caudal de extracção, este não deverá exceder os 35 m³/h, uma vez que a concentração diária de sólidos suspensos aumenta consideravelmente, para valores na ordem dos 2 a 3 kg/dia.

Em todas as situações, recomenda-se que, uma vez iniciada a bombagem de água, devido a paragens propositadas ou não da bomba de extracção, se aguarde entre 70 e 120 min sem aproveitamento de água para enchimento dos depósitos. Posteriormente, pode-se encaminhar a água para enchimento dos depósitos, dado que já se ultrapassou, certamente, o pico máximo de concentração de sólidos suspensos.

Em suma e de acordo com tudo o que foi referido anteriormente, um plano que sustente a exploração da captação de água de nascente em estudo (captação PS1), tendo em consideração os aspectos quantitativos e qualitativos da água captada, de tal forma que a contínua extracção de água não altere o regime de funcionamento do aquífero, deverá ter em atenção os seguintes pontos:

- ✓ Os rebaixamentos do nível piezométrico são proporcionais aos caudais de extracção, apresentando uma relação linear entre ambos de tal forma que, uma vez dado um valor de caudal, é possível estimar-se o rebaixamento provocado (Figura 36);
- ✓ Existem variações dos caudais de extracção devido a efeitos de pressão causados pela coluna de água dentro dos depósitos. Estas variações provocam oscilações do nível piezométrico e, conseqüentemente, movimentação de consideráveis quantidades de sólidos suspensos na água;

- ✓ Sempre que há uma variação do caudal, há uma alteração imediata da quantidade de sólidos suspensos na água no mesmo sentido;
- ✓ Entre os caudais de extracção e as concentrações de sólidos suspensos existe uma relação exponencial, de tal forma a que um pequeno incremento no caudal de extracção pode provocar um aumento acentuado na quantidade de sólidos suspensos transportados na água (Figura 37).

Apresentando os caudais de extracção relações bem definida quer com os rebaixamentos do nível piezométrico, quer com as concentrações de sólidos suspensos arrastados na água bombeada, é de enorme importância o controlo das suas variações. Na maioria das vezes, as variações do caudal são devidas à simples mudança de depósito de enchimento. Esta aparente simples mudança leva a que a pressão anteriormente exercida sobre a coluna de água bombeada seja alterada, uma vez que quanto maior o volume de água dentro do depósito de armazenamento, maior será a pressão que esta coluna de água exercerá sobre a coluna de água bombeada (que chega ao depósito através da tubagem, entrando por baixo dele). Logo, aumentando a pressão da coluna de água dentro do depósito, diminui o caudal de extracção, ou vice-versa.

Assim sendo, de forma a eliminar estes efeitos de pressão sobre a coluna de água bombeada, que afectam o caudal de extracção, propõe-se a colocação de um depósito de recepção de água, na unidade de engarrafamento de água (Figura 35).

Para a extracção de água sem grandes perdas de qualidade da mesma, isto é, sem arrastamento de consideráveis quantidades de sólidos suspensos, aconselha-se que os caudais de extracção sejam por volta dos 25 m³/h, para que a quantidade diária de sólidos suspensos seja baixa e, conseqüentemente, a água bombeada seja de elevada qualidade. Para este valor de caudal de extracção estimam-se concentrações diárias de sólidos suspensos por volta do 0,11 kg/dia.

Recomenda-se ainda que, uma vez iniciada a bombagem de água devido a paragens propositadas ou não da bomba de extracção, se aguarde entre 70 e 120 min sem aproveitamento de água para enchimento dos depósitos.

Por último, aconselha-se a realização de um novo ensaio de caudal após a aplicação das medidas/recomendações anteriores, de forma a se ter conhecimento das melhorias (ou não) na exploração da captação PS1.

7. Conclusões e Recomendações

O presente trabalho de investigação teve como objectivo fundamental a elaboração de um plano de exploração, para a captação PS1, tendo em consideração os aspectos quantitativos e qualitativos da água captada, de tal forma que a extracção de água não altere o regime de funcionamento do aquífero, nem mesmo as suas propriedades, prolongando-se, assim, o tempo de vida da captação e a sustentabilidade do recurso.

Neste sentido, foram definidos alguns objectivos operacionais que levaram à aplicação de procedimentos distintos, entre eles, a realização de ensaios de caudal (a caudal constante e ensaio escalonado) e análises de difracção de raios X.

A caracterização mineralógica dos materiais retidos nos filtros consistiu em análises por DRX dos sólidos suspensos retidos nas membranas filtrantes, sendo que as estimativas da composição mineralógica foram efectuadas a partir de picos diagnósticos para as diferentes fases mineralógicas identificadas.

De um modo geral, as fases mineralógicas identificadas por DRX dos sólidos suspensos retidos nas membranas filtrantes englobam quartzo, feldspato potássico, plagioclase, moscovite e, em menor quantidade, minerais argilosos 2:1 (por ex: vermiculite, esmectite, interestratificados vermiculíticos) e 1:1 (caulinite), assim como, alguma goethite, entre os óxidos de ferro.

Da interpretação dos dados obtidos nos ensaios de caudal, constatou-se que a captação PS1 é uma captação eficiente, implantada num aquífero semi-confinado, sem perdas de carga significativas, a funcionar em regime laminar ($n=1$). Assim sendo, na equação geral dos rebaixamentos, o termo BQ^n anula-se e o rebaixamento fica a depender unicamente do caudal de extracção. Entre os caudais de extracção e os rebaixamentos provocados existe, portanto, uma relação linear.

Da aplicação do método de Hantush aos dados de campo, no programa AquiferTest, o melhor ajuste da curva de campo obtido, produziu um valor de transmissividade de $4,12 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{min}$, ou seja, $5,9 \text{ m}^2/\text{dia}$, um valor muito inferior aos encontrados noutros locais das mesmas formações geológicas.

Investigaram-se os efeitos que pequenas alterações no regime de extracção de água (tal como, a simples alteração de depósito de armazenamento de água) têm sobre os caudais de extracção e, conseqüentemente, sobre os rebaixamentos provocados e, em

última análise, sobre a quantidade de sólidos suspensos transportados desde a captação até aos depósitos.

Da comparação dos perfis de rebaixamento com os perfis da evolução da concentração de sólidos suspensos, verifica-se que existe um desfasamento, de aproximadamente 2 horas, entre ambos. Este, dever-se-á ao facto da bomba arrancar em modo progressivo e da água demorar alguns minutos até chegar à unidade de engarrafamento de água, local onde foram recolhidas as amostras de água. Além disso, a transmissão da perturbação induzida pela bombagem a zonas mais afastadas da captação não é imediata, o que faz com que alterações provocadas pela bombagem não provoquem arrastamento de materiais do aquífero nos momentos iniciais.

Entre os caudais de extracção e a concentração de sólidos suspensos constatou-se a existência de uma relação exponencial. Deste modo, um pequeno incremento no caudal de extracção pode provocar um aumento acentuado na quantidade de sólidos suspensos na água.

Apresentando os caudais de extracção relações bem definidas, quer com os rebaixamentos do nível piezométrico, quer com as concentrações de sólidos suspensos arrastados na água bombeada, é de enorme importância o controlo das suas variações. Uma vez que estas variações nos caudais de extracção se devem a efeitos de pressão causados pela coluna de água dentro dos depósitos, propõe-se a colocação de um depósito de recepção de água, na unidade de engarrafamento de água, com entrada da água pela parte superior.

Para a extracção de água sem grandes perdas de qualidade da mesma, isto é, sem arrastamento de consideráveis quantidades de sólidos suspensos, aconselha-se que os caudais de extracção sejam por volta dos 25 m³/h, para que a quantidade diária de sólidos suspensos seja baixa, isto é, a água bombeada seja de maior qualidade. Para este valor de caudal de extracção estimam-se concentrações diárias de sólidos suspensos por volta dos 0,11 kg/dia.

No caso das necessidades da unidade de engarrafamento obrigarem a um incremento do caudal de extracção, este não deverá exceder os 35 m³/h, uma vez que a concentração diária de sólidos suspensos aumenta consideravelmente, para valores na ordem dos 2 kg/dia a 3 kg/dia.

Em todas as situações, recomenda-se que, uma vez iniciada a bombagem de água, devido a paragens propositadas ou não da bomba de extracção, se aguarde entre 70 minutos e 120 minutos sem aproveitamento de água para enchimento dos depósitos.

Por último, aconselha-se a realização de um novo ensaio de caudal após a aplicação das medidas/recomendações anteriores, de forma a avaliar a eficiência dessas medidas.

BIBLIOGRAFIA

Almeida, C.; Mendonça, J. J. L.; Jesus, M. R. e Gomes, A. G. (2000a) – *Sistemas Aquíferos de Portugal Continental. Bacia do Tejo-Sado (T)*. Centro de Geologia da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Instituto da Água, Lisboa. 600-601 p.

Almeida, C.; Mendonça, J. J. L.; Jesus, M. R. e Gomes, A. G. (2000b) – *Sistemas Aquíferos de Portugal Continental. Sistema Aquífero Margem Esquerda (T3)*. Centro de Geologia da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Instituto da Água, Lisboa. 615-640 p.

Brindley, G. W. e Brown, G. (1980) – *Crystal Structures of Clay Minerals and Their X-Ray Identification*. Monograph no. 5, Mineralogical Society, London. 495 p.

Custodio, E. e Llamas, M. R. (1983) – *Hidrología Subterránea*. 2ª ed., Ed. Omega, 2 vols., Barcelona. 2359p.

Decreto-Lei nº 156/98 de 6 de Junho. *Diário da República nº 131/98 – I Série A*. Ministério da Agricultura, do Desenvolvimento Rural e das Pescas.

Decreto-Lei nº 306/2007 de 27 de Agosto. *Diário da República nº 164/2007 – I Série*. Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional.

Decreto-Lei nº 84/90 de 16 de Março. *Diário da República nº 63/90 – I Série*. Ministério da Indústria e Energia.

De Zuane, J. (1997) – *Handbook of Drinking Water Quality*. 2nd Ed., Van Nostrand Reinhold, New York. 575 p.

Durfor, C. N.; Becker, E. (1962) – *Public Water Supplies of the 100 Largest Cities in the United States*. U. S. Geological Survey Water-Supply Paper 1812. 364 p.

Gomes, C. F. (1988) – *Argilas. O que são e para que servem*. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa. 457 p.

- Gonçalves, F.; Zbyszewski, G.; Caravanhosa, A. e Coelho, A. P. (1979) – *Carta Geológica de Portugal, Escala 1/50 000. Notícia Explicativa da Folha 27-D*. Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa. 75 p.
- Graça, H. (2002) - *Controlo de Qualidade e Monitorização de Captações de Água Mineral ou de Nascente*. Prospeção, Pesquisa e Captação de Águas Minerais Naturais, Recursos Geotérmicos e Águas de Nascente. IGM.
- Hem, J. D. (1985) – *Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water*. 3rd ed., U. S. Geological Survey Water-Supply Paper 2254. 263 p.
- Kruseman, G. P. e Ridder, N. A. (1994) – *Analysis and Evaluation of Pumping Test Data*. 2nd ed., ILRI Publication 47, Netherlands. 377 p.
- Lima, A. (2008) – *Estudo Hidrogeológico da Área de Implantação da Captação PSI (Ulme-Chamusca)*. Braga. 36 p.
- Martinez, M. V. e Lopez, A. I. (1984) – *Pozos y Acuíferos. Tecnicas de Evaluacion Mediante Ensayos de Bombeo*. Instituto Geologico y Minero de Espanã. Talleres Gráficos IBERGESA, Madrid. 426 p.
- Moore, D. M. e Reynolds, R. C. (1997) – *X-Ray Diffraction and The Identification and Analysis of Clay Minerals*. Second Edition, Oxford University Press, New York. 378 p.
- PERSONDA (2001) – *Relatório final. Câmara Municipal da Chamusca. Ulme. PS-1*. Montijo. 13 p.
- Reimann, C.; Caritat, P. (1998) – *Chemical Elements in the Environment. Factsheets for the Geochemist and Environmental Scientist*. Springer, Berlin. 398 p.
- Ribeiro, A.; Antunes, M. T.; Ferreira, M. P.; Rocha, R. B.; Soares, A. F.; Zbyszewski, G.; Almeida, F.; Carvalho, D. e Monteiro, J. H. (1979) – *Introduction à la Géologie du Portugal*. Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa. 113 p.
- Rubio, J. M. e Magán, P. R. (1998) – *Aguas Subterráneas. Captación y Aprovechamiento*. PROGENSE, Sevilla. 404 p.
- Velho, J.; Gomes, C. e Romariz, C. (1998) – *Minerais Industriais. Geologia, Propriedades, Tratamento, Aplicações, Especificações, Produções e Mercados*. 591 p.

Zbyszewski, G. e Ferreira, O. V. (1979) - *Carta Geológica de Portugal, Escala 1/50 000. Notícia Explicativa da Folha 31-B*. Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa. 27 p.