

# **MODELAÇÃO HIDRÁULICA DO COMPORTAMENTO DE UMA FUGA DE ÁGUA**

**MECANISMOS PARA A SUA DETECÇÃO NO CASO DE UMA  
CONDUTA ELEVATÓRIA**

**JOÃO PEDRO SANTOS COSTA TENTÚGAL VALENTE**

Relatório de Projecto submetido para satisfação parcial dos requisitos do grau de  
**MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM HIDRÁULICA**

---

Orientador: Professor Doutor Manuel Maria Pacheco Figueiredo

JULHO DE 2008

## **MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2007/2008**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ [miec@fe.up.pt](mailto:miec@fe.up.pt)

*Editado por*

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ [feup@fe.up.pt](mailto:feup@fe.up.pt)

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2007/2008 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2008*.

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

Este documento foi produzido a partir de versão electrónica fornecida pelo respectivo Autor.





## **AGRADECIMENTOS**

Ao meu orientador, o Professor Doutor Manuel Maria Pacheco Figueiredo, pelas horas de trabalho dispendidas e pelo apoio que me deu na realização deste Projecto, pelo muito que me ensinou e ajudou, quer no esclarecimento de dúvidas, quer na disponibilização de documentos e nos avanços que este estudo foi sofrendo ao longo de todo o ano lectivo.

À Águas do Minho e Lima, S.A., nas pessoas dos seus colaboradores Eng.º José Carreiras, Eng.º Ulisses Biscaia, Eng.º Pedro Cruz, Sr. João Pereira e Sr. Carlos Oliveira, que sempre mostraram toda a disponibilidade para executar as diversas tarefas necessárias para a elaboração da componente prática do presente estudo e que me forneceram todos os elementos indispensáveis para a realização do mesmo.

Aos meus Colegas e Amigos, que ao longo deste ano contribuíram para que este trabalho fosse possível, com discussões construtivas permitindo que, no final, pudesse ser um projecto ainda melhor.

Finalmente aos meus Pais, pela perseverança no meu sucesso e pela ajuda na parte final, sempre disponíveis para qualquer explicação, pela ajuda e pela motivação na elaboração do mesmo, pelo seu envolvimento na sua execução e pela preocupação num trabalho final com qualidade.



## **RESUMO**

O presente Projecto constitui um estudo para localização da secção de uma conduta elevatória – integrada num Sistema Adutor Elevatório de Abastecimento de Água – em que ocorra uma fuga de água, aproveitando o efeito produzido pela ocorrência do fenómeno de Choque Hidráulico.

Para o estudo do comportamento da fuga e da sua influência no normal funcionamento do sistema elevatório, foi elaborado um modelo matemático baseado num algoritmo que, suportado na análise do fenómeno do Choque Hidráulico em Sistemas Adutores Elevatórios de Abastecimento de Água e na sua interpretação pelo Método das Características, permitisse estudar a resposta do sistema e ainda proceder à localização, mesmo que aproximada, de uma fuga de água.

O algoritmo foi desenvolvido com o apoio do software Matlab® e pretendeu-se que fosse de fácil percepção e execução e, ainda, aplicável a qualquer sistema elevatório que se pretenda analisar (com ou sem fuga de água).

Para se aferir da capacidade do modelo matemático desenvolvido, o trabalho foi complementado com a sua aplicação a um caso real. O modelo foi assim experimentado e calibrado, estudando o Sistema Elevatório de Vilar de Mouros, em Caminha. Para este caso, depois de calibrado o algoritmo definidor do sistema e do fenómeno de Choque Hidráulico inerente à paragem dos grupos elevatórios, foi simulada a ocorrência de uma fuga de água numa determinada secção da conduta.

A partir do modelo desenvolvido foi ainda possível proceder a tentativas de localização de fuga por métodos analíticos, ou seja, sem recurso a pesquisas locais com vista à detecção e localização da mesma.

**PALAVRAS-CHAVE:** Sistema Adutor Elevatório de Abastecimento de Água, Pressão, Perda de Água, Fuga de Água, Choque Hidráulico, Método das Características



## **ABSTRACT**

This project constitutes a study about the possibility of the leak's section location in one pumping line — this pumping line is inserted in a Water Supply System where it was tried to profit by the Water Hammer phenomenon to detect the leak's section.

To study the leak's behavior and its influence on the normal performance of the pumping system, it was developed an algorithm — based in Water Hammer phenomenon analysis and in the Method of Characteristics, for Water Pumping Systems — which purposes are: i) to study the system response in case of leak occurrence; ii) to detect its location, as precise as possible. The final aim of this procedure is to minimize the water losses in overall system.

The referred algorithm was developed in Matlab® software, having in mind the intention of an easy perception and execution, besides its applicability to any pumping system under study (with or without a water leak).

To gauge the capacity of the developed mathematical model, this work also includes the study of its application to a real case. The experimental and gauging test took place in Caminha, in Vilar de Mouros Pumping System. In this case, after gauging the adjustable algorithm for the referred phenomenon, caused by the operation stopping of the pumps, the occurrence of a water leak was simulated in a certain pipe section.

Based on the developed algorithm, it was possible to proceed with several trials of leak location, only by analytical methods, i.e., without needing local research to detect and locate the water leak.

**KEYWORDS:** Pumping System, Pressure, Water Loss, Water Leak, Water Hammer, ethod of Characteristics.



## ÍNDICE GERAL

|                                                                                                      |           |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| AGRADECIMENTOS .....                                                                                 | i         |
| RESUMO .....                                                                                         | iii       |
| ABSTRACT .....                                                                                       | v         |
| <br>                                                                                                 |           |
| <b>1. INTRODUÇÃO .....</b>                                                                           | <b>1</b>  |
| 1.1. ENQUADRAMENTO E JUSTIFICAÇÃO .....                                                              | 1         |
| 1.2. OBJECTIVOS DO PROJECTO .....                                                                    | 5         |
| 1.3. ORGANIZAÇÃO DO ESTUDO .....                                                                     | 5         |
| <br>                                                                                                 |           |
| <b>2. ELEMENTOS TEÓRICOS .....</b>                                                                   | <b>7</b>  |
| 2.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS .....                                                                      | 7         |
| 2.2. ESCOAMENTOS SOB PRESSÃO .....                                                                   | 7         |
| 2.2.1. TEOREMA DE BERNOULLI .....                                                                    | 8         |
| 2.2.2.1. Quantificação das Perdas de Carga Contínuas .....                                           | 11        |
| 2.2.2.2. Perdas de Carga Localizadas .....                                                           | 14        |
| 2.2.2.3. Energia Fornecida pelo Exterior .....                                                       | 15        |
| 2.3. SISTEMAS ELEVATÓRIOS .....                                                                      | 16        |
| 2.3.1. TIPOS DE ESTAÇÕES ELEVATÓRIAS .....                                                           | 17        |
| 2.3.2. CONSTITUIÇÃO .....                                                                            | 18        |
| 2.3.3. CONCEPÇÃO E CRITÉRIOS DE DIMENSIONAMENTO .....                                                | 18        |
| 2.4. REGIMES TRANSITÓRIOS — CHOQUE HIDRÁULICO .....                                                  | 19        |
| 2.4.1. MÉTODO DAS CARACTERÍSTICAS .....                                                              | 21        |
| 2.4.2. DISPOSITIVOS DE PROTECÇÃO AO CHOQUE HIDRÁULICO .....                                          | 23        |
| 2.4.2.1. Tipos de Dispositivo de Protecção ao Choque Hidráulico .....                                | 24        |
| 2.5. EXPRESSÃO DEFINIDORA DO CAUDAL DE FUGA .....                                                    | 29        |
| <br>                                                                                                 |           |
| <b>3. DETECÇÃO DE FUGAS. ESTÁDIO ACTUAL .....</b>                                                    | <b>31</b> |
| 3.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS .....                                                                      | 31        |
| 3.2. TÉCNICAS ACTUAIS DE DETECÇÃO DE LOCALIZAÇÃO DE FUGAS EM SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA ..... | 33        |
| 3.3. MEDIDAS PREVENTIVAS .....                                                                       | 34        |

|                                                                           |           |
|---------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>4. ALGORITMO DESENVOLVIDO .....</b>                                    | <b>37</b> |
| <b>4.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS.....</b>                                     | <b>37</b> |
| <b>4.2. DESCRIÇÃO DO MODELO .....</b>                                     | <b>38</b> |
| <br>                                                                      |           |
| <b>5. APLICAÇÃO PRÁTICA À CONDUTA ELEVATÓRIA DE VILAR DE MOUROS .....</b> | <b>43</b> |
| <b>5.1. DESCRIÇÃO SUCINTA .....</b>                                       | <b>43</b> |
| <b>5.2. SISTEMA ELEVATÓRIO DE VILAR DE MOUROS .....</b>                   | <b>45</b> |
| 5.2.1. RESERVATÓRIO DE MONTANTE .....                                     | 45        |
| 5.2.2. ESTAÇÃO ELEVATÓRIA DE VILAR DE MOUROS.....                         | 46        |
| 5.2.3. CONDUTA ELEVATÓRIA DE VILAR DE MOUROS .....                        | 49        |
| 5.2.4. RESERVATÓRIO DE VILAR DE MOUROS .....                              | 52        |
| <b>5.3. EXPERIÊNCIAS REALIZADAS.....</b>                                  | <b>52</b> |
| 5.3.1. RESULTADOS DAS EXPERIÊNCIAS REALIZADAS SEM FUGA.....               | 56        |
| 5.3.2. RESULTADOS DAS EXPERIÊNCIAS REALIZADAS COM FUGA .....              | 61        |
| 5.3.2.1. LOCALIZAÇÃO DA FUGA DE ÁGUA.....                                 | 63        |
| <br>                                                                      |           |
| <b>6. CONCLUSÕES.....</b>                                                 | <b>67</b> |

## **BIBLIOGRAFIA**

## **ANEXOS**

**ANEXO 1**

**ANEXO 2**

**ANEXO 3**

**ANEXO 4**

## ÍNDICE DE FIGURAS

|                                                                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1.1 – Ciclo de Utilização da Água .....                                                                                    | 2  |
| Figura 1.2 – Esquema exemplificativo de um Sistema Adutor Gravítico .....                                                         | 2  |
| Figura 1.3 – Esquema exemplificativo de um Sistema Adutor Elevatório .....                                                        | 3  |
| Figura 2.1 – Linha Piezométrica e Linha de Energia ou de Carga .....                                                              | 9  |
| Figura 2.2 – Definição esquemáticas das variáveis intervenientes no Teorema de Bernoulli – expressão global .....                 | 10 |
| Figura 2.3 – Relação entre Perdas de Carga e Forças de Resistência .....                                                          | 11 |
| Figura 2.4 – Perdas de Carga Localizadas .....                                                                                    | 15 |
| Figura 2.5 – Perfil Longitudinal Esquemático de uma Conduta Elevatória.....                                                       | 16 |
| Figura 2.6 – Estação Elevatória de Abastecimento de Água – Exemplo .....                                                          | 18 |
| Figura 2.7 – Esquema representativo do significado das expressões do Método das Características .....                             | 22 |
| Figura 2.8 – Volante de Inércia – esquema .....                                                                                   | 25 |
| Figura 2.9 – Volante de Inércia (instalação em turbina) .....                                                                     | 25 |
| Figura 2.10 – Reservatórios de Ar Comprimido.....                                                                                 | 26 |
| Figura 2.11 – Chaminé de equilíbrio em construção .....                                                                           | 27 |
| Figura 3.1 – Esquema representativo da Gestão de Fugas em Sistemas de Abastecimento de Água.....                                  | 32 |
| Figura 3.2 – Ferramentas para Detecção de fugas por meio de sistema vídeo – Posto Móvel e Robot de Inspeção Vídeo (Exemplo) ..... | 34 |
| Figura 4.1 – Ficheiro de Dados a fornecer - Exemplo .....                                                                         | 40 |
| Figura 5.1 – Localização do Sistema Elevatório de Vilar de Mouros.....                                                            | 44 |
| Figura 5.2 – Localização da EE de Cavada.....                                                                                     | 45 |
| Figura 5.3 – Reservatório de Montante – Vista Exterior .....                                                                      | 46 |
| Figura 5.4 – Estação Elevatória de Vilar de Mouros.....                                                                           | 47 |
| Figura 5.5 – Curva Característica de cada um dos Grupos Elevatórios.....                                                          | 48 |
| Figura 5.6 – Imagem Exemplificativa do SCADA.....                                                                                 | 49 |
| Figura 5.7 – Medidor de Caudal na Conduta Elevatória.....                                                                         | 50 |
| Figura 5.8 – Leitor do Medidor de Caudal.....                                                                                     | 51 |
| Figura 5.9 – Reservatório de Ar Comprimido.....                                                                                   | 51 |
| Figura 5.10 – Reservatório de Vilar de Mouros .....                                                                               | 52 |
| Figura 5.11 a) – Localização Esquemática das Secções de Medição (vista geral).....                                                | 53 |
| Figura 5.11 b) – Localização Esquemática das Secções de Medição (vista pormenor da Estação Elevatória) .....                      | 54 |

|                                                                                                                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 5.12 – Transdutores de Pressão. Caso da Secção 2 – Pressão na Conduta de Compressão.                                                                                            | 54 |
| Figura 5.13 – Registadores Utilizados. Caso da Secção 2 – Registo da Pressão na Conduta de Compressão .....                                                                            | 55 |
| Figura 5.14 – Evolução de Pressões registadas ao longo de todo o ensaio .....                                                                                                          | 55 |
| Figura 5.15 – Evolução do Caudal Bombeado após a paragem do Grupo Elevatório .....                                                                                                     | 56 |
| Figura 5.16 – Evolução do Caudal Bombeado após a paragem de dois Grupos Elevatórios .....                                                                                              | 57 |
| Figura 5.17 - Evolução de Pressões Medidas (a azul) e Calculadas pelo Modelo (a vermelho) - Secções 2 e 3 – após paragem de um grupo elevatório.....                                   | 58 |
| Figura 5.18 - Evolução de Pressões Medidas (a azul) e Calculadas pelo Modelo (a vermelho) – Secção 5 – após paragem de um grupo elevatório.....                                        | 58 |
| Figura 5.19 - Evolução de Pressões Medidas (a azul) e Calculadas pelo Modelo (a vermelho) – Secção 2 e 3 – após paragem de dois grupos elevatórios .....                               | 59 |
| Figura 5.20 - Evolução de Pressões Medidas (a azul) e Calculadas pelo Modelo (a vermelho) – Secção 4 – após paragem de dois grupos elevatórios .....                                   | 59 |
| Figura 5.21 - Evolução de Pressões Medidas (a azul) e Calculadas pelo Modelo (a vermelho) – Secção 5 – após paragem de dois grupos elevatórios .....                                   | 60 |
| Figura 5.22 – Evolução de Pressões nas diferentes situações de fuga – paragem de um grupo elevatório .....                                                                             | 61 |
| Figura 5.23 – Evolução de Pressões nas diferentes situações de fuga – paragem de dois grupos elevatórios .....                                                                         | 62 |
| Figura 5.24 – Evolução de Pressões Medidas (a azul) e Calculadas pelo Modelo Matemático (a vermelho) – Secção 2 e 3 – após paragem de um grupo elevatório, com simulação de fuga ..... | 63 |
| Figura 5.25 – Evolução de Pressões Medidas (a azul) e Calculadas pelo Modelo Matemático (a vermelho) – Secção 5 – após paragem de um grupo elevatório, com simulação de fuga .....     | 63 |
| Figura 5.26 a) – Gráfico Densidade Espectral/Frequência para a situação de Fuga de Água após paragem de um Grupo Elevatório .....                                                      | 65 |
| Figura 5.26 b) – Gráfico Densidade Espectral/Frequência para a situação de Fuga de Água após paragem de um Grupo Elevatório – escala logarítmica .....                                 | 65 |

## **ÍNDICE DE QUADROS (OU TABELAS)**

|                                                                                                             |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Quadro 1 – Componentes do Balanço Hídrico .....                                                             | 4  |
| Quadro 2.1 – Tipos de Estações Elevatórias.....                                                             | 17 |
| Quadro 5.1 – Características Técnicas dos Grupos Electrobomba da Estação Elevatória de Vilar de Mouros..... | 48 |
| Quadro 5.2 – Características Técnicas da Conduta Elevatória de Vilar de Mouros.....                         | 49 |
| Quadro 5.3 – Localização das Secções de Medição e de Simulação de Fuga.....                                 | 53 |

## SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

|                 |                                                                           |
|-----------------|---------------------------------------------------------------------------|
| H               | – Energia mecânica por unidade de peso [L]                                |
| z               | – Cota em relação a um dado plano horizontal de referência [L]            |
| p               | – Pressão relativa [L M T <sup>-2</sup> /L <sup>2</sup> ]                 |
| γ               | – Peso volúmico [L M T <sup>-2</sup> /L <sup>3</sup> ]                    |
| U               | – Velocidade média do escoamento [L T <sup>-1</sup> ]                     |
| g               | – Aceleração gravítica [L T <sup>-2</sup> ]                               |
| α               | – Coeficiente de energia cinética ou de Coriolis                          |
| ΔH              | – Perda de carga (ou energia) [L]                                         |
| j               | – Perda de carga unitária                                                 |
| L               | – Comprimento de um trecho de conduta [L]                                 |
| τ               | – Tensão tangencial [L M T <sup>-2</sup> /L <sup>2</sup> ]                |
| χ               | – Perímetro Hidráulico [L]                                                |
| S               | – Área de secção [L <sup>2</sup> ]                                        |
| R               | – Raio hidráulico [L]                                                     |
| Fr              | – Número de Froude                                                        |
| Re              | – Número de Reynolds                                                      |
| K               | – Rugosidade equivalente [L]                                              |
| λ               | – Coeficiente de resistência ou de Darcy-Weisbach                         |
| ν               | – Coeficiente de viscosidade cinemático [L <sup>2</sup> T <sup>-1</sup> ] |
| D               | – Diâmetro [L]                                                            |
| H <sub>b</sub>  | – Energia, por unidade de peso, fornecida ao sistema pelo exterior [L]    |
| ΔH <sub>L</sub> | – Perda de carga localizada [L]                                           |
| a               | – Celeridade [L T <sup>-1</sup> ]                                         |
| μ               | – Fase [T]                                                                |
| E               | – Módulo de elasticidade [L M T <sup>-2</sup> /L <sup>2</sup> ]           |
| ε               | – Módulo de elasticidade da água [L M T <sup>-2</sup> /L <sup>2</sup> ]   |
| e               | – Espessura [L]                                                           |
| K               | – Factor de ponderação da integração numérica                             |
| m.c.a.          | – Metros de coluna de água                                                |
| RTL             | – Regime Turbulento Liso                                                  |

RTT – Regime Turbulento de Transição

RTR – Regime Turbulento Rugoso

MIEC – Mestrado Integrado em Engenharia Civil

DEC - Departamento de Engenharia Civil

FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

AdML – Águas do Minho e Lima, SA

EE – Estação Elevatória



# 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1. ENQUADRAMENTO E JUSTIFICAÇÃO

O Ciclo da Água (ou Ciclo Hidrológico) contempla, nas suas diferentes etapas, processos que podem ser do foro natural ou que impliquem ou resultem da actividade e acção do Homem. O sub-ciclo do Ciclo da Água que depende mais acentuada e directamente do Homem designa-se por “Ciclo de Utilização da Água”. Das diversas fases em que se pode dividir – esquematizadas na Figura 1.1, destacam-se as relativas à “utilização” – concretizada na prática pelo funcionamento das redes de distribuição e das redes prediais e que a montante inclui a captação nas reservas naturais, o tratamento de água para a tornar compatível com as várias exigências de qualidade adequadas ao consumo e a adução aos diferentes pontos de entrega (habitualmente consubstanciados em reservatórios).

Todo o conjunto destas componentes do Ciclo de Utilização da Água constitui o designado Sistema de Abastecimento de Água onde se integra o objectivo do presente Projecto, principalmente na componente da adução.

Esta componente, que corresponde ao transporte de água entre o local de captação (seguida ou não de tratamento) e os diferentes pontos de armazenamento (na maior parte dos casos reservatórios) ou entre reservatórios, pode ser realizada em regime de superfície livre ou sob pressão.

A adução recorrendo a escoamento com superfície livre (em canais) não é muito utilizada e desejada por levantar diversos problemas (inviabilidade de utilização após o tratamento da água, evaporação da água, assentamento dos terrenos, etc.). Por isso, recorre-se habitualmente ao transporte sob pressão, realizado em condutas de secção circular, por se concluir ser a solução mais económica e segura.

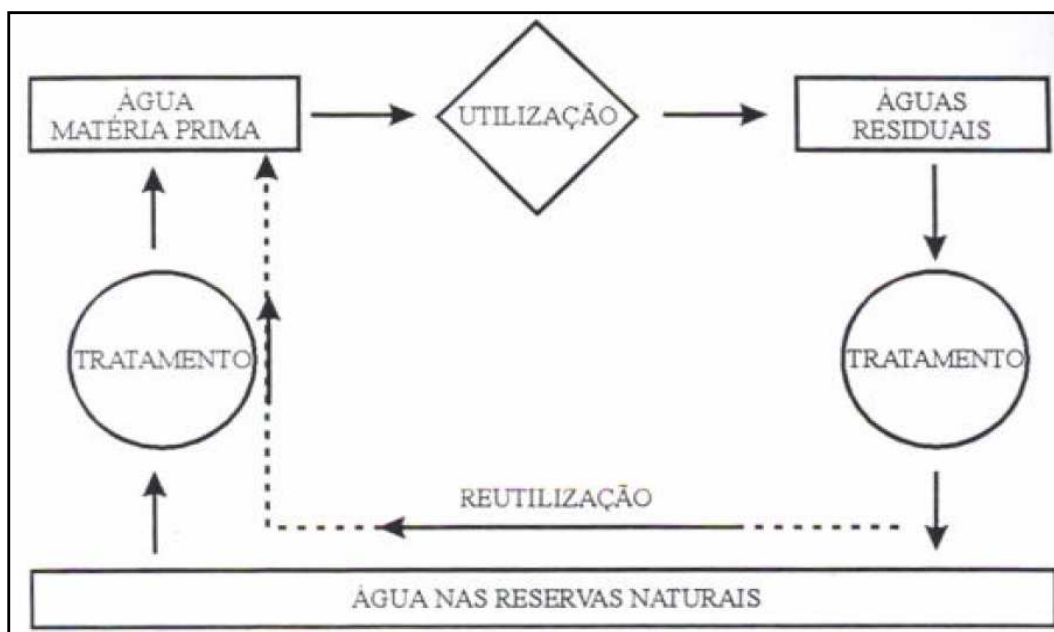


Figura 1.1 – Ciclo de Utilização da Água (Hidráulica Urbana e Ambiental, MIEC, FEUP, 2007)

Sob o ponto de vista da adução sob pressão, esta pode ser realizada sob a forma gravítica – em condutas gravíticas ou por elevação – em condutas elevatórias. A adução gravítica é utilizada sempre que possível e desde que as condições de implantação da conduta sob o ponto de vista energético o permitam. É, de entre as duas hipóteses em causa, a menos dispendiosa implicando apenas custos de investimento e de exploração (Figura 1.2). A uma adutora elevatória estará sempre associado um meio mecânico (grupos elevatórios) que permite transferir para o escoamento a energia necessária e suficiente para vencer o desnível geométrico e de perdas de energia entre as secções (normalmente reservatórios) de montante e jusante da conduta. Logicamente, este último tipo de adução acarreta maiores custos associados aos consumos energéticos necessários, normalmente consumos de energia eléctrica (Figura 1.3).

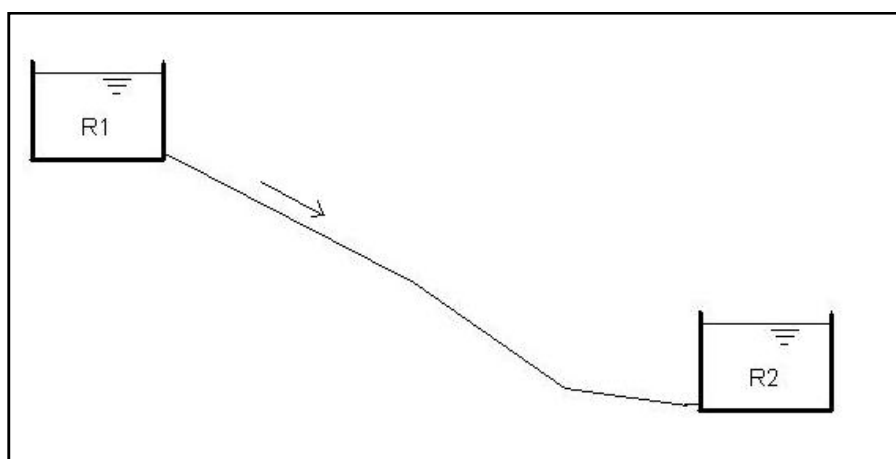


Figura 1.2 – Esquema exemplificativo de um Sistema Adutor Gravítico

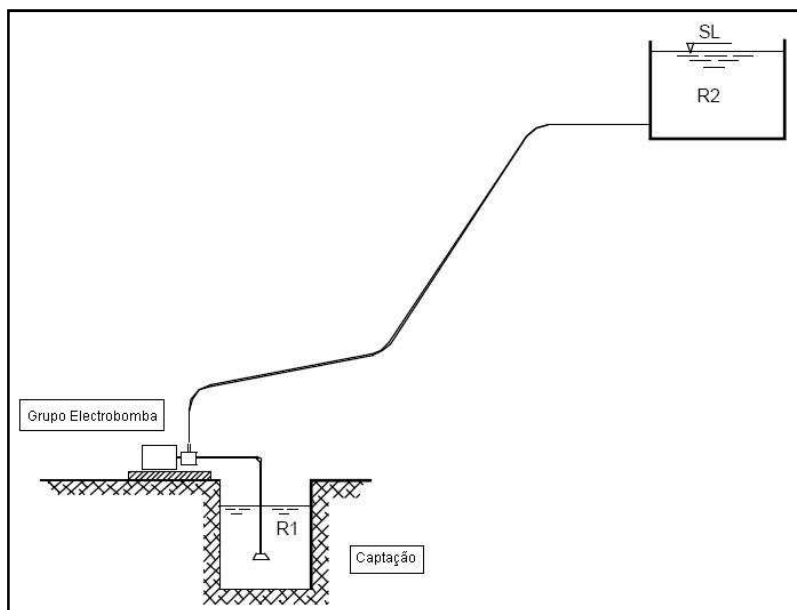


Figura 1.3 – Esquema exemplificativo de um Sistema Adutor Elevatório

Como já se referiu, o presente estudo incide essencialmente na componente da adução por elevação, isto é, recorrendo a condutas ou adutoras elevatórias às quais se associam, entre outros equipamentos, os grupos elevatórios – habitualmente funcionando a partir de energia eléctrica.

Em resultado do funcionamento integrado destas duas principais componentes de um sistema elevatório – as condutas elevatórias e os grupos elevatórios, associam-se, muitas vezes, devido ao efeito de paragem mais ou menos rápida dos grupos elevatórios, efeitos de pressão indesejados ao longo da conduta, devido à ocorrência de um regime transitório de escoamento designado por Choque Hidráulico ou Golpe de Aríete. Este ocorre, por exemplo, devido à interrupção no fornecimento de energia eléctrica aos grupos elevatórios provocado pela acção de paragem – seja programada ou não. O fenómeno de Choque Hidráulico pode, genericamente, caracterizar-se pela ocorrência num espaço de tempo relativamente curto e ao longo de todo o sistema elevatório, de variações de pressão (positivas e negativas) e de velocidade (no sentido ascendente e descendente), com valores muito superiores aos que a conduta e seus acessórios podem estruturalmente ser capazes de suportar.

Para além do fenómeno do choque hidráulico, há outros factores que podem influenciar o normal funcionamento de um sistema elevatório de abastecimento de água.

Assim e no caso particular do escoamento numa conduta elevatória, em que os problemas hidráulicos, energéticos, estruturais estão presentes no dimensionamento e exploração, há um outro problema essencialmente relacionado com a exploração, de fundamental importância no momento presente, que se refere à possibilidade de ocorrência de perdas de água ao longo do traçado da conduta, resultantes da existência ou ocorrência de fugas que eventualmente possam suceder.

Estas perdas de água resultam de roturas nas condutas, da existência de passagens de água através das juntas de ligação entre troços de conduta ou noutras singularidades e podem ser geradas ou agravadas, por efeitos construtivos não correctos, por sobrecargas ou movimentações de terrenos não expectáveis ou e ainda, devido a outro tipo de solicitações como por exemplo os efeitos transitórios de variabilidade de pressões em resultado da ocorrência de Choque Hidráulico.

Sob o ponto de vista hidráulico, as perdas de águas em Sistemas de Abastecimento de Água, enquadram-se como uma das componentes do Balanço Hídrico associado a estes sistemas. Como exemplo, no Quadro 1, apresentam-se as componentes habitualmente consideradas.

Quadro 1 – Componentes do Balanço Hídrico (da IWA- International Water Association modificado)

|                                             |                    |                                  |                                                         |                    |
|---------------------------------------------|--------------------|----------------------------------|---------------------------------------------------------|--------------------|
| Água entrada no Sistema                     | Consumo Autorizado | Consumo Autorizado Facturado     | Consumo Facturado Medido                                | Água Facturada     |
|                                             |                    |                                  | Consumo Facturado não Medido                            |                    |
|                                             |                    |                                  | Consumo não Facturado Medido                            |                    |
|                                             |                    | Consumo Autorizado não Facturado | Consumo não Facturado não Medido                        |                    |
|                                             | Perdas de Água     | Perdas Aparentes                 | Uso não Autorizado                                      | Água não Facturada |
|                                             |                    |                                  | Perdas de Água por Erros de Medição                     |                    |
|                                             |                    |                                  | Perdas Reais nas Condutas de Água Bruta e no Tratamento |                    |
|                                             |                    | Perdas Reais                     | Fugas nas Condutas de Adução e/ou Distribuição          |                    |
|                                             |                    |                                  | Fugas e Extravasamentos nos Reservatórios               |                    |
|                                             |                    |                                  | Fugas nos Ramais                                        |                    |
| Consumo Transferido entre Ciclos de Balanço |                    |                                  |                                                         |                    |

Embora os valores de perdas de água passíveis de ocorrer possam ser de variabilidade muito diferente consoante as circunstâncias e a análise temporal, a sua eliminação – quando ocorrem e são detectadas – são um objectivo muito importante na gestão da exploração diária dos Sistemas de Abastecimento de Água e, no caso particular, nos sistemas elevatórios. Tal é devido a razões ambientais e económicas, para além de razões estruturais, uma vez que a existência de perdas de água vai conduzir, mais tarde ou mais cedo, a problemas acrescidos de estabilidade dos terrenos envolventes e posteriormente da conduta.

A detecção das secções ou zonas da conduta onde se verifiquem perdas de água, não é simples e directa, na maior parte das situações. A menos que o “caminho “ da água seja a superfície, a detecção é um objectivo difícil. Por isso, muitos são os métodos ou processos existentes e desenvolvidos para a detecção e localização dos locais onde ocorrem as perdas de água.

É objectivo do presente Projecto procurar encontrar uma metodologia que ajude a localizar, à custa da análise dos resultados da existência e ocorrência do fenómeno de Choque Hidráulico, zonas ou secções onde esteja a ocorrer perda de água resultante da existência de fuga num Sistema Adutor Elevatório (do tipo assinalado a negrito no Quadro I), à custa da modelação hidráulica deste fenómeno. Foi abordado também um possível mecanismo para a detecção e localização dessa mesma fuga.

## **1.2. OBJECTIVOS DO PROJECTO**

O Projecto cujo relatório se apresenta, foi desenvolvido com os objectivos de:

- i) Desenvolver um modelo matemático que traduza o comportamento hidráulico do escoamento num Sistema Adutor Elevatório de Abastecimento de Água, incluindo a possibilidade de análise da variação de pressões e de velocidades derivada da ocorrência do regime transitório resultante do fenómeno de Choque Hidráulico com e sem simulação da ocorrência de uma fuga de água;
- ii) Procura da localização da secção da conduta em que ocorra uma fuga, provocada experimentalmente, tendo por base a aplicação de Transformadas de Fourier que permitam uma análise espectral do comportamento do sistema elevatório aquando da ocorrência dessa mesma fuga.

## **1.3. ORGANIZAÇÃO DO ESTUDO**

Para além do presente Capítulo 1 “Introdução”, compõem o relatório deste Projecto mais 5 capítulos e vários Anexos, onde se inserem os quadros de valores registados nas experiências realizadas, bem como outros aspectos e cálculos auxiliares necessários à demonstração de conclusões e outros aspectos insertos no texto do presente relatório.

Assim, no Capítulo 2 “Elementos Teóricos”, descrevem-se, de modo muito resumido, os principais conceitos teóricos utilizados no decorrer do Projecto bem como as principais formulações matemáticas preconizadas. Especial saliência para a caracterização do fenómeno de Choque Hidráulico.

O Capítulo 3, intitulado “Detecção de Fugas. Estádio Actual”, são descritos os procedimentos actuais para detecção de localização de fugas.

No Capítulo 4 “Modelo Matemático Desenvolvido” é explicada a formulação do programa de cálculo que permite o estudo do Choque Hidráulico pelo Método das Características e posterior localização de uma fuga de água no Sistema.

Quanto ao Capítulo 5 com o título de “Aplicação Prática à Conduta de Vilar de Mouros”, é realizada a descrição física de todas as características do Sistema Elevatório de Vilar de Mouros em Caminha, utilizado nas experiências realizadas no decurso do Projecto e necessárias ao desenvolvimento da modelação e cálculos efectuados.

Finalmente, no Capítulo 6 são apresentadas as “Conclusões” relativas ao presente Projecto e formulam-se algumas ideias e tarefas que se entendem ser susceptíveis de constituir desenvolvimentos futuros noutros trabalhos.



## 2

### ELEMENTOS TEÓRICOS

#### 2.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

Em Hidráulica, um escoamento é definido como sendo o movimento de um fluido. Os escoamentos, independentemente do regime em que se verificam, podem ser classificados de acordo com as condições em que ocorrem. Resumidamente os escoamentos podem classificar-se do modo seguinte:

- escoamentos interiores: em que o fluido é total ou parcialmente envolvido por fronteiras sólidas;
- escoamentos exteriores: o fluido envolve as paredes sólidas limites do escoamento;
- escoamentos com superfície livre: escoamento interior em que o fluido se encontra em contacto, por um lado, com paredes sólidas, e noutro – a superfície livre – com um meio gasoso, em geral a atmosfera;
- escoamentos em meios porosos: reúnem características de escoamentos interiores e exteriores, pelo que devem ser estudados com uma metodologia própria;
- escoamentos sob pressão: verificam-se no interior de condutas, ocupando o fluido em movimento toda a secção das mesmas, sem contacto com o meio exterior, a não ser em eventuais pontos isolados.

É sobre este último tipo de escoamento que incide o presente trabalho, mais concretamente na vertente de escoamentos em condutas elevatórias, caso que será mais desenvolvido nos subcapítulos seguintes.

#### 2.2. ESCOAMENTOS SOB PRESSÃO

O escoamento de líquidos em condutas sob pressão, constitui um problema que interessa essencialmente analisar sob o ponto de vista energético. Neste aspecto o Teorema de Bernoulli, adaptado às situações presentes, constitui a ferramenta essencial e fundamental. De seguida, realiza-se um resumo dos aspectos principais relativos à aplicação prática do mesmo, com especial incidência numa das suas parcelas relativas às perdas de energia ou de carga inerentes ao processo de escoamento.

### 2.2.1 TEOREMA DE BERNOULLI

As Equações Gerais da Mecânica dos Fluidos, aplicadas ao movimento de fluidos, são de difícil utilização nos problemas reais, tornando-se necessário recorrer a formas mais simples que, apesar de caracterizarem os escoamentos de um modo menos refinado que as ditas equações, traduzem e quantificam com a possível e suficiente fiabilidade os fenómenos inerentes ao escoamento.

A Equação ou Teorema de Bernoulli apresenta-se como sendo a expressão mais aceite na aplicação a fenómenos hidráulicos do tipo do presente sendo, por isso, também a mais utilizada.

Daniel Bernoulli (em 1788), apresentou, na sua forma geral e aplicada a uma partícula fluida em movimento, isto é, sob no seu aspecto local, a equação seguinte:

$$H = \left( z + \frac{p}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} \right) \quad (2.1)$$

onde  $H$  é energia mecânica total da unidade de peso da partícula, dependente:

- da cota da partícula em relação a um dado plano horizontal de referência,  $z$ , correspondendo à energia potencial de posição da partícula fluida;
- da energia potencial de pressão da partícula –  $(p/\gamma)$ , com dimensões referentes à unidade de comprimento e interpretando-se como uma altura – a altura piezométrica;
- da altura cinética -  $v^2/(2g)$ , que representa a energia cinética de uma partícula animada de velocidade.

À soma da cota da partícula  $z$  com a altura piezométrica dá-se o nome de cota piezométrica, variável que tem particular interesse quando a velocidade do escoamento não for determinante para a energia do escoamento (velocidades baixas).

Concluindo, a energia mecânica associada ao escoamento e por unidade de peso da partícula fluida, resulta da soma das energias potenciais de posição, piezométrica e cinética e é habitualmente designada, nos escoamentos sob pressão, por carga.

Como em qualquer movimento, a energia, no caso de não ser adicionada nenhuma parcela energética exterior, vai diminuindo ao longo do espaço percorrido por uma dada partícula. Isto é, ao longo do desenvolvimento do escoamento vai-se reduzindo a energia, correspondendo estas perdas de energia ou de carga ao efeito dissipador por interacção da partícula fluida com o meio envolvente.

De modo a conter este efeito, o Teorema de Bernoulli indica que se deve aplicar a relação de energias entre quaisquer duas posições da partícula (1 e 2) de uma dada trajectória do modo seguinte:

$$H_1 - H_2 = \left( z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} \right) - \left( z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} \right) \quad (2.2)$$

em que:

- $H_1$  e  $H_2$  (cuja diferença é designada por  $\Delta H$ ) são as energias mecânicas totais da partícula, respectivamente nas posições 1 e 2 do escoamento;
- $z_1$  e  $z_2$  são as cotas das partículas em relação a um dado plano horizontal de referência nas posições 1 e 2 ;
- $p_1/\gamma$  e  $p_2/\gamma$  são as energias potenciais de pressão da partícula nas posições 1 e 2 ;
- $v_1^2/(2g)$  e  $v_2^2/(2g)$  são as energias cinéticas da partícula nas posições 1 e 2.

A expressão 2.2 traduz a diferença energética entre dois pontos do escoamento ocupados pela mesma partícula fluida no seu movimento.

A Figura 2.1 ilustra e interpreta a expressão 2.2 e, em particular a perda de energia verificada entre dois pontos do escoamento, quer em termos de energia total, quer em termos de cota piezométrica.

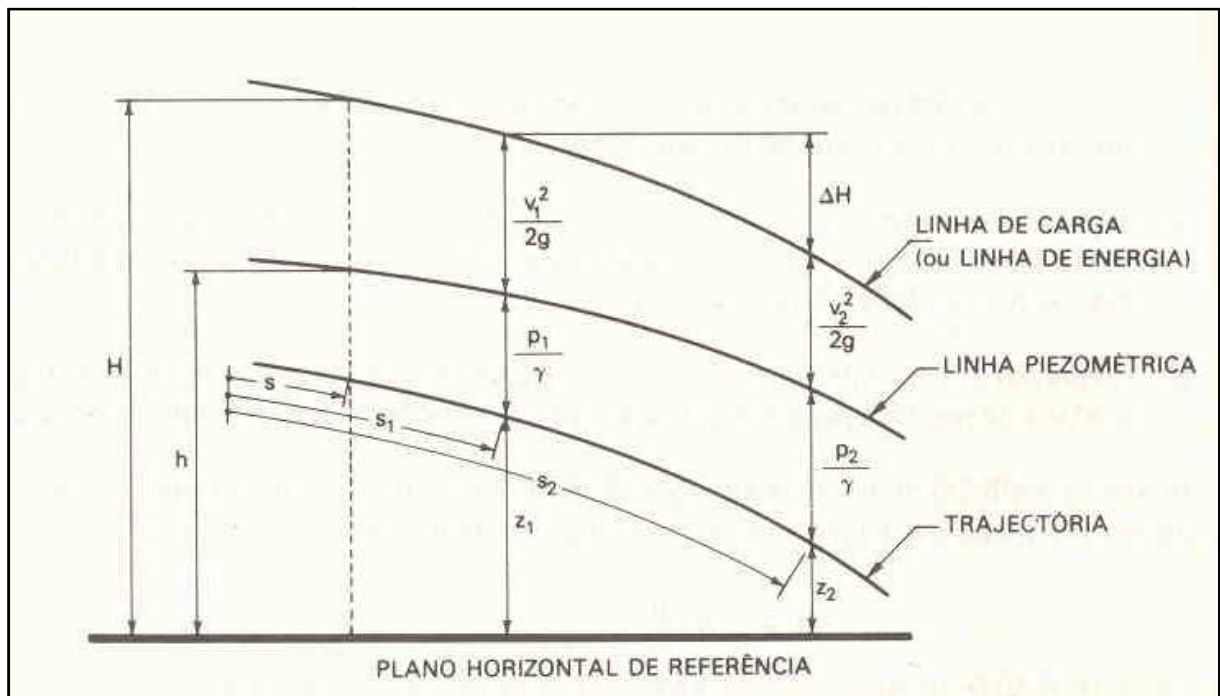


Figura 2.1 – Linha Piezométrica e Linha de Energia ou de Carga (Novais Barbosa, 1985)

Ainda com base na Figura, define-se linha piezométrica como sendo o lugar geométrico de todos os pontos obtidos pela relação:

$$h = z + \frac{p}{\gamma} \quad (2.3)$$

e indica a altura que, no caso de um líquido, este atingiria num tubo vertical aberto nas extremidades e com a inferior colocada no ponto em consideração normalmente à trajectória.

Adicionando à cota piezométrica, em cada ponto, a altura relativa à velocidade – altura cinética – obtém-se uma nova curva, correspondente à linha de carga ou linha de energia e cujos pontos valem o especificado na expressão 2.1.

Partindo da expressão local apresentada e generalizando a sua aplicação a um tubo de corrente – caso que sob o ponto de vista prático corresponde à situação do escoamento numa conduta sob pressão, e considerando as condições de aplicação prática habituais a este tipo de escoamentos, a expressão global do Teorema de Bernoulli transforma-se na equação seguinte:

$$z_1 + \frac{b_1 p_1}{\gamma} + \frac{\alpha_1 U_1^2}{2g} - \left( z_2 + \frac{b_2 p_2}{\gamma} + \frac{\alpha_2 U_2^2}{2g} \right) = \Delta H \quad (2.4)$$

em que:

- $z_1$  e  $z_2$  são as cotas das secções de entrada e saída do tubo de corrente em relação a um dado plano horizontal de referência nas posições 1 e 2;
- $b_1$  e  $b_2$  são coeficientes de distribuição de pressões, que permitem efectuar um paralelismo entre uma distribuição hidrostática e não-hidrostática de pressões nas posições 1 e 2, de valor unitário como no presente caso;
- $p_1/\gamma$  e  $p_2/\gamma$  são as energias de pressão média nas secções 1 e 2;
- $\alpha_1$  e  $\alpha_2$  correspondem ao valor do coeficiente de Coriolis nas secções 1 e 2, de valor aproximadamente igual a 1;
- $U_1^2/(2g)$  e  $U_2^2/(2g)$  são as energias cinéticas médias do escoamento nas secções 1 e 2;
- $\Delta H$  é a perda de carga do escoamento que ocorre entre a secção 1 e a secção 2.

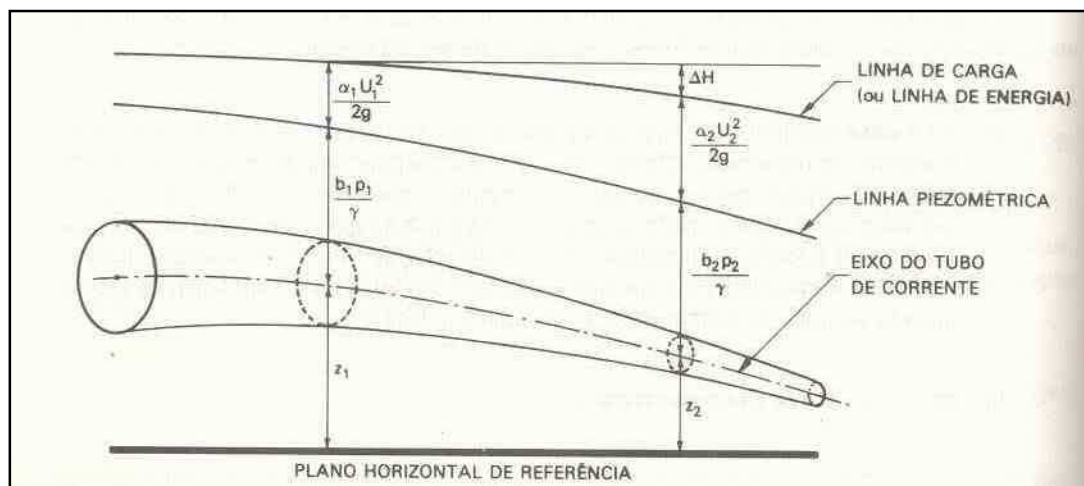


Figura 2.2 – Definição esquemáticas das variáveis intervenientes no Teorema de Bernoulli – Expressão Global (Novais Barbosa, 1985)

### 2.2.2.1 QUANTIFICAÇÃO DA PERDA DE CARGA CONTÍNUA

A equação anterior é, como se referiu, aplicável a um tubo de corrente e a sua aplicação deve ser realizada dentro de certas condicionantes, uma vez que a referida expressão contém mais algumas restrições na sua aplicação e que são, quase sempre, correspondentes a situações práticas correntes como é o caso do escoamento em estudo.

No caso do regime de escoamento ser uniforme, isto é, se a velocidade média se mantém constante ao longo de todo o traçado e, conseqüentemente, a energia cinética também, então o trabalho realizado pelas forças resistentes ao escoamento por unidade de peso e de percurso será também constante em qualquer ponto do escoamento.

Assim, designando por  $J$  o trabalho das forças resistentes ao escoamento por unidade de peso e de percurso, ou, simplesmente, perda de carga unitária (ou perda de carga por unidade de comprimento), tem-se que, ao longo de um percurso de comprimento  $L$ , a perda de carga total nesse trecho é dada por:

$$\Delta H = J L \quad (2.5)$$

Em problemas da Hidráulica, é comum considerar-se que o movimento é uniforme, pelo menos é sempre possível considerar trechos de condutas em que essa situação pode ser admitida. Então, tem-se que a linha de energia e a piezométrica do escoamento (aqui referenciadas em relação ao eixo da conduta), também o serão e apresentam um declive  $j$  igual a :

$$J = \frac{\Delta H}{L} \quad (2.6)$$

O valor de  $J$ , que traduz as perdas de carga ao longo da conduta, é função de vários factores que se opõem ao movimento, que se pressupõe uniforme. A dedução da expressão que fornece o valor das perdas de carga é obtida relacionando-se esta com as tensões tangenciais e, de seguida, com outros factores que influenciam o fenómeno (Figura 2.3).

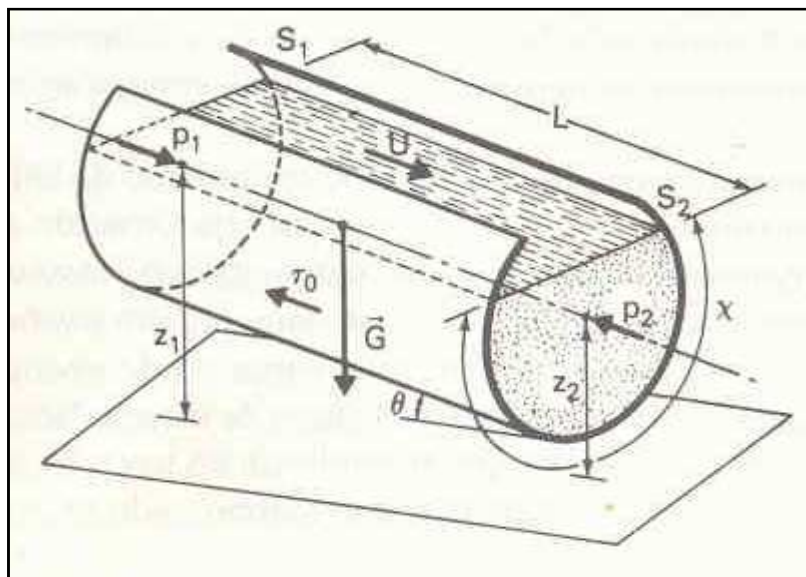


Figura 2.3 – Relação entre Perdas de Carga e Forças de Resistência (Novais Barbosa, 1985)

A perda de carga contínua em condutas sob pressão e, em particular no caso em estudo - tubos de secção circular, é uma perda de energia do escoamento devida ao efeito de tensões tangenciais que se opõem ao movimento e que se desenvolvem e exercem, ao longo de todo o seu percurso, entre o fluido em movimento e as paredes sólidas circundantes ao escoamento.

Com base em considerações de equilíbrio das acções intervenientes no fenómeno de dissipação de energia num trecho de tubo de corrente, é possível obter a expressão genérica que relaciona a perda de carga contínua com as restantes grandezas intervenientes no fenómeno de dissipação de energia em causa e é expressa do modo seguinte:

$$\Delta H = \frac{\tau_0 \chi L}{\gamma S} \quad (2.7)$$

em que  $\Delta H$  representa a perda de carga total no trecho de tubo considerado,  $\tau_0$ , as tensões tangenciais desenvolvidas junto da parede,  $\chi$ , o perímetro molhado,  $L$  o comprimento do trecho do tubo em análise,  $\gamma$ , o peso volúmico do fluido e  $S$  a área da secção.

Esta expressão é passível de transformar-se numa outra, à custa da introdução do parâmetro raio hidráulico,  $R$ , e da perda de carga unitária ou por unidade de comprimento definida por

$$J = \frac{\tau_0}{\gamma R} \quad (2.8)$$

em que  $J$  é a perda de carga unitária ou por unidade de comprimento.

A expressão (2.7) transforma-se mais simplificadamente em

$$\Delta H = j.L \quad (2.9)$$

Contudo, e embora a expressão anterior tenha uma formulação muito simples, a sua aplicação prática é difícil, atendendo ao facto da variável  $J$  ser dependente, muito principalmente, das tensões tangenciais,  $\tau_0$ , desenvolvidas e que são difíceis de quantificar e relacionar com as outras grandezas intervenientes.

Além das tensões tangenciais –  $\tau_0$ , a perda de carga unitária  $J$  depende dos seguintes grandezas:

- raio hidráulico  $R$ , parâmetro geométrico característico da secção transversal do escoamento;
- velocidade média do escoamento  $U$ ;
- propriedades do fluido, como a massa volúmica,  $\rho$ , o peso volúmico,  $\gamma$ , o coeficiente de viscosidade cinemático ou dinâmico,  $\mu$  ou  $\nu$ ;
- parâmetros  $k_1, \dots, k_i$ , que caracterizam a geometria e distribuição das irregularidades das faces internas das paredes do tubo contacto com o fluido e definidas como rugosidades absolutas.

De modo a dispor-se de uma expressão mais desenvolvida e adequada a situações concretas, o recurso à Análise Dimensional e em particular ao Teorema de Vaschy-Buckingham, possibilita a obtenção da expressão seguinte

$$J = \frac{\lambda U^2}{D 2g} \quad (2.10)$$

designada por Expressão Geral de Resistência ou Equação de Darcy-Weisbach, onde  $\lambda$  é o Coeficiente de Perda de Carga ou de Resistência definido pela relação

$$\lambda = \lambda \left( Fr, Re, \frac{k_1}{4R}, \dots, \frac{k_i}{4R} \right) \quad (2.11)$$

em que

- Fr é o número de Froude;
- Re é o número de Reynolds;
- $k_1$  e  $k_2$  são rugosidades absolutas;
- $R$  é o raio hidráulico.

Como nos escoamentos sob pressão a influência da interferência das forças gravíticas pode ser desprezada, o número de Froude – quociente entre as forças de inércia e as forças gravíticas intervenientes no fenómeno – pode também desprezar-se não sendo assim considerada como variável na expressão anterior. Tal significa que  $\lambda$  será apenas função do número de Reynolds e dos parâmetros que traduzem a influência da rugosidade.

Com base no valor do número de Reynolds verificado, os escoamentos sob pressão em condutas circulares podem classificar-se em três regimes diferentes:

- Regime Laminar, se  $Re < 2000$ ;
- Regime de Transição, se  $Re$  está compreendido entre 2000 e 4000;
- Regime Turbulento, se  $Re > 4000$ .

Dentro do regime turbulento, situação em que ocorrem a grande maioria dos escoamentos reais em tubos de secção circular, podem encontrar-se três subclasses:

- Regime Turbulento Liso (RTL),
- Regime Turbulento de Transição (RTT), e
- Regime Turbulento Rugoso (RTR),

dependentes não do valor de  $Re$  mas, da influência do valor de  $Re$  e dos parâmetros de rugosidade na determinação do valor do coeficiente de resistência  $\lambda$ .

Para regimes laminares, verifica-se e demonstra-se que:

$$J = \frac{32 \nu U}{g D^2} \quad (2.12)$$

que corresponde a um valor de  $\lambda$  dado por

$$\lambda = 64/Re. \quad (2.13)$$

Nesta situação, a expressão em conta é exacta e é designada por Equação de Hagen-Poiseuille. Contudo, sob o ponto de vista prático tem pouco interesse, uma vez que a grande maioria dos escoamentos “reais” não ocorre nesta gama de números de Reynolds.

Para regimes turbulentos, em qualquer das três categorias atrás enunciadas, várias expressões têm sido sugeridas. Mas uma em especial tem proporcionado bons resultados, experimentalmente demonstrados. Foi proposta em 1939, por C. F. Colebrook, em colaboração com C.M. White, designada por Equação de Colebrook-White e com a formulação:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left( \frac{k}{3.7D} + \frac{2.51}{Re \sqrt{\lambda}} \right) \quad (2.14)$$

Nesta expressão a variável  $k$  representa um parâmetro único, designado por rugosidade equivalente, que permite traduzir, num só valor, os efeitos globais e totais de todos os parâmetros  $k_i$  que caracterizam a rugosidade do tubo. Esta equação consegue ilustrar com bastante precisão, as variações sofridas pelo coeficiente de resistência  $\lambda$ , quer no caso de escoamentos do tipo RTR quer nos RTL e RTT. De referir que esta expressão, ao longo do tempo, tem sofrido algumas alterações nos valores dos coeficientes nele insertos em resultado da evolução experimental entretanto verificada.

#### 2.2.2.2 PERDAS DE CARGA LOCALIZADAS

Nos trechos de escoamento em que o regime é uniforme, é frequente que os mesmos estejam separados por outros que correspondam a regimes variados, onde a expressão 2.8 não é aplicável. Esses trechos são normalmente de curta extensão mas dão origem a perdas de carga significativas, gerando quebras bruscas da linha de energia. Estas quebras são tratadas como descontinuidades, designando-se estas perdas de carga como perdas de carga localizadas,  $\Delta H_L$ .

Na Figura 2.4 é esquematizado um escoamento com a existência de perdas de carga localizadas.

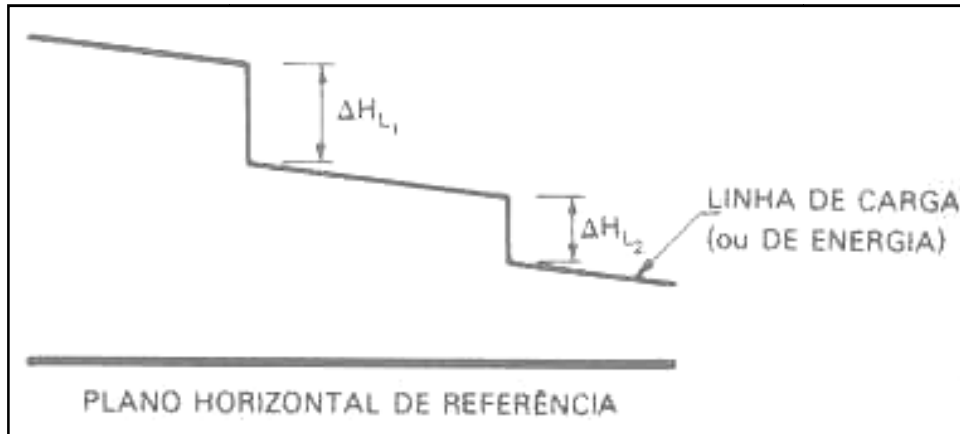


Figura 2.4 – perdas de carga localizadas (Novais Barbosa, 1985)

De modo a introduzir o efeito de acontecerem em simultâneo perdas de carga em regime uniforme (também designadas por perdas de carga contínuas) —  $JL$ , e várias perdas de carga localizadas (em número  $n$ ),  $\sum H_L$ , a equação de Bernoulli anteriormente introduzida toma a forma

$$\Delta H = JL + \sum_1^n \Delta H_L \quad (2.15)$$

ou ainda, por aplicação na expressão :

$$\left( z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{U_1^2}{2g} \right) - \left( z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{U_2^2}{2g} \right) = JL + \sum_1^n \Delta H_L \quad (2.16)$$

Como já foi referido, as perdas de carga localizadas acontecem em pequenos trechos de conduta devido a singularidades do escoamento — variações bruscas de secção como curvas, válvulas, alargamentos e estreitamentos (bruscos ou graduais), derivações, grelhas e outras, e são traduzidas por um factor  $K$ , denominado coeficiente de perda de carga localizado. Tem-se então que as perdas de carga localizadas têm por expressão:

$$\Delta H_L = K \frac{U^2}{2g} \quad (2.17)$$

O factor  $K$  depende do número de Reynolds e da geometria da fronteira. Como habitualmente nos fenómenos hidráulicos estudados em engenharia hidráulica o escoamento é turbulento rugoso, o número de Reynolds é elevado e o valor de  $K$  é independente desta variável.

#### 2.2.2.3 ENERGIA FORNECIDA PELO EXTERIOR

Para que ocorra escoamento entre duas secções (montante e jusante), é necessário que a energia total da secção de jusante acrescida das perdas de carga entre essas duas secções, seja inferior à energia total da secção de montante.

Por vezes, a energia disponível numa dada secção não é suficiente para que ocorra escoamento.

Por isso, e para que o mesmo ocorra, deve ser fornecido ao sistema energia exterior capaz de vencer o desnível energético em deficit existente. Esse fornecimento de energia é realizado habitualmente por intermédio de sistema electro-bomba (como mais à frente se verá) e intervém na equação de Bernoulli como mostra a expressão 2.18.

$$\left( z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{U_1^2}{2g} \right) - \left( z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{U_2^2}{2g} \right) = J L + \sum_1^n \Delta H_L - H_b \quad (2.18)$$

onde,  $H_b$  é a energia por unidade de peso fornecida pelo exterior ao escoamento e que possui características de singularidade (localizada).

Na Figura 2.5 é presente um possível esquema físico e energético de um escoamento ao qual foi fornecido energia para que fosse possível o movimento do líquido entre duas dadas secções correspondentes às superfícies livres  $S_1$  e  $S_2$  dos reservatórios indicados.

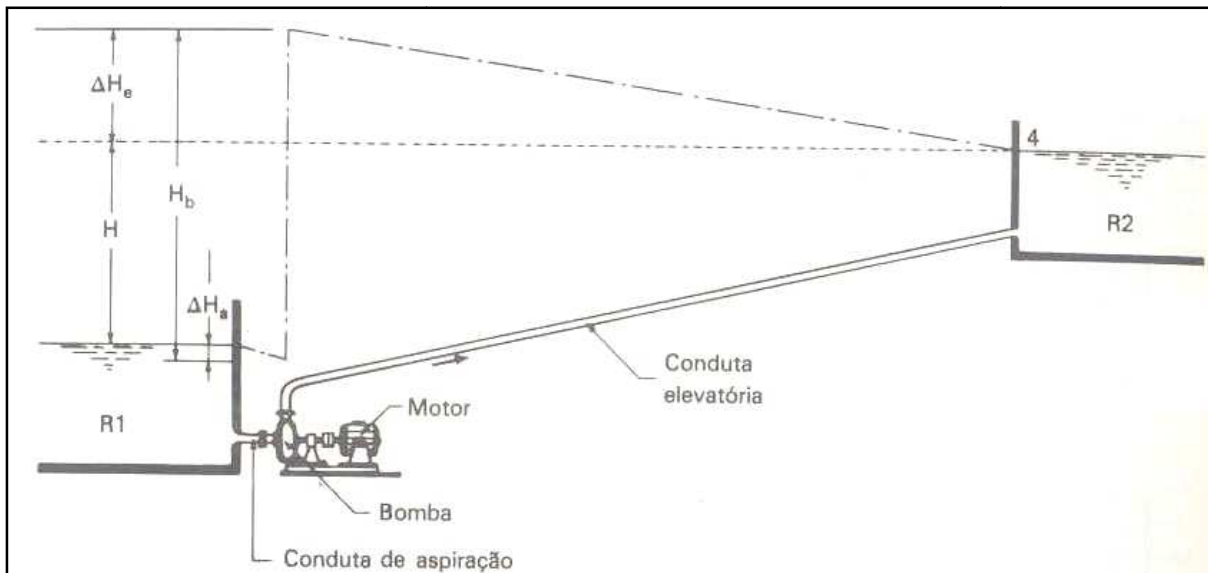


Figura 2.5 – Perfil Longitudinal Esquemático de uma Conduta Elevatória (Novais Barbosa, 1985)

## 2.3 SISTEMAS ELEVATÓRIOS

Como já foi referido, é necessário, por vezes, fornecer ao escoamento a energia necessária para ultrapassar um determinado desnível geométrico desfavorável - no sentido de inferior à cota de jusante e ao qual deverão ser acrescidas as correspondentes perdas de carga totais (principais e localizadas).

Para atingir tal efeito existem várias soluções, umas mais modernas que outras, mas em sistemas abastecimento de água e, no caso concreto, de adução de água, o recurso às bombas hidráulicas são o meio mais utilizado.

A localização de áreas de muitos aglomerados populacionais em zonas de cota elevada e para as quais há necessidade de abastecimento de água, promove a necessidade do aparecimento de sistemas adutores elevatórios que proporcionem a ligação entre a área onde está disponível o recurso (água) e a secção de distribuição a cota alta (normalmente um reservatório de distribuição).

As instalações de elevação ou de bombagem são os locais onde se introduzem incrementos de energia hidráulica ao escoamento. Estas componentes dos Sistemas de Abastecimento de Água apresentam relações que abrangem quase todas as áreas da Engenharia como Civil, Hidráulica, Mecânica, Electrotécnica e de Automação. Na presente descrição dar-se-á particular relevo à componente hidráulica dos sistemas elevatórios.

### 2.3.1 TIPOS DE ESTAÇÕES ELEVATÓRIAS

As estações elevatórias de abastecimento de água podem ser classificadas de vários tipos. No Quadro 2.1 é sintetizada uma das diferentes formas em que se podem classificar as estações elevatórias.

Quadro 2.1 – Tipos de Estações Elevatórias

|              |                                   | Em Torre de Tomada      |
|--------------|-----------------------------------|-------------------------|
|              |                                   | Em Plataforma Flutuante |
| Em Captações | Superficial                       |                         |
|              | Subterrânea                       | Por Furo                |
|              |                                   | Por Poço                |
| Em Adução    | Com Reservatório de Regularização |                         |
|              | Por Sobrepressora                 |                         |

Especificando apenas o caso da última classificação – em adução – é habitual considerar-se a designação de estação elevatória quando a aspiração é efectuada a partir de um reservatório com superfície livre, ou seja, com reservatório de regularização a montante, e a designação de estação sobrepressora, no caso de a aspiração ser realizada a partir da própria conduta, sem perda de pressão e praticamente sem regularização.

As estações elevatórias deverão apresentar um conjunto de grupos electrobomba que permitam o abastecimento para jusante sempre que necessário. Para tal dever-se-á sempre prever a instalação de um grupo de reserva, funcionando a estação elevatória num regime de  $X+1$ , em que  $X$  representa o número de electrobombas necessárias para abastecer um dado ponto a jusante com o caudal pretendido.



Figura 2 6 – Estação Elevatória de Abastecimento de Água – Exemplo (fonte: Águas do Cávado,SA)

### 2.3.2 CONSTITUIÇÃO

Normalmente, as estações elevatórias de sistemas de abastecimento de água são constituídas por uma câmara de manobras e um reservatório de regularização, constituído ou não por uma ou mais células.

A câmara de manobras é geralmente formada por um edifício (de dimensões variáveis, dependendo do tamanho da instalação), onde ficam instalados os equipamentos hidráulicos, mecânicos, eléctricos, de controlo, de comando e de protecção.

O reservatório de regularização deve ser entendido como um elemento destinado à acumulação e regularização de um volume de água. Pode, na prática, ser uma albufeira ou um aquífero, se tal se mostrar uma solução viável. Pode, também e em simultâneo, ter funções de reservatório de distribuição com alimentação a determinada rede de distribuição.

### 2.3.3 CONCEPÇÃO E CRITÉRIOS GERAIS DE DIMENSIONAMENTO

Uma instalação de bombagem é dimensionada de forma a garantir os volumes totais necessários às funções destinadas, considerando-se neste aspecto o efeito de crescimento no tempo, uma vez que este tipo de equipamentos tem de ter em conta o habitual crescimento dos volumes de água de abastecimento necessários. É habitual, mas não primordial, considerar-se o dimensionamento dos equipamentos considerando um período de vida útil de 20 anos e, para a construção civil 40 anos. Contudo, e cada vez mais, a fixação do caudal a elevar e os períodos de bombagem são ditados por critérios económicos com recurso a programas de cálculo automático de modelação, que com ajuda de

cada vez mais poderosos meios de automação permitem os ajustes mais adequados a cada solução e a cada instante.

O dimensionamento de um sistema elevatório e da correspondente conduta elevatória que transporta os volumes de água até jusante (normalmente reservatório de distribuição), deve ter em atenção os custos de instalação e exploração do sistema. A conduta elevatória deve ser dimensionada em função de um estudo técnico-económico que abranja todo o período de exploração.

A análise do problema deve centrar-se na minimização dos custos da obra quer a curto quer a médio e longo prazo. O investimento inicial é, relativamente à conduta, tanto mais elevado quanto maior for o seu diâmetro, enquanto o investimento relativo ao equipamento de elevação, pode diminuir ligeiramente no caso de o diâmetro aumentar (devido à redução da altura de elevação piezométrica necessária e, consequentemente, da potência). No entanto, para além do investimento inicial, haverá a considerar as despesas que, continuamente, têm lugar ao longo do respectivo período de vida útil da obra. A principal dessas despesas diz respeito à energia consumida, havendo ainda despesas de manutenção que, em regra, são pequenas quando comparadas com as despesas de energia.

As características de material, diâmetro e resistência da conduta a adoptar deverá ser, então, aquele que torna mínima a soma do investimento com as despesas de energia, havendo a considerar o facto de as variáveis intervenientes não poderem ser directamente comparáveis por dizerem respeito a épocas diferentes. Por tal motivo, a análise económica deve ter em conta que um determinado capital se torna mais valioso à medida que um tempo passa devendo para tal ser efectuado um estudo económico em que intervenha o custo actualizado da instalação para cada ano e que corresponda a um preço final comparável com os custos de energia. A soma dos valores anuais de energia consumida e da instalação, possibilitam a obtenção da solução mais economicamente viável (supondo-a bem dimensionada hidraulicamente). Isto é, e em resumo, deve ter-se em conta o binómio “investimento” / “custos de exploração” até se encontrar um diâmetro considerado económico e que minimize os custos da nova conduta elevatória.

Além dos aspectos anteriormente focados, há a referir algumas regras práticas resultantes da experiência e de outras disposições regulamentares. Entre outras, o perfil longitudinal de uma conduta elevatória deverá ser preferencialmente ascendente, não devendo a linha piezométrica intersectar a conduta, mesmo em situações de caudal nulo. Também é de respeitar os seguintes critérios de dimensionamento hidráulico:

— é recomendável que a velocidade média de escoamento esteja situada entre um limite mínimo e máximo. Para valor mínimo é usual adoptar-se um valor de 0.3 m/s de modo a evitar a deposição de materiais que são arrastados com o escoamento. Quanto ao valor máximo aconselha-se que não se ultrapasse 1.5 m/s. Reafirma-se que estes valores são apenas valores aconselhados e que podem ser ultrapassados desde que não causem problemas ao funcionamento normal do escoamento na conduta;

— o material constituinte das condutas deve ser escolhido de acordo com as pressões a que este estará sujeito ao longo do funcionamento do sistema elevatório. Por segurança deve ainda precaver-se que a linha piezométrica do escoamento se encontra sempre 3 a 5 m.c.a acima da conduta;

No seu dimensionamento deve ainda prever-se o possível desenvolvimento de regimes transitórios resultante da ocorrência do fenómeno de Choque Hidráulico e que ponham em causa a segurança da conduta e estudar-se possíveis soluções para atenuar o seu efeito, caso existam.

Há ainda vários factores que devem ser tidos em conta na concepção de um sistema de bombagem e respectiva conduta elevatória e que devem constar de cada projecto de execução, assim como da memória descritiva e justificativa do projecto, como são a localização de ventosas, descargas de fundo e ainda maciços de amarração e ancoragem.

## 2.4 REGIMES TRANSITÓRIOS — CHOQUE HIDRÁULICO

O fenómeno de Choque Hidráulico em sistemas elevatórios corresponde à ocorrência de regimes de escoamento do tipo transitório, de características não permanentes. Caracterizam-se essencialmente por uma variabilidade de pressões e velocidades ao longo do tempo e do traçado da conduta, num intervalo de tempo muito curto. É um fenómeno caracterizado pela mobilização das propriedades elásticas da conduta e do líquido e por originar variações bruscas de pressão relativamente aos valores desta grandeza em regime permanente, resultantes da propagação de uma onda de pressão (onda de choque) condicionada, entre outros factores, pela compressibilidade do líquido e pela elasticidade da conduta.

Em geral, não é de admitir a hipótese da secção da conduta variar no tempo, sendo muito mais frequente que se esteja perante uma secção constante em que o caudal varia. A variação de caudal dá-se normalmente numa secção localizada do escoamento, propagando-se a toda a conduta e originando um escoamento não permanente, em que as suas características são função do ritmo de variação do caudal.

Para as adutoras elevatórias, o choque hidráulico depende principalmente das características do ou dos grupos elevatórios escolhidos, das características de resistência da conduta e do tipo de manobra, mais concretamente da sua lei de paragem. A inércia das massas girantes tem significativa influência na magnitude do choque hidráulico decorrente da interrupção do fornecimento de energia ao grupo electrobomba.

Pode então definir-se Regime Transitório (ou Choque Hidráulico ou Golpe de Ariete) como sendo um regime variável que ocorre na transição entre dois regimes permanentes.

No estudo do fenómeno do choque hidráulico e na consequente análise prática simplificada, há necessidade de definir alguns parâmetros de modo a ser possível a sua caracterização. Como mais significativos referem-se a celeridade  $a$ , ou seja, a velocidade de propagação das perturbações, definida pela (2.19):

$$a = \sqrt{\frac{1}{\rho \left( \frac{1}{\epsilon} + \frac{D \cdot C_1}{E \cdot e} \right)}} \quad (2.19)$$

em que:

- $a$  é celeridade da onda de choque;

- $E$  representa o módulo de elasticidade do material constituinte da conduta;
- $D$  e  $e$  representam, respectivamente, o diâmetro e a espessura da conduta;
- $\varepsilon$  é o módulo de elasticidade da água;
- $C_1$  traduz a influência da forma de fixação da conduta na propagação das ondas de choque (normalmente usa-se  $C_1 = 1$ ).

Outra grandeza importante no estudo deste fenómeno é a fase ( $\mu$ ) definida (2.20):

$$\mu = \frac{2L}{a} \quad (2.20)$$

em que:

- $L$  é o comprimento da conduta elevatória;
- $a$  é celeridade da onda de choque;

Estes parâmetros são fundamentais para a definição da envolvente de pressões que afecta o troço de conduta.

Para o estudo e análise dos efeitos decorrentes deste fenómeno existem métodos que permitem uma abordagem simples ao estudo do choque hidráulico em condutas tanto elevatórias como gravíticas, mas apenas fornecem informação sobre uma envolvente de pressões aproximada. Trata-se de Métodos Expeditos que deverão ser utilizados numa fase de análise preliminar, e de fácil aplicação.

Para uma análise pormenorizada do Choque Hidráulico e dos seus efeitos, existem outros métodos passíveis de serem utilizados mas aquele a que mais se recorre na actualidade é o Método das Características que seguidamente se desenvolve.

#### 2.4.1 MÉTODO DAS CARACTERÍSTICAS

Com os recursos de processamento por computador actualmente existentes, o método considerado como o mais potente e versátil para a análise e resolução de problemas de choque hidráulico é o Método das Características.

Este método consiste num procedimento computacional de cálculo com o objectivo de resolução das equações diferenciais do movimento e da continuidade, sob a forma numérica e de modo sistematizado, suficientemente preciso para representar e prever o fenómeno.

De acordo com Pacheco Figueiredo (1990) e (2007), a modernidade destes métodos não está somente na possibilidade de tratamento computacional, mas também no facto de ser contabilizado o efeito produzido pela perda de carga, assim como da inclinação da conduta. O Método das Características é, então, o procedimento mais utilizado actualmente por apresentar simplicidade de utilização, em particular no tratamento de condições fronteira ao escoamento mais complexas.

A aplicação realizada pelo referido Autor, permite, assim, transformar as equações diferenciais deduzidas a partir de considerações de equilíbrio dinâmico e de conservação de massa e considerando como elemento definidor de base o esquema apresentado na Figura 2.7, em que as características do

escoamento no ponto P são determinadas a partir das características de escoamento nos pontos imediatamente anterior e posterior, de acordo com equações lineares de aplicação directa.

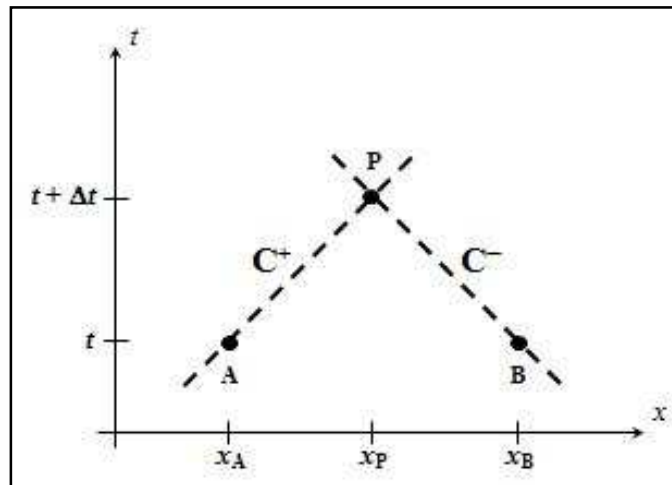


Figura 2.7 – Esquema representativo do significado das expressões do Método das Características

As variáveis intervenientes na figura têm os seguintes significados:

- P é o “ponto” cujas características do escoamento se pretende estudar;
- A é o “ponto” imediatamente a montante de P no instante anterior, t;
- B é o “ponto” imediatamente a jusante de P no instante anterior, t;
- $t + \Delta t$  é o instante de tempo a estudar;
- $\Delta t$  é o intervalo de tempo da integração numérica em ordem ao tempo;
- $x_A$ ,  $x_P$  e  $x_B$  são as posições dos pontos A, P e B, respectivamente;
- $C^+$  e  $C^-$  correspondem às equações que caracterizam a influência do ponto anterior e posterior no escoamento no ponto P, respectivamente.

Em sequência, podem definir-se as equações do Método das Características aplicado ao fenómeno do Choque Hidráulico do seguinte modo:

$$C^+ : H_P + (A + K R_P | Q_P |) Q_P - C_A = 0 \quad (2.21)$$

$$C^- : H_P - (A + K R_P | Q_P |) Q_P - C_B = 0 \quad (2.22)$$

sendo

$$A = \frac{a}{gS} \quad (2.23)$$

$$C_A = H_A + [A - (1 - K) R_A | Q_A |] Q_A \quad (2.24)$$

em que:

$$C_B = H_B - [A - (1 - K) R_B | Q_B |] Q_B \quad (2.25)$$

- $H_p$ ,  $H_A$  e  $H_B$  é a energia do escoamento nos pontos P, A e B, respectivamente;
- $Q_p$ ,  $Q_A$  e  $Q_B$  é o caudal nos pontos P, A e B, respectivamente;
- $a$  é a celeridade;
- $K$  é o factor de ponderação da integração numérica em ordem à coordenada espacial  $x$ ;
- $R$  é um coeficiente do Método das Características definido pela expressão 2.26 e que é igual para todos os pontos em estudo da conduta, quando se admite que o escoamento se dá sempre em regime turbulento rugoso:

$$R = \frac{\lambda}{2gDS^2} \Delta x \quad (2.26)$$

Por fim, para se determinar a energia do escoamento e do caudal em cada ponto P a estudar, aplicam-se as seguintes expressões:

$$H_p = \frac{C_A + C_B}{2} \quad (2.27)$$

$$Q_p = \frac{C_A - C_B}{A_1} \quad (2.28)$$

sendo

$$A_1 = A + \sqrt{A^2 + 2KR_p |C_A - C_B|} \quad (2.29)$$

Há ainda a considerar as condições fronteira do grupo elevatório e também do reservatório de jusante:

— no grupo elevatório:

$$Q_p = \frac{-(BN - A) - \sqrt{(BN - A)^2 - 4(C - KR_p)(DN^2 + Z_R - C_B)}}{2(C - KR_p)} \quad (2.30)$$

$$H_p = (A + KR_p |Q_p|)Q_p + C_B \quad (2.31)$$

em que:

- A, B e C são os parâmetros definidores da curva característica da bomba;
- N é o valor das rotações por minuto da bomba.

— no reservatório de jusante:

$$Q_p = \frac{2(C_A - Z_R)}{A_3} \quad (2.32)$$

$$H_p = -(A + KR_p |Q_p|)Q_p + C_A \quad (2.33)$$

sendo

$$A_3 = A + \sqrt{A^2 + 4(K_L + KR_p)|Z_R - C_A|} \quad (2.34)$$

## 2.4.2 DISPOSITIVOS DE PROTECÇÃO AO CHOQUE HIDRÁULICO

Depois de analisados os resultados do estudo do Choque Hidráulico por Métodos Expeditos, como os atrás enunciados, ou, mais pormenorizadamente, pelo Método das Características, pode resultar – por excesso relativamente aos valores de pressão, positivas ou negativas, a necessidade de utilização de dispositivos de protecção contra os efeitos do Choque Hidráulico. O principal objectivo destes dispositivos é a atenuação das variações de pressão motivadas pelo choque hidráulico, em determinados ou todos os trechos da conduta elevatória.

Num regime variável, a diminuição da variação de pressão tem de corresponder, na mesma secção, a uma variação de caudal mais lenta. Assim, o objectivo é aumentar o tempo de anulação do caudal nas secções da conduta após a paragem dos grupos electrobomba.

Os dispositivos de protecção numa conduta de abastecimento podem comportar a diminuição de sobrepressões e subpressões ou apenas de cada um dos efeitos anteriores.

A diminuição das variações de pressão diz respeito tanto à secção imediatamente a jusante dos grupos electrobomba, como às secções intermédias da conduta. No primeiro caso (secção mais afastada do reservatório de jusante), as variações de pressão são as mais elevadas. Porém, deve também ter-se em atenção que nos pontos interiores correspondentes a pontos altos da conduta, podem ocorrer pressões demasiado baixas com o correspondente risco de rotura da veia líquida, devendo ainda garantir a pressão mínima de 3 a 5 m.c.a., que se referiu anteriormente. Normalmente, quando se dá por resolvido o problema das subpressões, satisfaz-se também o preconizado para as sobrepressões, devendo sempre ser verificado tal facto.

Os dispositivos de protecção contra os efeitos do Choque Hidráulico, devem ainda possuir uma energia acumulada que terá de ter um valor adequado por forma a diminuir, tanto quanto possível, a intervenção da energia elástica interna da conduta e da coluna líquida.

A protecção contra sobrepressões pode ainda ser conseguida por intermédio da dissipação de energia do escoamento em alternativa à acumulação de energia. É este um dos efeitos das perdas de carga contínuas e localizadas no comportamento do sistema em regime variável.

### 2.4.2.1 TIPOS DE DISPOSITIVOS DE PROTECÇÃO AO CHOQUE HIDRÁULICO

São vários os dispositivos de protecção contra o Choque Hidráulico. Enumeram-se de seguida e de modo sucinto os principais, bem como as principais características de cada um.

Assim, há a referir:

— Volante de Inércia:

Constitui uma massa adicional acoplada ao eixo da bomba que aumenta o  $PD^2$ , ou seja o momento de inércia da massa girante do grupo electrobomba. Desta forma o tempo de anulação do caudal aumenta e a pressão decresce de um modo mais suave até atingir o valor mínimo.

Tem duas fases distintas de funcionamento: uma primeira fase na qual a energia fornecida pelas massas girantes permite prolongar tempo de paragem da bomba e uma segunda fase na qual o regime variável está isento de qualquer dispositivo atenuador activo, para além dos efeitos das perdas de carga.

Como desvantagem apresenta as grandes dimensões exigidas ao volante de inércia e consequentes inconvenientes de natureza mecânica e eléctrica quando o objectivo é atenuar o choque hidráulico associado a uma elevada energia cinética.

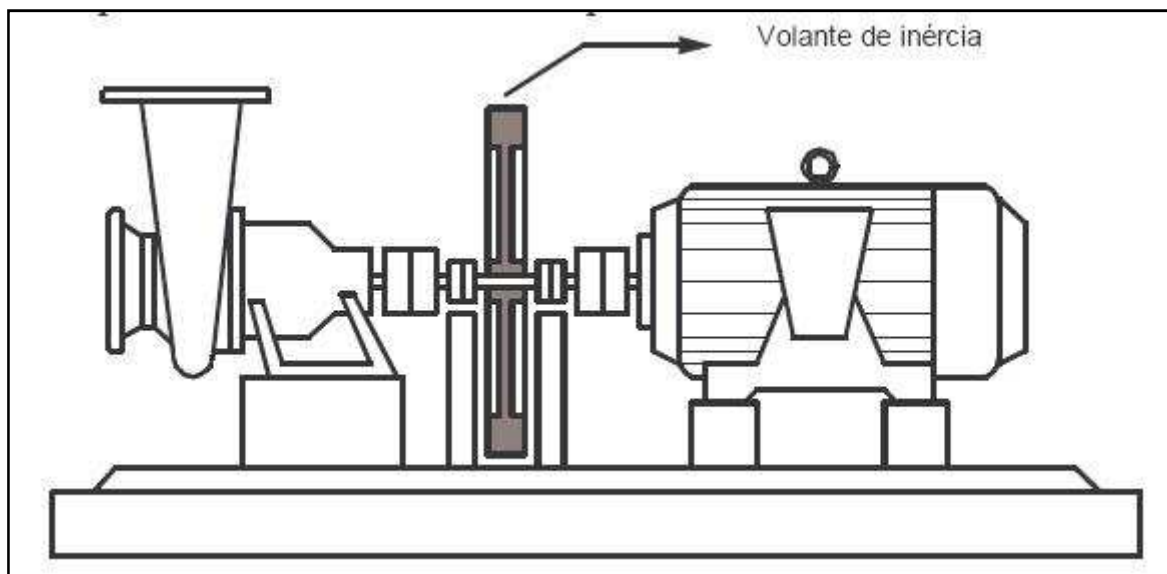


Figura 2.8 – Volante de Inércia – Esquema (Apontamentos de Hidráulica Urbana e Ambiental, MIEC, FEUP, 2007)



Figura 2.9 – Volante de Inércia (Fotografia F. Piqueiro)

— Reservatório de Ar Comprimido (RAC):

Também designado por reservatório hidropneumático (quando existe uma separação física entre a água e o ar comprimido), é um reservatório fechado, com gás comprimido (normalmente ar) e água, que através do efeito da compressão/descompressão do ar permite a diminuição do tempo de variação de caudal no que resulta numa atenuação das variações de pressão. Em regime permanente, a massa de água armazenada está em equilíbrio sob a acção da pressão do ar existente na parte superior do RAC e da pressão da conduta, na secção aonde este está ligado. Em regime variável, esta pressão tende a variar e a água armazenada deixa de estar em equilíbrio. Deste modo, se a pressão baixar a jusante dos grupos electrobomba, o RAC passa a alimentar a conduta com um caudal que diminui progressivamente; caso contrário, é o RAC a absorver o caudal na conduta.

As oscilações do nível de água no RAC provocam, logicamente, uma variação do estado do ar existente: quando o RAC alimenta a conduta, o volume de ar aumenta e a respectiva pressão diminui, e vice-versa.

Como se verá adiante, o princípio de funcionamento dos RAC assemelha-se ao de uma chaminé de equilíbrio, sendo que a acumulação de ar em substituição da energia potencial gravítica permite uma substancial economia no volume do reservatório de protecção. É usual, com vista a diminuir ainda mais este volume, introduzirem-se perdas de carga na conduta de ligação RAC/conduta elevatória (como, por exemplo, tubeiras).

Por apresentar capacidade de atenuar os efeitos do choque hidráulico quer alimentando a conduta, quer recebendo caudal, diz-se que este tipo de dispositivo é um dispositivo reversível.

A utilização de RAC requer, normalmente, a instalação de compressores de ar e de controlo de pressões e está associado a investimentos iniciais relativamente mais significativos.

Na Figura 2.10 estão representados dois tipos de Reservatório de Ar Comprimido a título exemplificativo.



Figura 2.10 – Reservatórios de Ar Comprimido (fonte: Águas do Cávado, SA e Ibaiondo, [www.ibaiondo.com](http://www.ibaiondo.com))

— Chaminés de Equilíbrio:

Menos utilizadas por necessitarem da realização de obras de construção civil mais desenvolvidas, são constituídas por um cilindro vertical em que a altura da água dentro desse mesmo cilindro coincide, em regime permanente, com a cota piezométrica da secção da conduta onde o reservatório está ligado.

A variação de caudal no trecho da conduta entre a chaminé de equilíbrio e o reservatório de jusante é muito mais gradual que a que se verifica no trecho de conduta compreendido entre as bombas e a chaminé. Esta atenuação é motivada pela variação do plano de água na chaminé, estabelecendo-se entre esta e o reservatório de jusante, um escoamento gradualmente variável.

Este tipo de dispositivos exige uma estrutura muito grande, capaz de conter uma elevada quantidade de água que sofrerá, ademais, algumas oscilações. Provocam ainda um elevado impacto visual.



Figura 2.11 – Chaminé de equilíbrio em construção (Itiquira, Brasil)

— Reservatório Unidireccional

São utilizados com a finalidade de se contornar alguns dos problema inerentes às chaminés de equilíbrio, especialmente a sua grande estrutura.

Este tipo de dispositivos apenas actua em situações de depressões na conduta e daí serem designados por unidireccionais (só funcionam num sentido, o de entrada de água na conduta).

Permitem compensar, durante um dado intervalo de tempo, a diminuição de caudal fornecido pelas bombas após o corte de energia.

A influência dos Reservatórios Unidireccionais é notada num determinado trecho da conduta adjacente à secção de inserção do mesmo. Para uma influência mais abrangente a toda a conduta, é conveniente a colocação do plano de água o mais próximo possível da linha piezométrica correspondente ao regime inicial.

Os reservatórios unidireccionais apresentam um bom funcionamento quando as cotas do plano de água e da superfície livre no reservatório de jusante estão próximas, mas apresentam alguns inconvenientes, como são a dificuldade na protecção de secções afastadas do Reservatório Unidireccional, o perigo de contaminação de água tratada e a exigência de acessórios tais como válvulas de seccionamento e de retenção.

#### — Conduta de Aspiração Paralela (CAP)

Durante o regime variável, a diminuição rápida de caudal bombeado provoca uma diminuição da pressão na secção da conduta elevatória imediatamente a jusante das válvulas de retenção de protecção dos grupos electrobomba e uma elevação de pressão na secção a montante dos referidos grupos. Assim, estabelecendo-se uma ligação, por intermédio de uma conduta, entre o reservatório de montante e a conduta elevatória, a jusante dos grupos elevatórios, permite-se uma alimentação desta conduta com caudal suplementar, enquanto o valor da cota piezométrica instantânea na secção jusante desta conduta for inferior ao correspondente na extremidade de montante. É possível, desta forma, aumentar o tempo de anulação do caudal e, por consequência, diminuir o valor da cota piezométrica mínima na secção a jusante da mesma.

A CAP pode apresentar dificuldades em proteger a conduta elevatória de depressões exageradas nos pontos mais altos intermédios.

Em resumo, uma CAP adequa-se a sistemas em que o reservatório de montante seja grande e tenha água com superfície livre a uma cota superior à da cota do eixo da conduta na secção das bombas, mas pode apresentar ineficiência na protecção de pontos altos e exige a colocação de acessórios complementares.

#### — Válvula de Descarga Automática (VDA)

As válvulas de descarga automática permitem o estabelecimento de uma ligação temporária entre a secção da conduta elevatória onde a mesma estiver inserida e o exterior.

A protecção da conduta baseia-se na transformação da energia de pressão em energia cinética (no escoamento através da válvula) e potencial (na mola constituinte do sistema).

Este tipo de protecção é tanto mais adequado quanto maior for a altura de elevação geométrica, permitindo assim a adopção de válvulas mais económicas para a vazão do escoamento de retorno.

Porém este dispositivo apresenta também desvantagens importantes como a impossibilidade de evitar a rotura da veia líquida e elevadas depressões; a eventual perda significativa de água; exige ajustes periódicos e também acessórios suplementares.

Em suma, a escolha dos dispositivos de protecção a utilizar deve basear-se em qual o objectivo principal da protecção (combater subpressões e/ou sobrepressões), nas características do sistema elevatório (conduta, condições topográficas, etc.) e ainda, evidentemente, num estudo económico que encontre a melhor solução para cada situação em causa.

## 2.5. EXPRESSÃO DEFINIDORA DO CAUDAL DE FUGA

Sendo um dos objectivos fundamentais do presente Projecto o estudo da análise e influência de uma fuga numa conduta elevatória – mesmo que simulada – no efeito do fenómeno do Choque Hidráulico que possa ocorrer, importa definir sob o ponto de vista matemático a expressão que permite quantificar o caudal escoado através da mesma. A expressão 2.35 seguinte é a utilizada:

$$Q_{fuga} = (H - Z_{fuga})^{\beta} \quad (2.35)$$

em que:

- $Q_{fuga}$  é o caudal de fuga. Pode ser estimado pela diferença de caudais saídos do reservatório de montante e os entrados no reservatório de jusante;
- $H$  é a energia do escoamento na secção em que se está a simular a existência de fuga;
- $Z_{fuga}$  é a cota topográfica da secção em que se está a simular a existência de fuga;
- $\beta$  é o expoente, que habitualmente tem por valor 0,5.



## 3

### DETECÇÃO DE FUGAS. ESTÁDIO ACTUAL

#### 3.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Os sistemas de abastecimento de água são dimensionados e projectados de modo a que neles ocorra um escoamento teoricamente “perfeito”, ou seja, que se escoe água sem que haja interferência de qualquer elemento exterior ao escoamento capaz de perturbar o seu normal funcionamento.

No entanto, não é possível, na prática, obter escoamentos em que não ocorram diversas anomalias. Dentro das anomalias a que qualquer sistema de abastecimento poderá vir a estar submetido, podem salientar-se as fugas e as perdas de água pois, para além de provocarem prejuízos à entidade gestora do sistema, podem causar perturbações inesperadas ao escoamento.

De acordo com Covas, D. (1998), uma fuga, num sistema de abastecimento, refere-se a toda a água que sai inadvertidamente do sistema, desde o reservatório de montante do sistema até ao consumidor. Uma fuga é, portanto, toda a água que entrando num sistema, não chega a ser utilizada pelo consumidor final.

Em redes de distribuição não é possível detectar uma fuga fazendo apenas o balanço entre o caudal saído do reservatório e o que é realmente consumido pelos clientes da rede. O mesmo não sucede nos sistemas em “alta”: em condutas adutoras, entre reservatórios. Nestes casos é possível medir, com algum erro, recorrendo a equipamento de medição, os volumes saídos do reservatório de montante e os que entram no reservatório de jusante. Se equipamentos de medição estiverem bem calibrados, forem suficientemente sensíveis e apresentarem o mesmo erro de medição, pode conhecer-se com relativa confiança se o sistema está a “perder” água. Como “perdas” num sistema em alta entende-se a parcela de água perdida e determinada pela diferença entre o volume de água saído do reservatório de montante e o volume de água entrado no reservatório de jusante:

$$V_{\text{perdas}} = V_{\text{Reservatório Montante}}^{\text{saído}} - V_{\text{Reservatório Jusante}}^{\text{entrado}} \quad (3.1)$$

É importante também referir que existe uma diferença entre os conceitos de fuga e rotura. Uma fuga é, como já se disse, toda a água perdida, continuamente, devido à falta de estanquidade de tubagens e acessórios da rede (juntas, válvulas, etc.). Tem a tendência de se ir agravando com o tempo e pode não

ser notada tão rapidamente quanto o desejado devido ao pequeno caudal normalmente envolvido. Uma rotura pode ser caracterizada como sendo um acidente numa conduta, normalmente de proporções muito maiores do que uma fuga, podendo ser provocadas por pressões excessivas ou sobrecargas inesperadas na conduta, assentamentos do terreno, problemas estruturais ou situações de funcionamento da conduta não previstas em fase de projecto. As roturas manifestam-se imediatamente após a ocorrência quer por inspecção visual quer pela perturbação que originam no normal escoamento. Podem ainda ser reparáveis no imediato.

As perdas de água num sistema de abastecimento de água e, neste caso concreto numa conduta adutora elevatória, dependem dos seguintes factores:

- pressão na conduta e sua gestão para um bom funcionamento do sistema;
- estado de conservação e idade das condutas;
- controlo do modo de construção e de colocação das condutas;
- gestão das infra-estruturas;
- existência de um sistema activo de controlo, em que sejam analisadas anomalias no sistema, como, por exemplo, uma grande diferença entre caudais saídos do reservatório de montante e caudais entrados no reservatório de jusante;
- rapidez e qualidade das reparações (dependendo ainda da frequência com que ocorrem roturas na conduta).

A Figura 3.1 resume, esquematicamente, os diversos factores intervenientes na ocorrência de uma fuga de água.

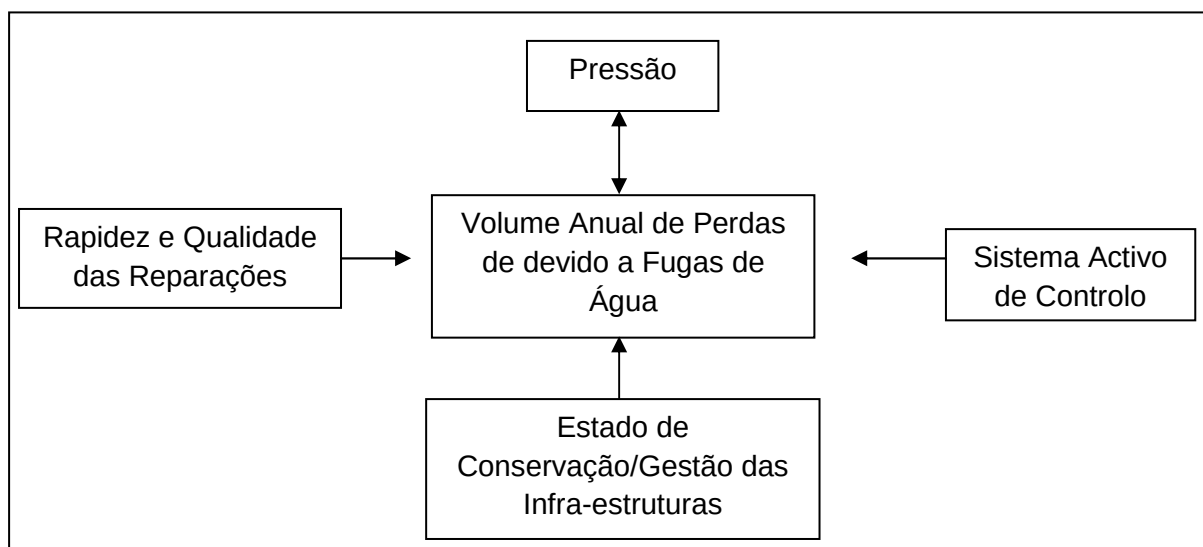


Figura 3.1 – Esquema representativo da Gestão de Fugas em Sistemas de Abastecimento de Água (Adaptado Farley, M., Trow, T., (2003). *Losses in water distribution network*)

### 3.2 TÉCNICAS ACTUAIS DE DETECÇÃO DE LOCALIZAÇÃO DE FUGAS EM SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

As fugas de água nos sistemas de Abastecimento de Água são actualmente detectadas, baseando-se no designado Índice Nocturno de Perdas. Com efeito, é durante o período nocturno que há menor consumo de água na rede e, portanto, é mais simples analisar se há grandes variações de consumo em relação a um valor que se considera o valor padrão para consumos durante a noite (já de si baixo). Numa conduta adutora, é possível obter-se um balanço como o apresentado pela expressão 3.1 e assim conhecer a existência de uma fuga de água.

São actualmente empregues algumas técnicas para a detecção de fugas e sua posterior localização. São subdivididas em técnicas acústicas e não-acústicas.

As técnicas acústicas são as que fornecem melhores resultados em face a custos associados a esta técnica, relativamente acessível. Quando ocorre uma fuga de água, esta, ao atravessar a secção da fuga, origina vibrações na conduta que podem ser detectadas por produzirem um som específico enquadrado numa determinada gama de frequências.

A análise de fugas recorrendo a técnicas acústicas pode ser realizada recorrendo aos acessórios da rede (válvulas, acessórios metálicos, ventosas), onde é mais fácil o acesso e, portanto, mais fácil o reconhecimento de um som correspondente a uma fuga de água. A posição da fuga pode ser deduzida pela intensidade do som correspondente à fuga: quanto mais perto se estiver da posição da fuga, mais intenso será o som por ela produzido, e vice-versa. Pode também recorrer-se a escutas efectuadas à superfície quando as condições do terreno o permitam e se houver condições de operacionalidade do material de detecção de fugas (não-proximidade a outras condutas, por exemplo). Muitas vezes é complicado aplicar estes métodos, pois se não houver pontos de escuta nas proximidades da fuga, será mais difícil detectar a sua posição e também se o caudal de fuga for diminuto, o som por ela produzido será menos intenso, logo menos perceptível.

Além do método anterior, existem outros métodos de técnicas acústicas que podem ser utilizados para a detecção de fugas:

- método de correlação acústica, e
- monitorização contínua do sinal acústico.

Quando às técnicas não-acústicas, estas são, por norma, mais onerosas, mas serão mais credíveis por se basearem em observações visuais directas ou provocadas pela entidade gestora.

Na realidade, a forma mais directa e simples de se detectar uma fuga é através da observação do terreno de afloramentos irregulares de água ou nascimento de vegetação ou até mesmo da visualização da fuga em si. A escavação do terreno é um procedimento excepcional que deve ser evitado.

Outra técnica não-acústica é a injeção de traçadores. Esta pode ser realizada sob a forma de gás (insuflação de fumos de cor, ou odorantes) a montante da secção em que se sabe, de antemão, que se encontra a fuga, sendo a posição da fuga o ponto de efluência do traçador que é detectável recorrendo a equipamento adequado ou a cães treinados para o efeito. Porém, esta técnica está dependente das condições atmosféricas pois o vento pode conduzir a uma localização errada. É considerada bastante útil quando conjugada com outras técnicas.

Há ainda a possibilidade de se recorrer à inspecção da conduta por meio de câmaras de vídeo. O abastecimento é interrompido e é introduzida na conduta uma câmara de vídeo, controlada remotamente, que percorre a conduta até serem encontrados pontos de fuga. É uma técnica muito mais onerosa que as restantes, não só em termos de equipamento que tem de ser mais específico, mas porque requer mão-de-obra mais especializada.



Figura 3.2 – Ferramentas para Detecção de fugas por meio de sistema vídeo – Posto Móvel e Robot de Inspeção Vídeo (Exemplo)

### 3.3 MEDIDAS PREVENTIVAS

Para além das técnicas de detecção e localização de fugas, existem ainda algumas medidas que podem ser adoptadas de modo a diminuir o risco de fugas num sistema de abastecimento.

Uma das possíveis medidas preventivas passa pelo controlo das pressões da conduta. O controlo de pressões permite que se garanta um bom desempenho do sistema quer ao nível técnico quer ao nível económico. Este controlo permite que se verifiquem pressões mais constantes na conduta o que significa que o comportamento do escoamento se coaduna com o projectado e, por isso, que o material constituinte das tubagens está preparado para receber as pressões para que foi projectado. Deste modo, a ocorrência de fugas será menor quanto melhor o sistema de controlo de pressões.

O maior problema em relação à pressão existente numa conduta não é a ocorrência de pressões altas ou baixas mas sim a ocorrência de grandes oscilações, quando surge um regime transitório, nos valores de pressão num ponto. Daí, tal como já se referiu, deve procurar-se ter na conduta pressões tão constantes quanto possível.

Em resumo, quanto melhor o controlo de pressões menos a frequência de ocorrência de fugas de água no sistema.

Outro mecanismo que se pode utilizar na prevenção de fugas de água é a colocação de válvulas redutoras de pressão. Embora este dispositivo seja mais utilizado em redes de abastecimento urbano

do que em condutas adutoras, importa referir que este é possivelmente o mecanismo mais utilizado actualmente no controlo de pressões pela sua simplicidade de operação (podem ser controladas mecânica ou remotamente). Este tipo de válvulas permite um controlo de pressões mais efectivo ao longo de um determinado período de operação do sistema.

Existe ainda a possibilidade da optimização do processo de bombagem. Em redes de distribuição é utilizada um método que consiste em utilizar grupos electrobomba de velocidade de rotação variável o que permite que se regule com maior eficiência os caudais e pressões na rede. Numa conduta adutora a solução pode passar pela colocação de um reservatório de ar comprimido (como no caso em estudo) que atenua os efeitos das ondas de pressão resultantes do regime transitório.



# 4

## ALGORITMO DESENVOLVIDO

### 4.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

Para o estudo do Projecto em causa, foi desenvolvido um algoritmo com o objectivo de se analisar o fenómeno do Choque Hidráulico de um modo analítico e automático.

Este algoritmo, criado em ambiente de software Matlab®, apresenta alguns pressupostos e ainda algumas limitações que se explicitam de seguida.

Como o estudo relativo ao presente Projecto incidiu sobre Sistemas de Adução Elevatórios de Abastecimento de Água, que recorrem a electrobombas para fornecer energia hidráulica ao sistema, é necessário conhecer-se algumas das características do grupo elevatório em causa, tais como:

- a equação da curva característica da(s) bomba(s) constituintes do grupo elevatório;
- a curva de rendimento do grupo elevatório;
- a inércia do grupo elevatório.

A equação da curva característica da(s) bomba(s) é essencial para o cálculo do Ponto de Funcionamento do Sistema Elevatório e depende de um estudo prévio do utilizador para definir as constantes inerentes a cada uma das características apresentadas.

Ao algoritmo é, obviamente, fundamental fornecer também as características do traçado em perfil da conduta elevatória. Habitualmente, apenas são conhecidas as características de alguns “pontos” da conduta, uma vez que se opta por fazer um levantamento topográfico de X em X metros, ou então dos “pontos característicos” do traçado em perfil (“pontos” altos ou “pontos” baixos, por exemplo). Contudo, o programa de cálculo, adopta e executa, entre quaisquer dois “pontos” introduzidos como dados ao programa, uma linearização entre os “pontos” definidores. Tal, conduz a um pequeno erro de análise, especialmente no que concerne ao caso fenómeno do Choque Hidráulico.

O programa permite ainda, a consideração e a introdução de perdas de carga localizadas ao longo da conduta sob três formas e, se for pretendido, em simultâneo: majorando a perda de carga contínua, considerando coeficientes de perdas de carga localizadas e, ainda, adicionando uma perda de carga localizada única e total no reservatório de jusante. Cada uma destas perdas de carga será sempre estimada ou, então, para melhor aproximação, deverá ser experimentada em modelo para otimizar a

definição do coeficiente de perda de carga localizada em cada uma das possíveis singularidades do sistema.

A definição da posição do Reservatório de Ar Comprimido, abreviadamente designado por RAC, ou de outro qualquer dispositivo é, possivelmente, a maior limitação do programa de cálculo desenvolvido. Pelo Método das Características e para o estudo do fenómeno do Choque Hidráulico, a conduta é dividida num determinado número de trechos pretendido. O algoritmo apenas permite que o RAC seja inserido no sistema a partir do primeiro ponto a seguir ao grupo elevatório, o que, dada a divisão da conduta, pode levar a que este órgão não seja “colocado” na posição correcta, podendo levar a alguns pequenos erros de análise devido à incorrecta distância ao grupo elevatório.

No caso de se pretender ainda estudar o caso de ocorrência de uma fuga e a sua localização, o programa, para que simule esta situação, necessita que lhe seja fornecido o valor do caudal de fuga, que pode ser obtido pela diferença entre os caudais saídos do reservatório de montante e os chegados ao de jusante, medidos a partir de medidores de caudal. Porém, tal pode constituir uma dificuldade uma vez que muitos reservatórios podem não ser dotados de medidores de caudal.

Na ausência desta possibilidade, a modelação hidráulica da quantificação da fuga é realizada conforme descrito em 2.5. Como então se referiu, esta expressão é dependente de um coeficiente  $\beta$  que é introduzido na expressão para melhor representar a lei de vazão da expressão definidora da fuga. Este coeficiente pode ser determinado experimentalmente, mas para casos correntes e para a análise em estudo, foi considerado igual a 0,5. Ao programa é ainda necessário indicar uma posição inicial da fuga de modo a se proceder a tentativas para uma mais exacta localização. Este processo poderá ter o inconveniente de ser moroso e não permitir uma localização da fuga tão rápida quanto desejável.

## 4.2. DESCRIÇÃO DO MODELO

O algoritmo desenvolvido funciona baseado na introdução de “inputs” e de “outputs” que permitem ao utilizador estudar convenientemente a situação pretendida e experimentar outras hipóteses.

No caso dos “inputs”, ou dados a fornecer ao programa, estes deverão ser inseridos num ficheiro de texto, no formato \*.dat . Deste ficheiro devem constar os seguintes parâmetros:

- comprimento, diâmetro e rugosidade da conduta elevatória;
- número de “pontos” em perfil disponíveis da conduta elevatória;
- coordenadas dos “pontos” definidores da conduta elevatória;
- desnível geométrico entre as duas secções, montante e jusante da conduta;
- perda de carga localizada na conduta (majoração da perda de carga continua – usar 1 para não majorar, coeficiente de perda de carga localizada – 0 para não considerar, e coeficiente de perda de carga localizada no reservatório de jusante – também 0 para não considerar);
- coeficiente de viscosidade cinemática;
- número de rotações por minuto do grupo electrobomba e coeficientes definidores da curva característica da bomba;
- coeficientes definidores da curva de rendimento do grupo elevatório;

- inércia do grupo electrobomba;
- celeridade;
- número de trechos da conduta a considerar na análise;
- diâmetro do RAC (se não houver,colocar diâmetro igual a 0);
- cotas do nível de água no RAC em regime permanente de escoamento, do nível máximo e do nível mínimo;
- coeficiente alpha ( $\alpha$ ) correspondente ao expoente da lei de estado do ar no RAC;
- diâmetro da ligação e diâmetro da tubeira do RAC;
- comprimento do tubo de ligação e a rugosidade do mesmo;
- coeficiente de perda de carga localizada no tubo de ligação;
- definição da secção do Método das Características a que está ligado o RAC (se não houver RAC colocar 0);
- caudal de fuga;
- coeficiente beta ( $\beta$ ) da expressão de cálculo do caudal de fuga;
- secção de fuga (para se efectuar as tentativas de localização);
- tempo pretendido de simulação.

Um exemplo de um ficheiro de inserção de dados no programa é apresentado na Figura 4.1.

```

cavada_00 - Bloco de notas
Ficheiro Editar Formatar Ver Ajuda
Nome
exemplo
#
Comprimento (m), Diámetro (mm), Rugosidade (mm)
1871.96 287 0.04
#
Perfil da conduta
Número de pontos
3
X(m), Z(m)
0 19.4
16.3 18.17
1871.96 106.4
#
Definicao do desnível geometrico
Hmontante (m), Hjusante (m)
19.4 106.4
#
Perdas de carga localizadas na conduta
Factor de majoracao da perda de carga continua (usar 1.0 para não majorar)
1.2
Coeficiente de perdas de carga localizadas (usar 0.0 para não considerar)
0.0
Coeficiente de perda de carga localizada no reservatorio de jusante (usar 0.0 para não considerar)
0.0
#
Viscosidade cinematica (m^2/s)
1.31E-06
#
Curva Característica do Grupo Elevatório (Hb = AN^2+BNQ+CQ^2; Hb:m; Q:m3/s)
No (rpm), A, B, C
1450 6.52509E-05 0.005634 -1800.6
#
Curva de Rendimento do Grupo Elevatório para No (rend (%) =aa*Q^3+bb*Q^2+cc*Q+dd; Q:m3/s)
aa, bb, cc, dd
1238.325 -5185 1285.75 0.1377
#
Inercia do grupo elevatorio
PD^2 (Nm^2)
171
#
Celeridade (m/s)
379.62
#
Número de trechos da conduta (numero de "delta x")
40
#
Reservatorio de Ar Comprimido (RAC)
Diámetro do RAC (m); se Drac=0, não há RAC.
1.5
Zrac_0 (m), Zrac_max (m), Zrac_min (m)
21.85 23.28 20.45
Alfa (expoente da lei de estado do ar no RAC)
1.1
D_lig (mm), D_tub (mm)
250 250
Comprimento do tubo de ligação (m), Rugosidade no tubo de ligação (mm)
12 0.05
Coef. de perda de carga localizada no tubo de ligação (não considerar aqui a tubeira)
0.0
Seccao com RAC (maior que 1 e menor que numero de "delta x" + 1; se igual a 0 não há RAC)
1
#
Fuga localizada de agua
Q_fuga inicial (m^3/s); se Q_fuga_in=0, não há fuga.
6.0E-3
Beta (expoente da lei de vazão da fuga; geralmente adopta-se 0.5)
0.5
Seccao com fuga (maior que 1 e menor que numero de "delta x" + 1; se igual a 0 não há fuga)
31
#
Tempo de simulacão (número de fases)
8
#

```

Figura 4.1 – Ficheiro de Dados a fornecer - Exemplo

Introduzidos estes dados e depois de se indicar a designação do ficheiro dos mesmos, o programa é executado. O programa calcula então as coordenadas dos pontos do perfil correspondentes a cada uma das secções a ser estudadas pelo Método das Características e, ainda, o ponto de funcionamento do sistema elevatório. É também indicada a velocidade média do escoamento e a perda de carga unitária na conduta.

De seguida, é solicitado que se selecione uma de duas opções: a Opção 1, em que o programa executa os cálculos e apresenta o gráfico final das envolventes de pressões assim como o nível de água e volume de ar no RAC ao longo do tempo de simulacão, ou a Opção 2, que permite ao utilizador,

enquanto o programa executa os cálculos, acompanhar a evolução gráfica das variáveis descritas para a Opção 1.

Depois de terminada a simulação, são fornecidos os resultados, quer em forma numérica quer em forma gráfica. O gráfico relativo às envolventes de pressões é obtido através da Matriz “HH” produzida pelo programa – para a análise em estudo é o “output” mais importante fornecido. Esta matriz terá tantas colunas quantas as secções estudadas pelo Método das Características e tantas linhas quantos os instantes em estudo, decorrentes do tempo de simulação definido.

Para o caso de se pretender analisar e estudar a posição da fuga, à Matriz “HH” deve associar-se o vector de tempos – designado por “tmdc”, onde estão definidos os instantes estudados pelo programa. Estes novos dados são posteriormente analisados através de uma análise por transformadas de FOURIER com o objectivo de determinar a posição da fuga, de acordo com o procedimento adiante desenvolvido.



# 5

## **APLICAÇÃO PRÁTICA À CONDUTA ELEVATÓRIA DE VILAR DE MOUROS**

### **5.1. DESCRIÇÃO SUCINTA**

Para experimentar o programa desenvolvido, recorreu-se ao Sistema Elevatório de Vilar de Mouros que faz parte integrante do Subsistema de Abastecimento de Água de Cavada e que actualmente abastece parte do concelho Caminha (a parte Norte). Este Subsistema foi construído na década de 80, mas foi recentemente – em 2007, remodelado e reabilitado pela Empresa concessionária Águas do Minho e Lima, SA.

O Subsistema de Abastecimento de Água de Cavada é genericamente constituído por uma captação por poço e com drenos horizontais no sub-leito do rio Coura, a partir da qual a água bruta é elevada para uma estação de tratamento de água. Posteriormente, é a mesma elevada a partir de um reservatório de regularização para um outro reservatório – designado por reservatório de Vilar de Mouros, através de uma conduta elevatória que será a conduta que constituiu o elemento principal do presente estudo. É a partir deste reservatório que se inicia a distribuição de água às redes de distribuição e outras adutoras do Subsistema. A conduta elevatória, a estação elevatória que a precede, assim como os reservatórios de montante e de jusante, serão as componentes intervenientes no presente análise pelo que se descreverão mais pormenorizadamente de seguida.



Figura 5.1 – Localização do Sistema Elevatório de Vilar de Mouros

A Águas do Minho e Lima, S.A. (AdML) é a empresa concessionária por parte do Estado Português do Sistema Multimunicipal de Água e de Saneamento do Minho-Lima, sendo, em consequência, a entidade responsável pela gestão, operação e manutenção dos vários sistemas de abastecimento de água, drenagem e tratamento de água da área geográfica que inclui os concelhos de Arcos de Valdevez, Caminha, Melgaço, Monção, Paredes de Coura, Ponte da Barca, Ponte de Lima, Valença, Viana do Castelo e Vila Nova de Cerveira. O Sistema Elevatório de Vilar de Mouros faz parte do Subsistema de Abastecimento de Água de Cavada (ver Figura 5.2).

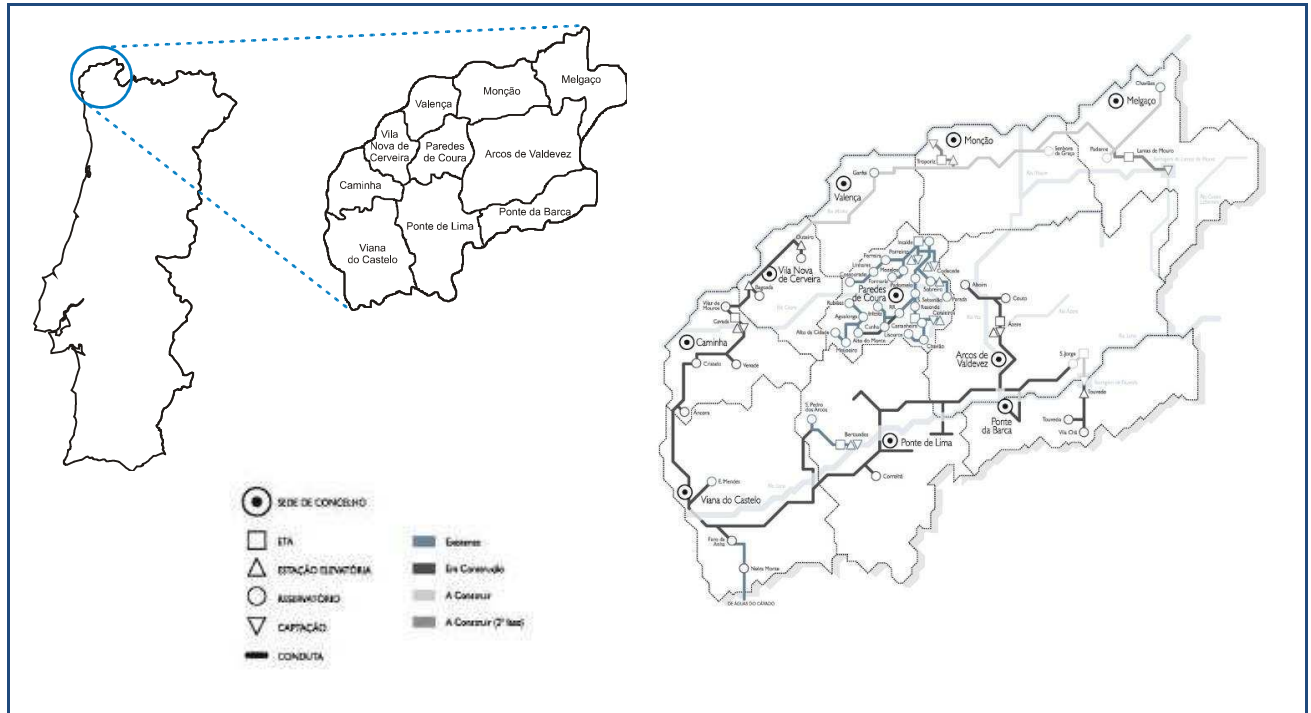


Figura 5.2 – Localização da EE de Cavada (adapt. <http://www.aquasdominhoelima.pt> (2008))

## 5.2. SISTEMA ELEVATÓRIO DE VILAR DE MOUROS

Nos subcapítulos seguintes descrevem-se as principais características e relevantes para o estudo a realizar das diferentes componentes do Sistema elevatório de Vilar de Mouros.

### 5.2.1. RESERVATÓRIO DE MONTANTE

É um reservatório constituído por duas células – cada uma com  $125 \text{ m}^3$ , cujas soleiras estão à cota 19.42 m. O abastecimento a este reservatório é realizado a partir da Estação de Tratamento de Água.

O nível máximo de água em cada uma das células é de 2,25 m.

As células deste reservatório ligam, através de uma conduta com cerca de 15 m de comprimento ao colector de aspiração dos grupos elevatórios.



Figura 5.3 – Reservatório de Montante – Vista Exterior

#### 5.2.2. ESTAÇÃO ELEVATÓRIA DE VILAR DE MOUROS

A Estação Elevatória de Vilar de Mouros, é constituída primordialmente por um edifício que está implantado em anexo à Estação de Tratamento de Água, onde para além dos grupos elevatórios se situam todo um conjunto de outros equipamentos necessários ao seu funcionamento tais como válvulas de retenção, válvulas de isolamento de cada grupo elevatório a montante e a jusante, dispositivos de monitorização e controlo como manómetros e transdutores de pressão a montante e a jusante de cada grupo elevatório, equipamentos e outras componentes eléctricas, etc.

O interior da estação elevatória, com especial incidência nas componentes com interesse para o presente estudo, estão indicados na Figura 5.4 seguinte.

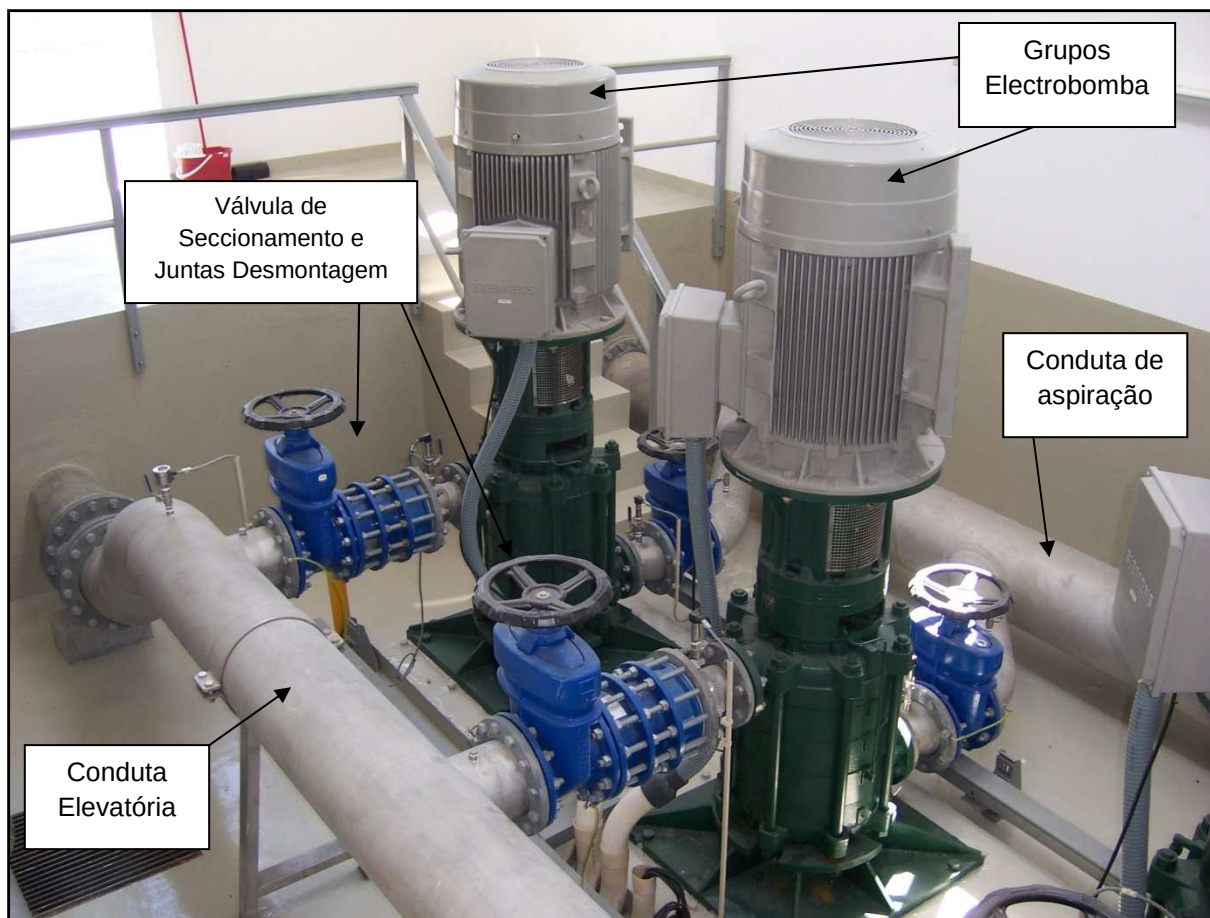


Figura 5.4 – Estação Elevatória de Vilar de Mouros

Os grupos elevatórios estão ligados a um colector de aspiração, que fica interior à estação e que é a parte terminal da ligação do reservatório de montante atrás focado. O diâmetro deste colector é de 400 mm e a ele estão ligados três grupos elevatórios, constituindo um a reserva mecânica de cada um dos outros dois. São grupos elevatórios da marca EFAFLU, tipo KPV 125-150B/04, de eixo vertical. A curva característica de cada um dos grupos é apresentada na Figura 5.5.

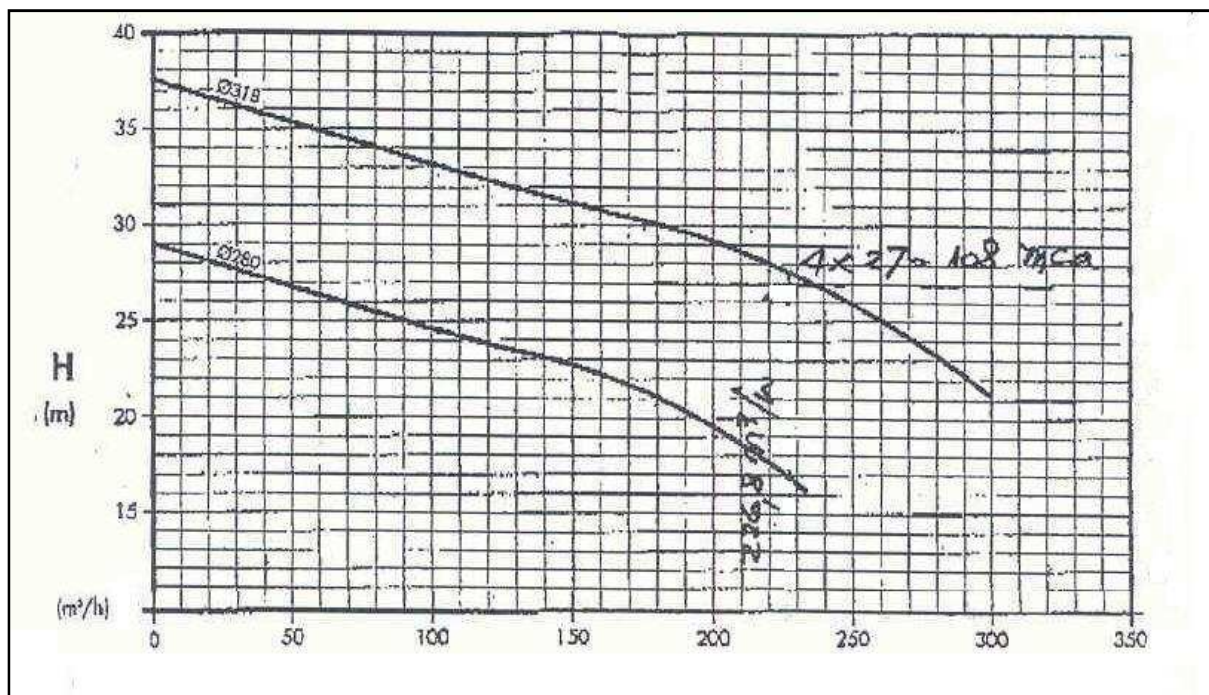


Figura 5.5 – Curva Característica de cada um dos Grupos Elevatórios (Fonte: AdML)

As principais características de cada um dos grupos elevatórios são as presentes no Quadro 5.1.

Quadro 5.1 – Características Técnicas dos Grupos Electrobomba da Estação Elevatória de Vilar de Mouros (Fonte: AdML)

| Grupos Electrobomba                     |          |
|-----------------------------------------|----------|
| Potência mecânica                       | 81.4 kW  |
| Potência Eléctrica                      | 110 kW   |
| Velocidade de rotação                   | 1450 rpm |
| Gama de caudais elevados                | 0~89 l/s |
| Gama de alturas elevadas (por impulsor) | 21~38 m  |
| Rendimento ( $\eta$ ) bomba + motor     | 80%      |
| Frequência Máxima                       | 50 Hz    |

De referir que estes grupos elevatórios estão interligados a uns sistemas de regulação de velocidade que, sobretudo no arranque e na paragem dos grupos elevatórios, controlam as rotações dos mesmos.

O funcionamento da estação elevatória é, em condições normais, gerido automaticamente em função dos níveis de água nos reservatórios de montante e jusante através de um SCADA que fornece todos os dados de exploração e todos os alarmes inerentes e necessários ao adequado funcionamento deste

sistema. Este controlo, que pode ser transmitido à distância, é realizado a partir de uma pequena central de comando situado, também, no interior desta estação elevatória.

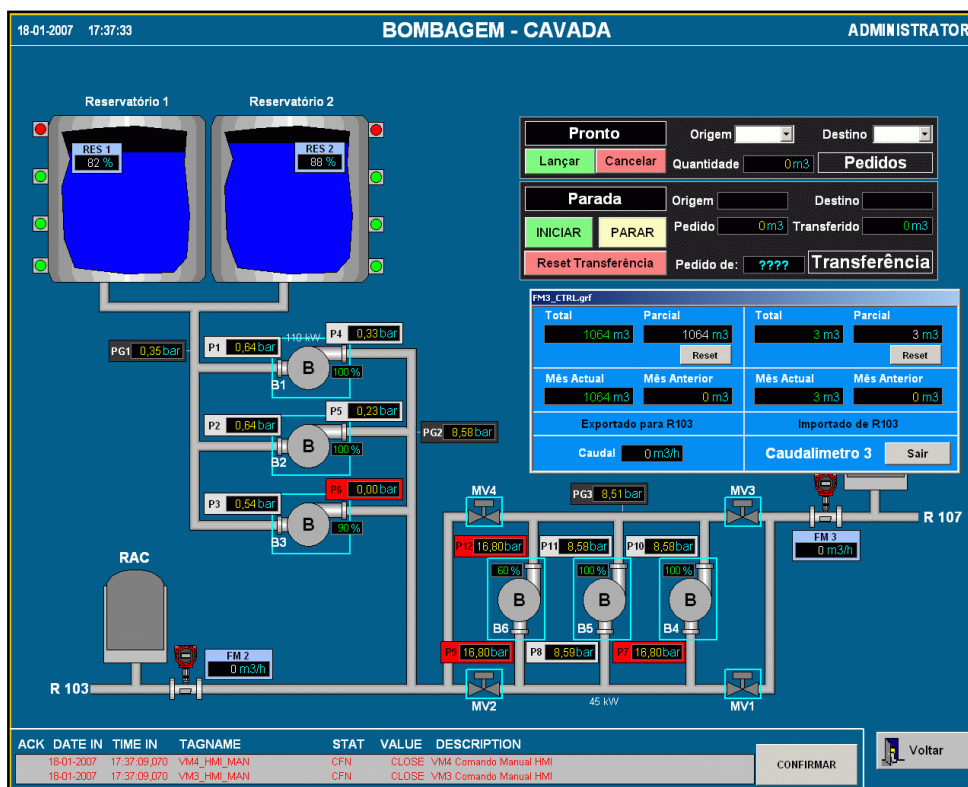


Figura 5.6 – Imagem Exemplificativa do SCADA (Fonte: AdML)

### 5.2.3. CONDUTA ELEVATÓRIA DE VILAR DE MOUROS

A conduta elevatória associada à estação elevatória de Vilar de Mouros desenvolve-se numa extensão de 1872 m e segue um trajecto quase sempre ascendente e está implantada ao longo de caminhos municipais enterrada em vala.

As suas principais características técnicas são as constantes do quadro seguinte.

Quadro 5.2 – Características Técnicas da Conduta Elevatória de Vilar de Mouros (Fonte: AdML)

| Conduta Elevatória           |                       |
|------------------------------|-----------------------|
| Diâmetro Exterior e Interior | 355 / 290.7 mm        |
| Desnível geométrico          | 86.6 m                |
| Extensão                     | 1871.96 m             |
| Pressão Nominal              | PN16                  |
| Módulo de Elasticidade       | 1400 MPa              |
| Rugosidade Equivalente       | 0,05 mm<br>(estimada) |
| Inclinação Média             | 4.6 %                 |

Ao longo do seu traçado estão implantados órgãos de segurança como ventosas e válvulas de descarga de fundo, bem como maciços de amarração da conduta nas secções em que o efeito dinâmico do escoamento é susceptível de provocar esforços importantes.

Assumem uma importância significativa para o presente estudo, dois outros equipamentos acessórios do Sistema: um medidor de caudal à saída da estação elevatória e um reservatório de ar comprimido (RAC).

Em relação ao medidor de caudal, é o mesmo do tipo electromagnético, de marca KROHNE, no diâmetro de 300 mm (ver Figura 5.7), e encontra-se situado ainda dentro do recinto que reúne a Estação de Tratamento de Água e a Estação Elevatória de Vilar de Mouros, a cerca de 15 m da conduta elevatória. O correspondente sinal é transmitido para a câmara de manobras do reservatório de regularização a montante onde se realiza a medição visual ou com a possibilidade de utilização de dispositivo de registo automático ao longo do tempo. O leitor (ou visor) do medidor de caudal mencionado encontra-se afixado em parede interior da câmara de manobras do reservatório.



Figura 5.7 – Medidor de Caudal na Conduta Elevatória

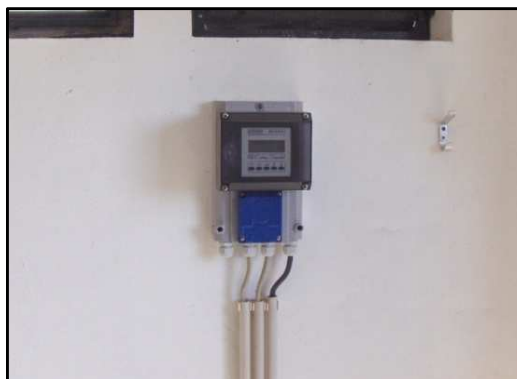


Figura 5.8 – Leitor do Medidor de Caudal

O reservatório de ar comprimido é da marca IBAIONDO, com capacidade de 5 m<sup>3</sup> e encontra-se implantado em derivação à conduta, dentro do recinto onde também se situa a estação elevatória. A cota de implantação no terreno é de 19,4 m. A sua altura é de 4,715 m, a que corresponde uma cota máxima de 24,115 m.

Trata-se de um reservatório do tipo de “saco”, ou seja, a água não contacta directamente com as paredes do reservatório, antes fica situada dentro de uma manga de borracha.

Não é dotado de qualquer estrangulamento na derivação da conduta de elevação para o RAC e à entrada deste, apenas existindo uma válvula de corte e/ou de admissão.



Figura 5.9 – Reservatório de Ar Comprimido

#### 5.2.4. RESERVATÓRIO DE VILAR DE MOUROS

O reservatório de jusante do Sistema Elevatório de Vilar de Mouros – designado por reservatório de Vilar de Mouros, foi construído recentemente – em 2006, é constituído por duas células cilíndricas, cada uma com capacidade total de 2.500 m<sup>3</sup>. A cota de soleira é de 101,3 m e a altura máxima de água é de 4.70 m.

Dispõe de uma câmara de manobras onde se situam todos os equipamentos de controlo e segurança deste órgão, como válvulas na admissão a cada célula e na saída para a adução para outros reservatórios e para os sistemas de distribuição dependentes. Em particular há a referir a existência de um medidor de caudal do tipo electromagnético, da marca KROHNE e de diâmetro 300 mm com a função de quantificar os volumes aduzidos a jusante.



Figura 5.10 – Reservatório de Vilar de Mouros

### 5.3. EXPERIÊNCIAS REALIZADAS

Com o pressuposto de, através de uma instalação real, calibrar e melhor demonstrar as funcionalidades do algoritmo e do programa de cálculo automático desenvolvido e introduzido em capítulo anterior, idealizaram-se e realizaram-se experiências em ambiente real com recurso à realização de ensaios no Sistema Elevatório de Vilar de Mouros.

O princípio básico que orientou tais ensaios consistiu na realização de experiências que permitissem a medição de pressões e de caudais em diferentes secções do circuito hidráulico e em duas situações distintas de ocorrência ou não de choque hidráulico e de existência ou não de uma fuga simulada. De forma sistemática podem resumir-se os ensaios efectuados do modo seguinte:

- a) Ensaios, **sem existência de fuga**, nas situações de regime normal e de regime transitório após a ocorrência do fenómeno de choque hidráulico provocado pelo fecho de um ou dois grupos elevatórios;

- b) Ensaios, **com a existência simulada de uma fuga**, nas situações de regime normal e de regime transitório devido à ocorrência de choque hidráulico provocado pelo fecho de um ou dois grupos elevatórios.

Assim e nesse sentido, foram escolhidas 6 (seis) secções do circuito hidráulico disponível, definidas conforme a Tabela 5.3 e a Figura 5.11. A opção por estas secções deve-se, por um lado, ao facto de em todas elas ser possível a instalação rápida e fácil de medidores de pressão, à existência de possibilidade de ligação de energia eléctrica e, por outro e ainda, o facto de serem secções que representam com significado adequado o funcionamento dos fenómenos que se pretendem analisar.

Quadro 5.3 – Localização das Secções de Medição e de Simulação de Fuga

| Localização das Secções de Medição e de Simulação de Fuga |                    |                    |         |         |                    |                   |
|-----------------------------------------------------------|--------------------|--------------------|---------|---------|--------------------|-------------------|
| Secção                                                    | 1                  | 2                  | 3       | 4       | 5                  | 6                 |
| Distância aos Grupos Elevatórios (m)                      | -12                | 1                  | 16      | 478     | 1501               | 1012              |
| Local de Instalação                                       | Conduta Elevatória | Conduta Elevatória | RAC     | Ventosa | Conduta Elevatória | Descarga de Fundo |
| Tipo de Medição                                           | Caudal             | Pressão            | Pressão | Pressão | Pressão            |                   |

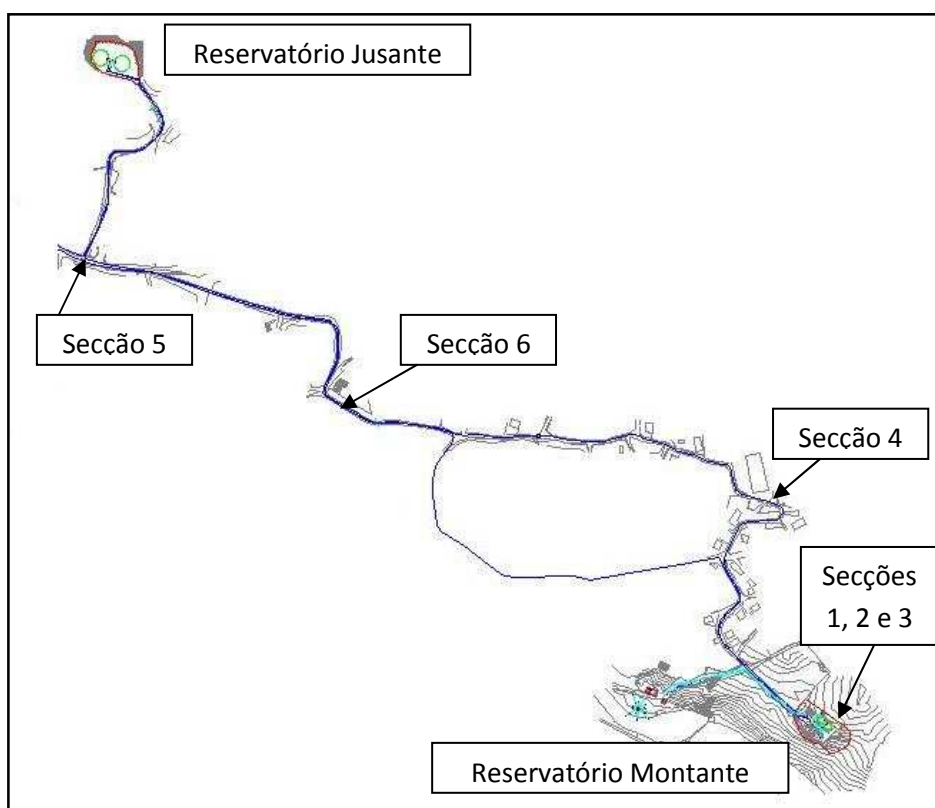


Figura 5.11 a) – Localização Esquemática das Secções de Medição (vista geral)

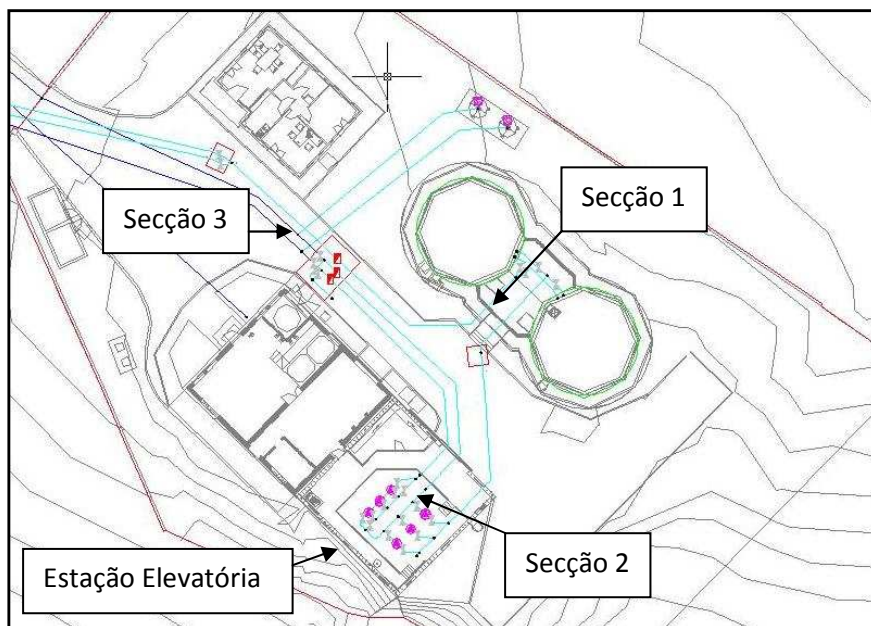


Figura 5.11 b) – Localização Esquemática das Secções de Medição (vista pormenor da Estação Elevatória)

Para a medição do caudal, aproveitou-se o medidor de caudal instalado nas secções 1 e 6 atrás definidas e que fazem parte da instalação em funcionamento normal, isto é, é o mesmo medidor que serve de controlo aos volumes elevados a partir da estação elevatória. Como se referiu este medidor permite a quantificação dos caudais elevados ao longo do tempo uma vez que tem a possibilidade de medição contínua.

Quanto à medição de pressões e à sua evolução temporal, foram instalados nas secções restantes e atrás citadas, transdutores de pressão de marca KLAY, tipo CER -1000, de funcionamento electromagnético e para pressões máximas de 16 bar que, através do recurso a registadores da marca KIMO e do tipo KISTOCK KT200, permitirão o conhecimento da evolução desta variável nas diferentes secções e ao longo do tempo.

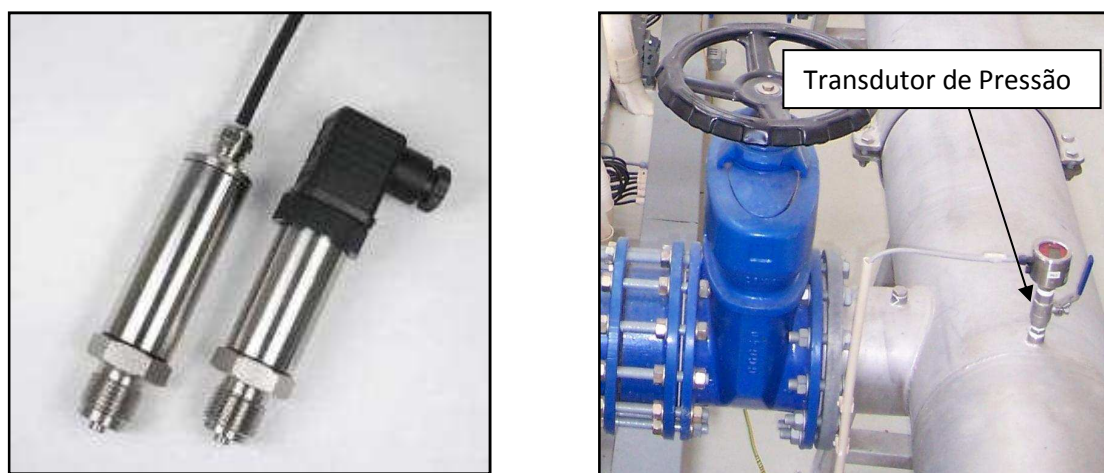


Figura 5.12 – Transdutores de Pressão. Caso da Secção 2 – Pressão na Conduta de Compressão



Figura 5.13 – Registadores Utilizados. Caso da Secção 2 – Registo da Pressão na Conduta de Compressão

Considerando todo o conjunto de situações atrás descritas, a Figura 5.14 apresenta, para um exemplo de um dos ensaios realizados, todo o conjunto de resultados de pressões registadas. Dela se pode retirar, ainda que apenas qualitativamente, os diferentes efeitos verificados nas várias situações simuladas de funcionamento.

Nos subcapítulos seguintes, de modo mais explícito, apresentam-se e discutem-se os mesmos resultados analisados em cada uma das situações de simulação propostas e correspondente ao mesmo ensaio.

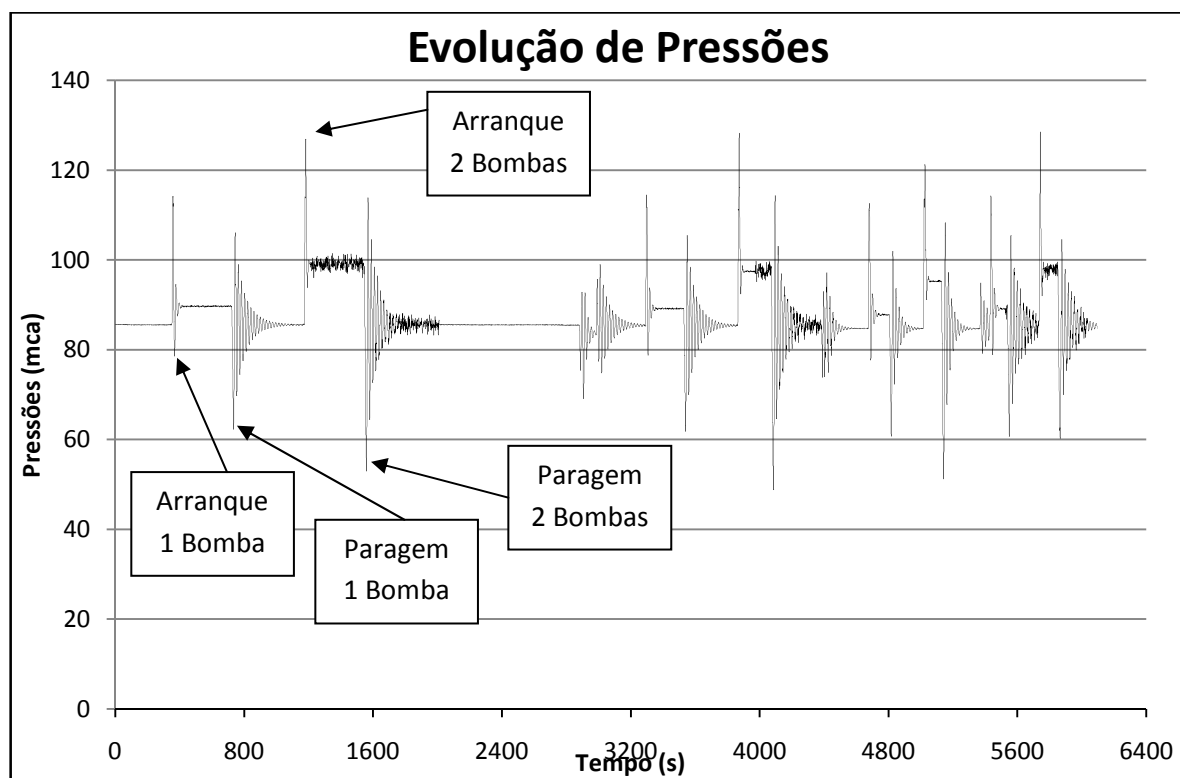


Figura 5.14 – Evolução de Pressões registadas ao longo de Ensaio Completo (secção 2)

### 5.3.1. RESULTADOS DAS EXPERIÊNCIAS REALIZADAS SEM FUGA

Para este tipo de experiência foram realizadas medições de caudal e de pressão nas secções já indicadas atrás e para as situações de exploração com um e dois grupos elevatórios, registando-se os efeitos resultantes da paragem do grupo elevatório devido à ocorrência do fenómeno de Choque Hidráulico.

Nas Figuras 5.15 e 5.16, são presentes a evolução do valor do caudal bombeado após a paragem do grupo elevatório ou dos grupos elevatórios consoante se está a analisar a situação de funcionamento com uma só bomba ou duas. Os registos foram realizados em intervalos sequenciais de 1 segundo.

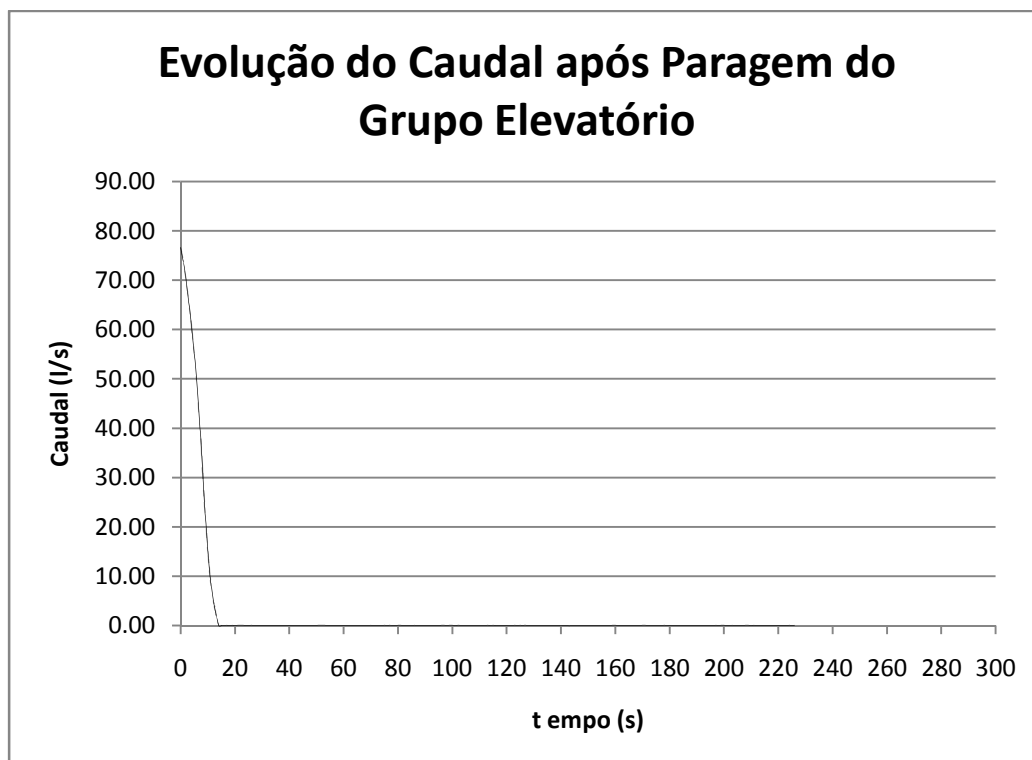


Figura 5.15 – Evolução do Caudal Bombeado após a paragem de um Grupo Elevatório

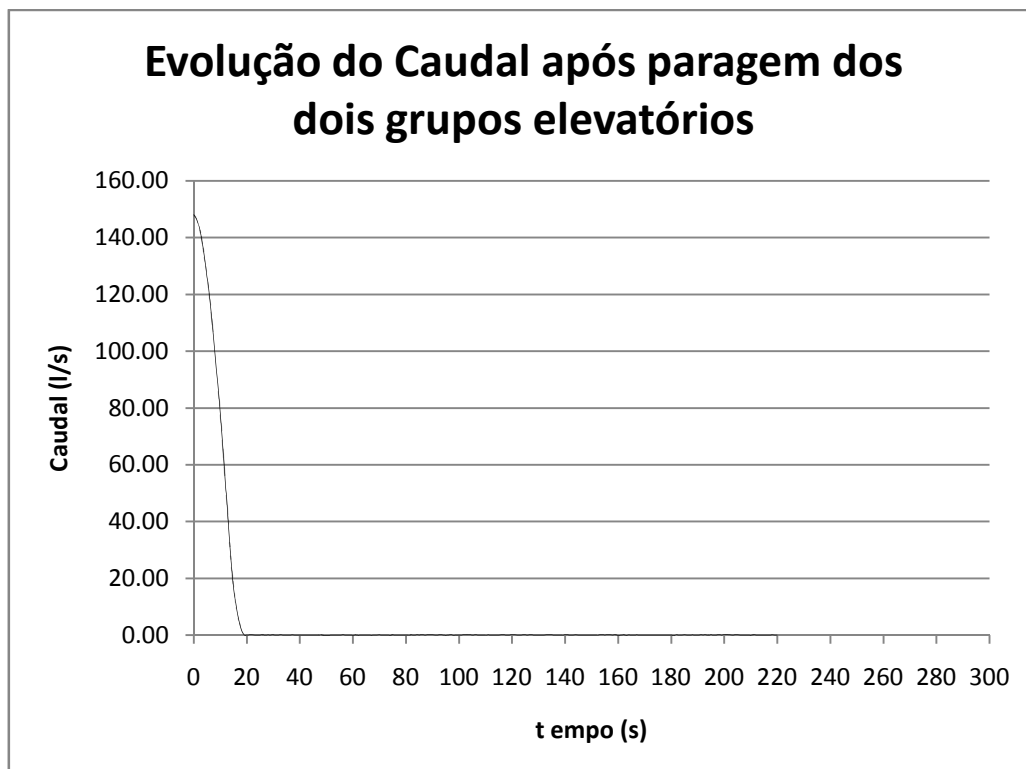


Figura 5.16 – Evolução do Caudal Bombeado após a paragem de dois Grupos Elevatórios

Pela análise dos gráficos destas duas figuras é possível concluir que o caudal bombeado se anula ao fim de, aproximadamente, 16 segundos e 19 segundos, respectivamente para o caso da situação de funcionamento de uma ou duas bombas.

Os transdutores de pressão e respectivos registadores utilizados nas secções 2, 3, 4 e 5 tiveram como objectivo registar os valores de pressão para a posterior calibração do modelo matemático desenvolvido. Estes foram registados no mesmo intervalo de tempo utilizado para as medições de caudal, ou seja, 1 segundo.

Para execução do programa de cálculo automático desenvolvido houve a necessidade de introduzir os “inputs” indispensáveis ao seu funcionamento e que se procurou traduzissem fielmente o funcionamento do sistema elevatório durante a ocorrência do fenómeno do Choque Hidráulico. No Anexo 2 ao presente relatório é presente uma listagem desses dados.

Depois de executado o programa e de obtidos os resultados calculados pelo mesmo, procedeu-se à comparação de resultados entre os valores medidos e os valores obtidos pelo modelo matemático.

Nessa sequência, nas Figuras 5.17 a 5.21 são apresentadas as evoluções das pressões, quer as medidas durante a realização da experiência quer as calculadas pelo modelo matemático para as secções 2 a 5 estudadas.

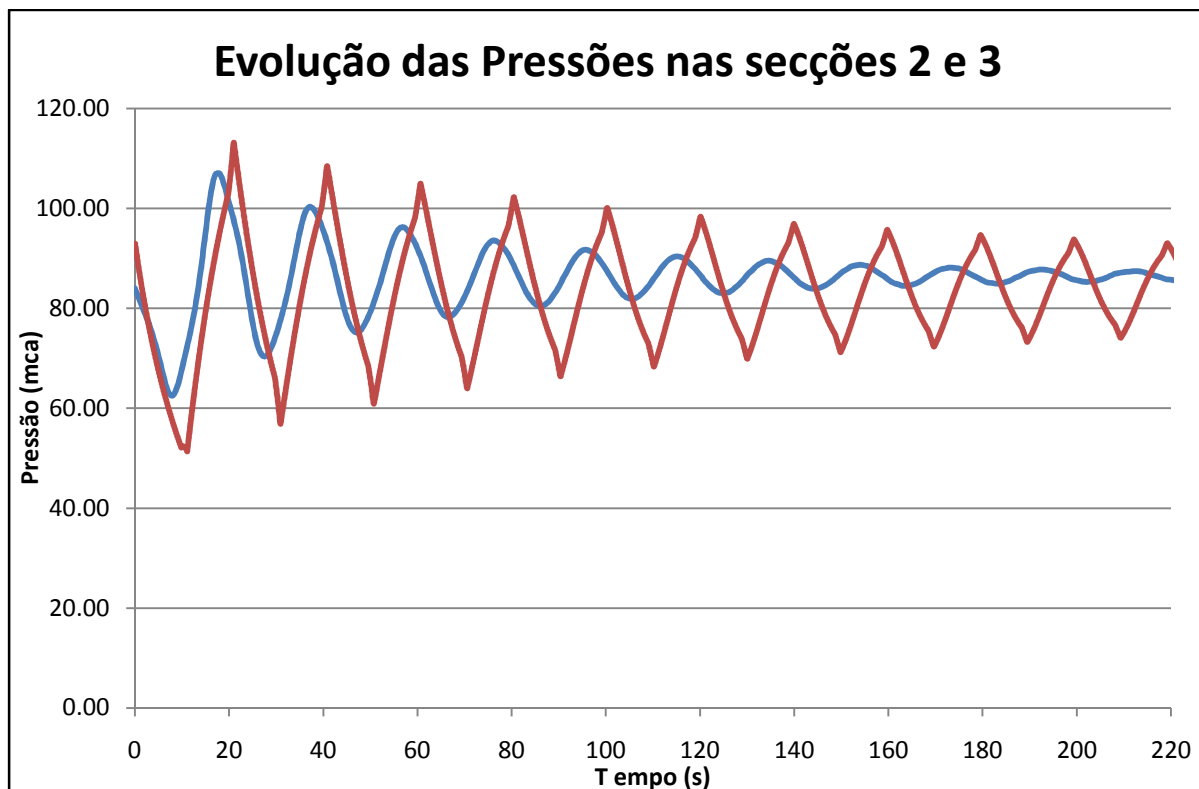


Figura 5.17 - Evolução de Pressões Medidas (a azul) e Calculadas pelo Modelo (a vermelho) - Secções 2 e 3 – após Paragem de um Grupo Elevatório

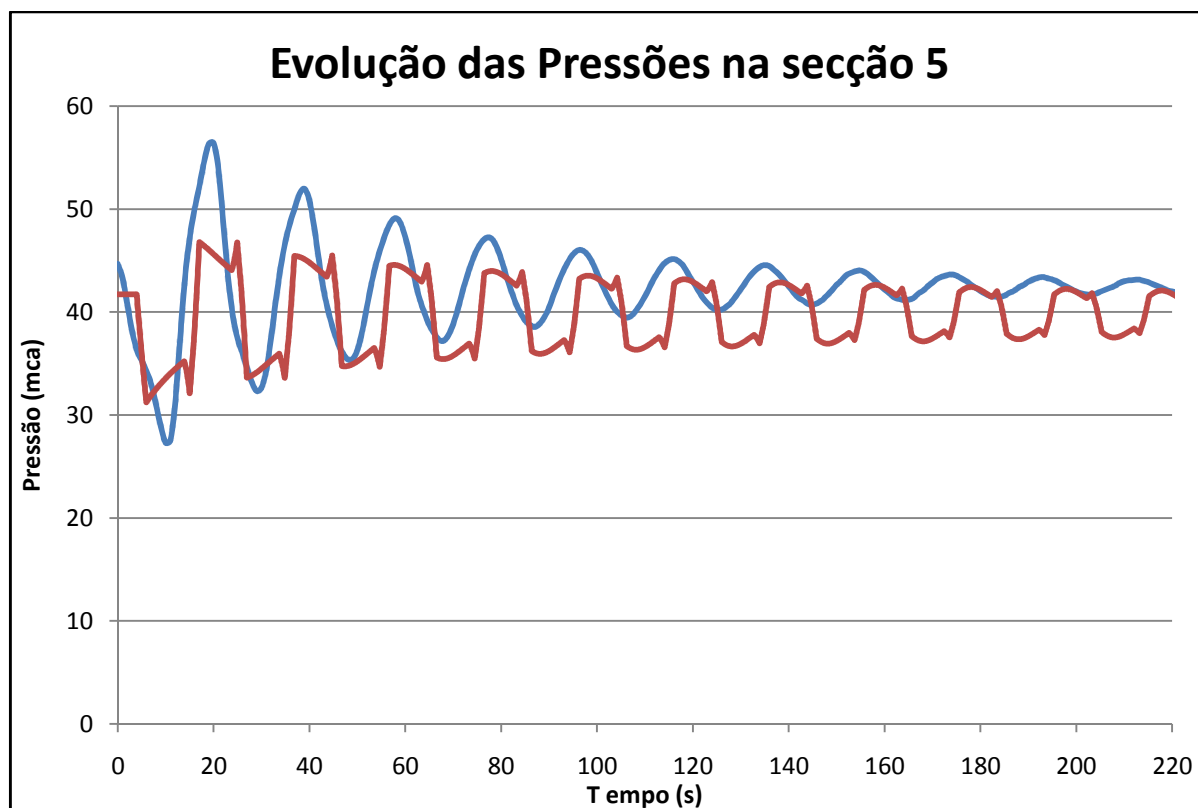


Figura 5.18 - Evolução de Pressões Medidas (a azul) e Calculadas pelo Modelo (a vermelho) – Secção 5 – após Paragem de um Grupo Elevatório

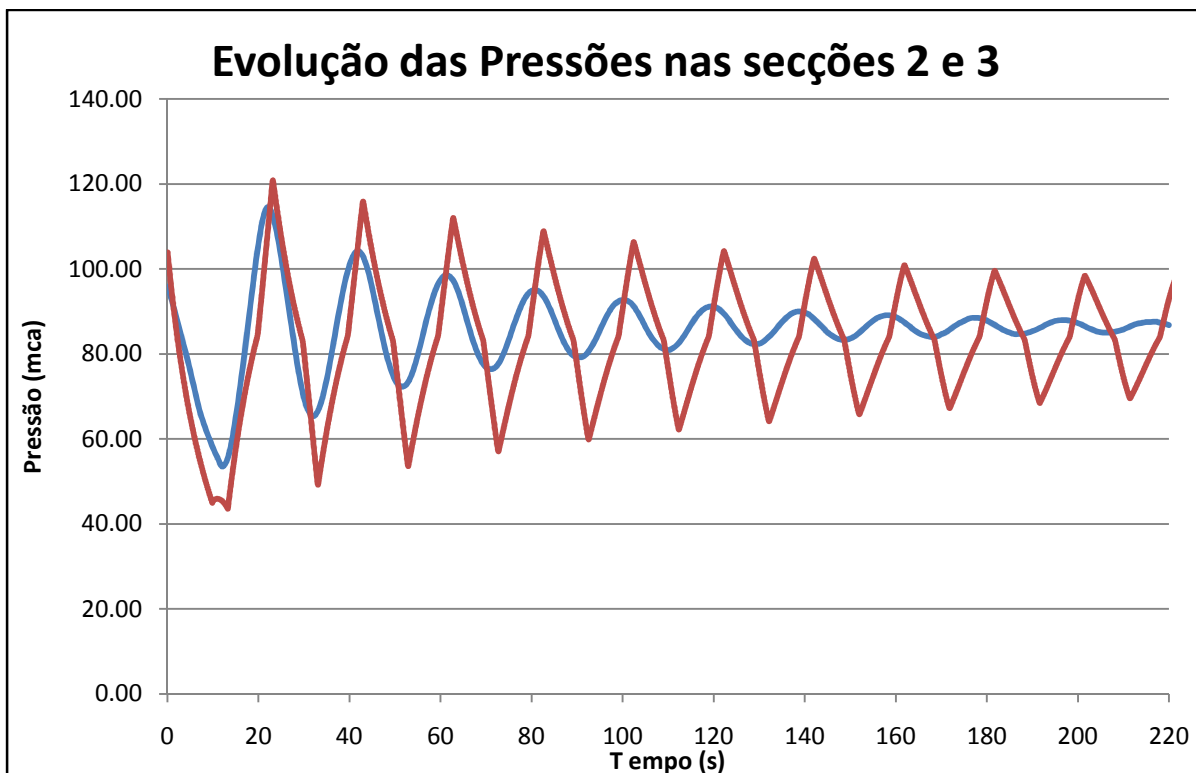


Figura 5.19 - Evolução de Pressões Medidas (a azul) e Calculadas pelo Modelo (a vermelho) – Secção 2 e 3 – após Paragem de dois Grupos Elevatórios

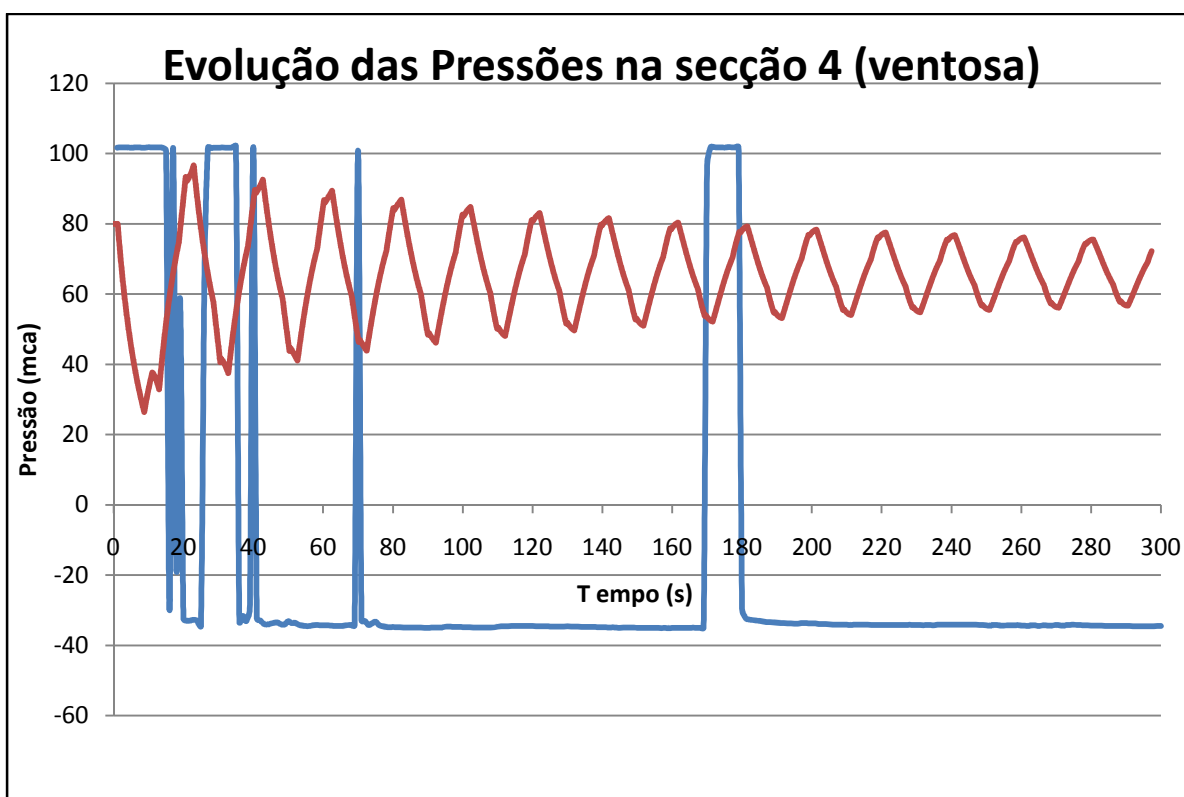


Figura 5.20 - Evolução de Pressões Medidas (a azul) e Calculadas pelo Modelo (a vermelho) – Secção 4 – após Paragem de dois Grupos Elevatórios

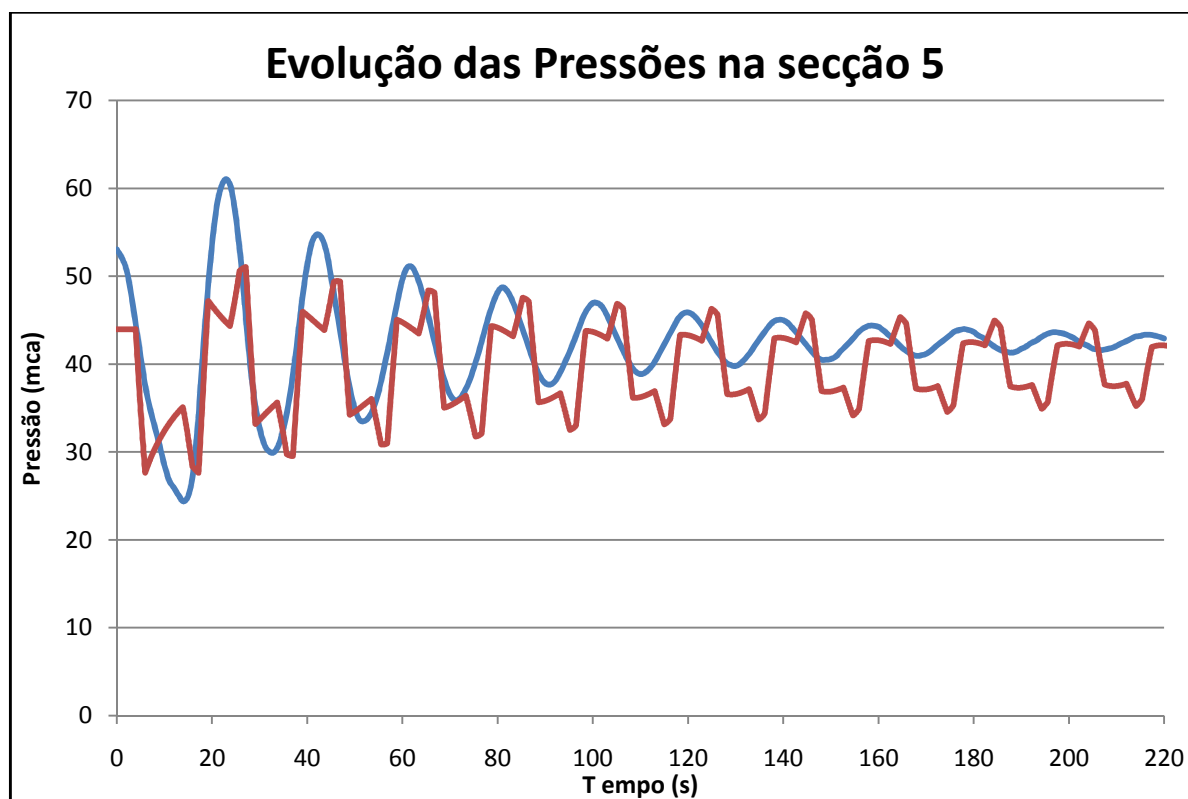


Figura 5.21 - Evolução de Pressões Medidas (a azul) e Calculadas pelo Modelo (a vermelho) – Secção 5 – após Paragem de dois Grupos Elevatórios

Numa primeira análise aos resultados expressos nestes gráficos, pode afirmar-se da inoportunidade na consideração da secção de medida junto da ventosa – a secção 4. Com efeito, o facto de ser uma zona da conduta em que acontecem fenómenos que não correspondem a um escoamento em meio contínuo, em resultado de ser uma zona da conduta onde se acumula ar, permite concluir da impossibilidade de se fazer uma comparação entre os resultados obtidos através do modelo e a realidade. Por isso, e face a este condicionalismo, foram abandonadas as medidas nesta secção nos outros casos em análise

Por outro lado e para as restantes secções, os gráficos em causa mostram uma relativa discrepância entre os valores medidos e os valores obtidos pelo modelo matemático para a secção em estudo. Com efeito e sobretudo os valores da variável pressão calculadas e medidas, demonstram variações, sobretudo nos picos, de algum significado, sendo sempre superiores no caso do valor das pressões obtidas através do modelo matemático.

Este facto é interpretado como devendo ser originado, essencialmente, pela não adequada definição da lei de paragem do grupo electrobomba definida no Modelo Matemático. Na realidade, este modelo considera como Lei de Paragem uma lei teórica baseada nos princípios de redução da velocidade de rotação do motor da bomba de modo livre, isto é, como se a bomba existisse apenas como bomba. Ora acontece, e tal só foi conhecido aquando da realização prática dos ensaios, que o Sistema Elevatório em causa e em particular os grupos elevatórios, dispõem de dispositivos de arranque e paragem de índole eléctrica que, para maior segurança, aumentam o tempo de paragem dos grupos elevatórios traduzindo-se, portanto, em menores valores de pressões.

A necessidade em considerar o presente trabalho num período de tempo limitado não permitiu que houvesse lugar a uma investigação mais profunda neste aspecto e a consideração da Lei de Paragem

real no programa. Contudo, foi possível obter do fabricante e instalador dos órgãos de controlo uma paragem que pode atingir os 20s.

Noutro contexto verifica-se que a partir do instante aproximado de 100 segundos começa a haver uma discrepância temporal entre os picos. Supõe-se que este efeito tem a ver com a mesma questão anterior, pelo que é de concluir que tem de ser estudada mais exaustivamente a Lei de Paragem dos grupos elevatórios, contribuindo para uma melhor aproximação entre valores medidos e simulados.

### 5.3.2. RESULTADOS DAS EXPERIÊNCIAS REALIZADAS COM FUGA

Para o estudo da possível ocorrência de uma fuga no sistema elevatório foram realizados seis ensaios: para uma fuga “pequena”, outra “média” e outra “grande” e para cada tipo de fuga nas situações de uma e duas bombas ligadas.

Para cada uma das situações foram registados os valores de pressão na secção 2 aquando da paragem dos grupos elevatórios. As diferentes respostas do sistema a esta situação estão presentes nas figuras 5.22 e 5.23 (para um e dois grupos elevatórios, respectivamente).

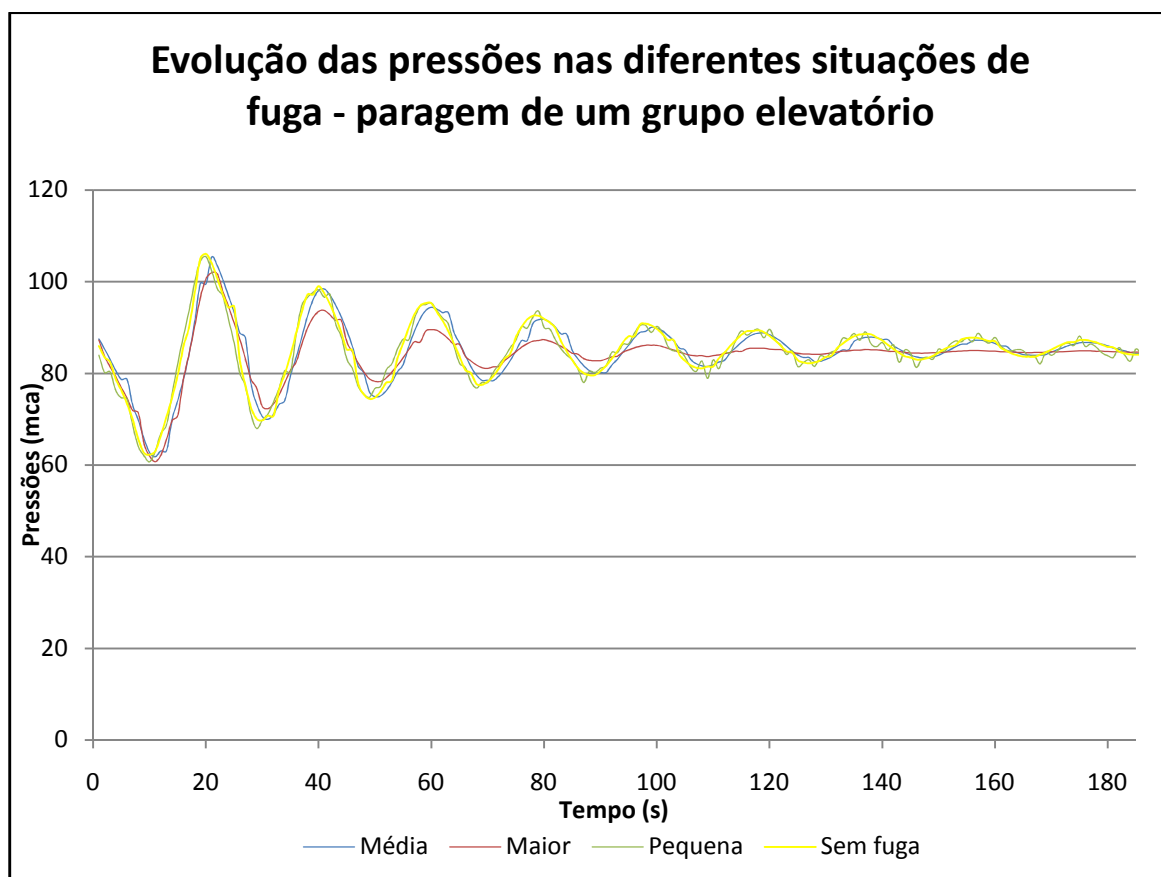


Figura 5.22 - Evolução de Pressões nas diferentes situações de fuga – Paragem de um Grupo Elevatório

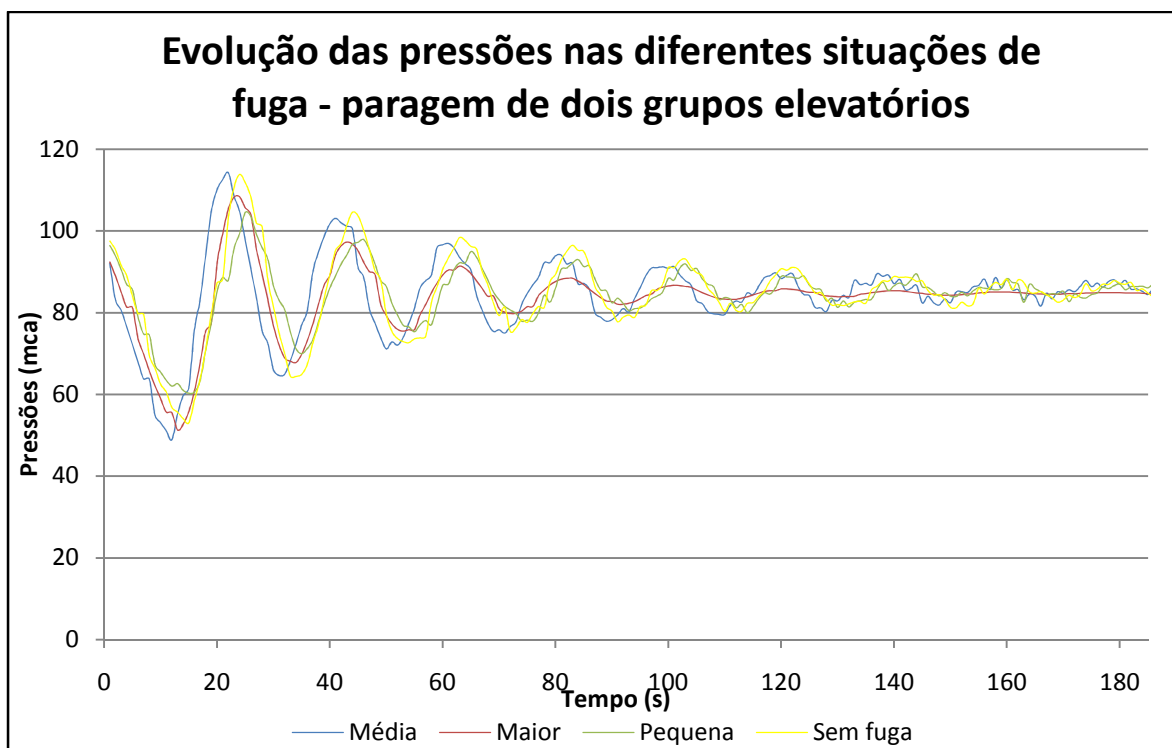


Figura 5.23 - Evolução de Pressões nas diferentes situações de fuga – Paragem de dois Grupos Elevatórios

Da análise destas Figuras é possível concluir que a flutuação de pressão é menos notória para o caso da fuga de maior caudal, como seria de esperar. E, também, que as flutuações máximas de pressão acontecem mais tarde, e notoriamente mais no caso de a instalação estar a funcionar com dois grupos elevatórios, para os casos das fugas menores.

Tal qual como na situação da inexistência de fuga, apresenta-se de seguida e de modo semelhante a análise das pressões nas secções 2, 3 e 5 da conduta, comparando os valores medidos aquando da ocorrência da menor das fugas simulada, e os valores simulados (com inclusão da fuga) pelo programa de cálculo – figuras 5.24 e 5.25.

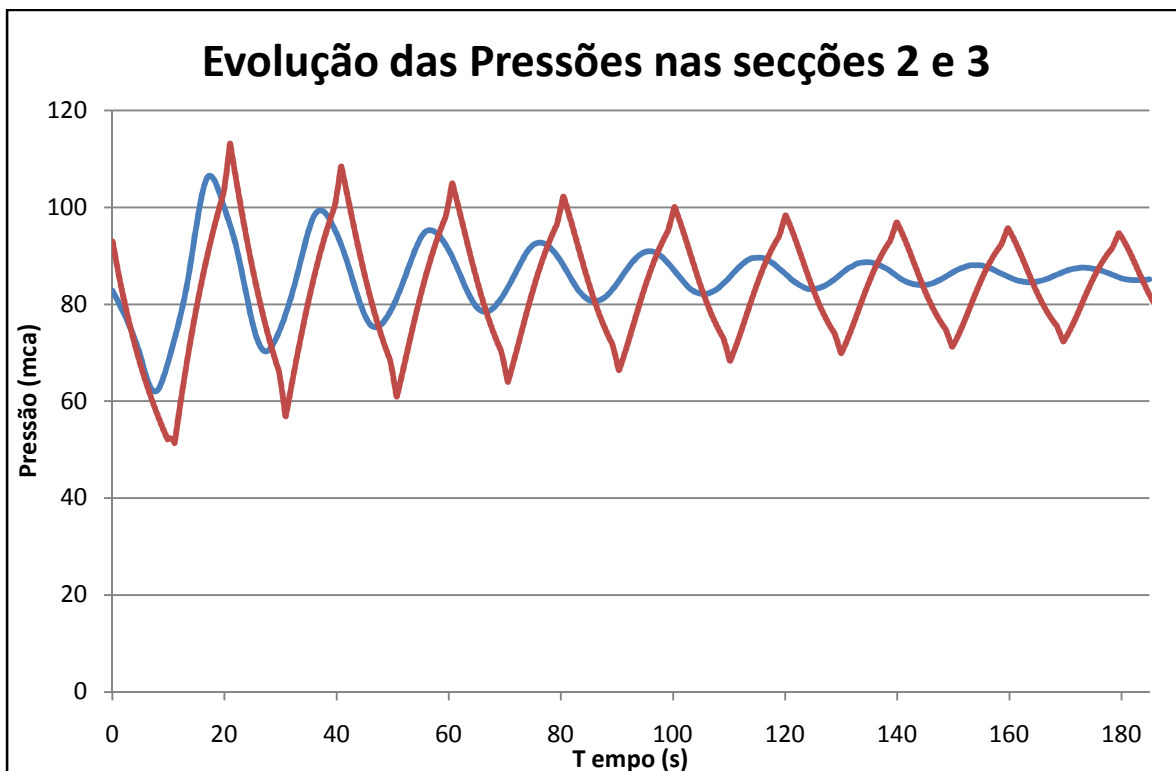


Figura 5.24 - Evolução de Pressões Medidas (a azul) e Calculadas pelo Modelo (a vermelho) – Secção 2 e 3 – após Paragem de um Grupo Elevatório, com simulação de Fuga

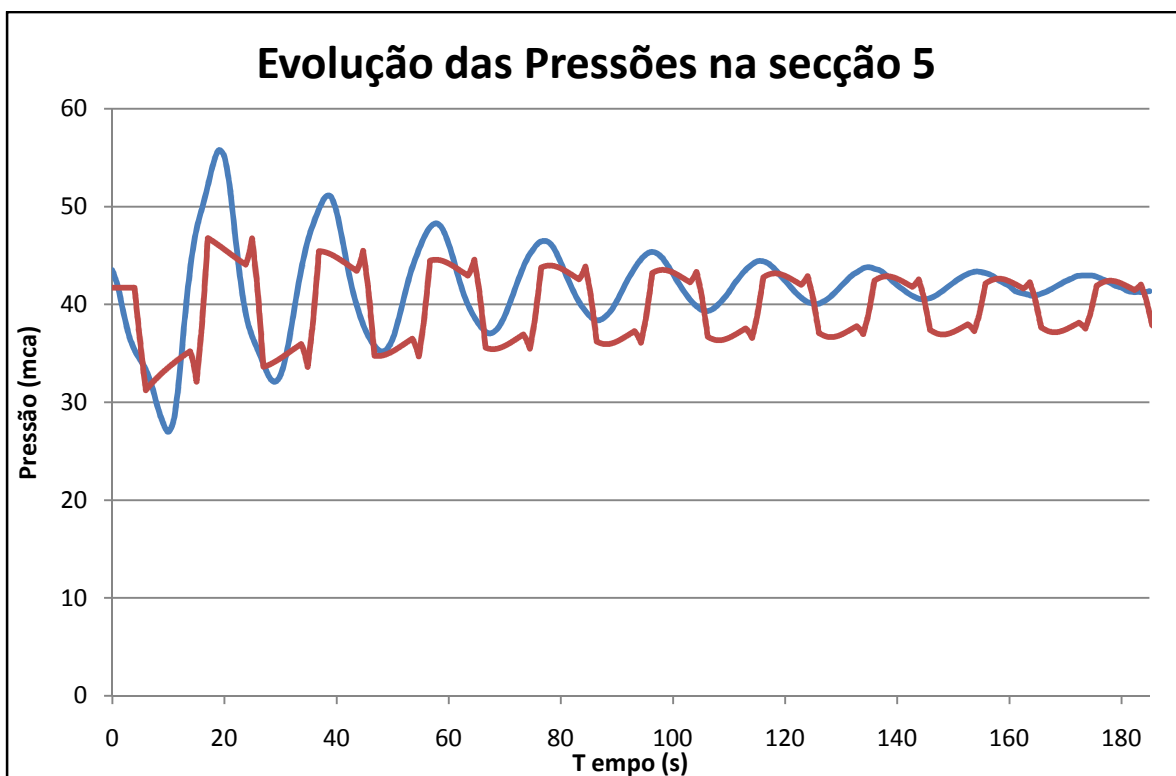


Figura 5.25 - Evolução de Pressões Medidas (a azul) e Calculadas pelo Modelo (a vermelho) – Secção 5 – após paragem de um Grupo Elevatório, com simulação de Fuga

Tal como para a situação simulada sem fuga de água, também nestes casos é possível observar uma disparidade entre os valores medidos e os valores simulados. As razões para se verificar tal situação são as mesmas que as definidas em 5.3.1 para a experiência sem fuga de água.

#### 5.3.2.1 Localização da Fuga de Água

Face aos condicionalismos verificados nos resultados obtidos e que apenas dão indicação da existência de uma eventual fuga, importa conhecer, mesmo que não exactamente, a secção onde a mesma está a ocorrer.

Para tal recorreu-se ao procedimento desenvolvido por Covas, D. (1998), baseado na obtenção do espectro de energia correspondente às variações de altura piezométrica verificadas durante os ensaios. Este é calculado a partir da transformada de Fourier do sinal medido, utilizando as funções de análise de sinal da linguagem de programação Matlab®.

Esta análise baseia-se, para além de outros parâmetros que não têm particular interesse neste caso, na relação entre as frequências de oscilação das ondas de choque provocadas pelo fenómeno do choque hidráulico com o comprimento total da conduta e a distância desde o ponto onde se verifica a fuga até à fronteira onde se provoca a alteração do escoamento, neste caso o grupo elevatório.

Assim, detectada a frequência correspondente à oscilação provocada pela fuga, ter-se-á que a distância aproximada,  $X_n$ , entre a localização da fuga e a fronteira é dada por:

$$X_n = \frac{a}{4f_n} \quad (5.1)$$

em que  $f_n$  é a frequência da oscilação ( $T^{-1}$ ) e  $a$  é a celeridade ( $LT^{-1}$ ). Esta frequência é uma harmónica da oscilação principal provocada pelo choque hidráulico. O número dessa harmónica,  $NH_n$ , é dado por:

$$NH_n = \frac{4Lf_n}{a} \quad (5.2)$$

em que  $L$  é o comprimento total da conduta (L).

No ensaio em causa, para a situação de uma bomba a funcionar, foi simulada uma fuga na conduta realizada por intermédio de uma descarga de fundo localizada na secção 6 (a 1012 m da secção dos grupos elevatórios). Com base nos dados obtidos pelos registadores para a secção 2 da conduta, foi aplicada a transformada de Fourier ao período compreendido entre  $t = 0$  s e  $t = 180$  s, tendo sido obtido o espectro de energia apresentado na figura 5.26 a).

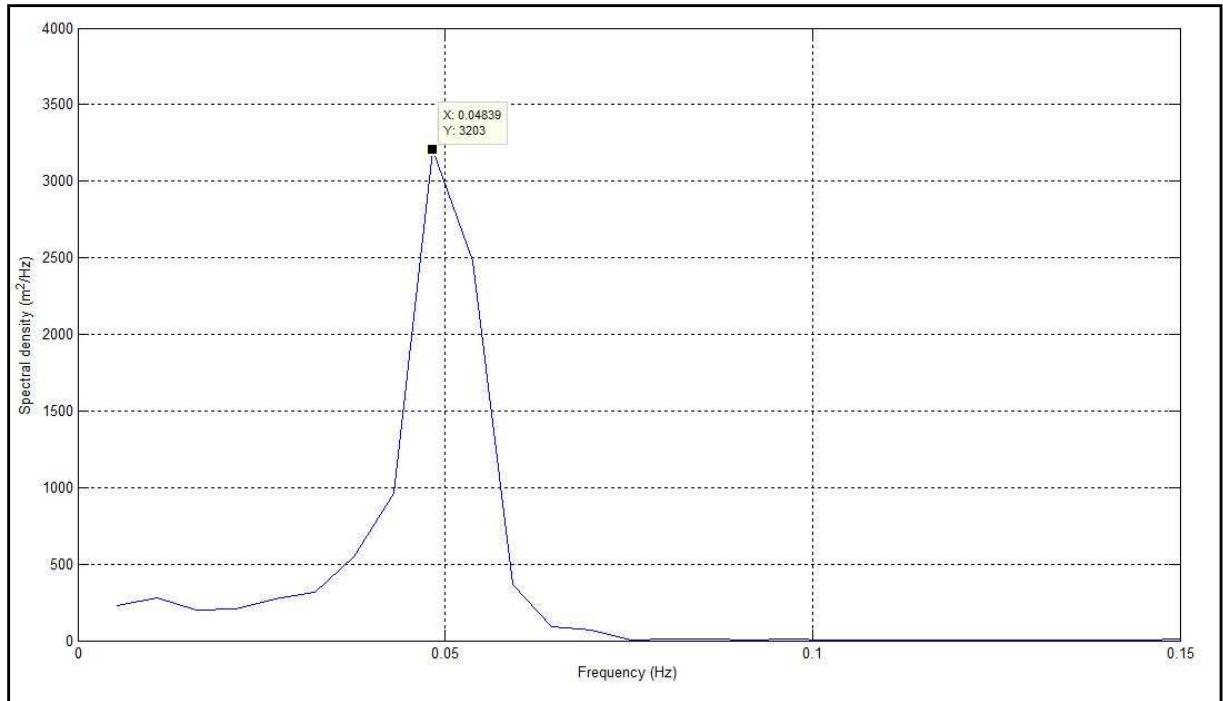


Figura 5.26 a) – Gráfico Densidade Espectral/Frequência para a situação de Fuga de Água após paragem de um Grupo Elevatório

Apesar de ser clara a harmónica fundamental (correspondente a uma frequência de 0.04839Hz), as restantes harmónicas apenas são detectáveis realizando uma reconfiguração das escalas do gráfico (para escala logarítmica) – figura 5.26 b).

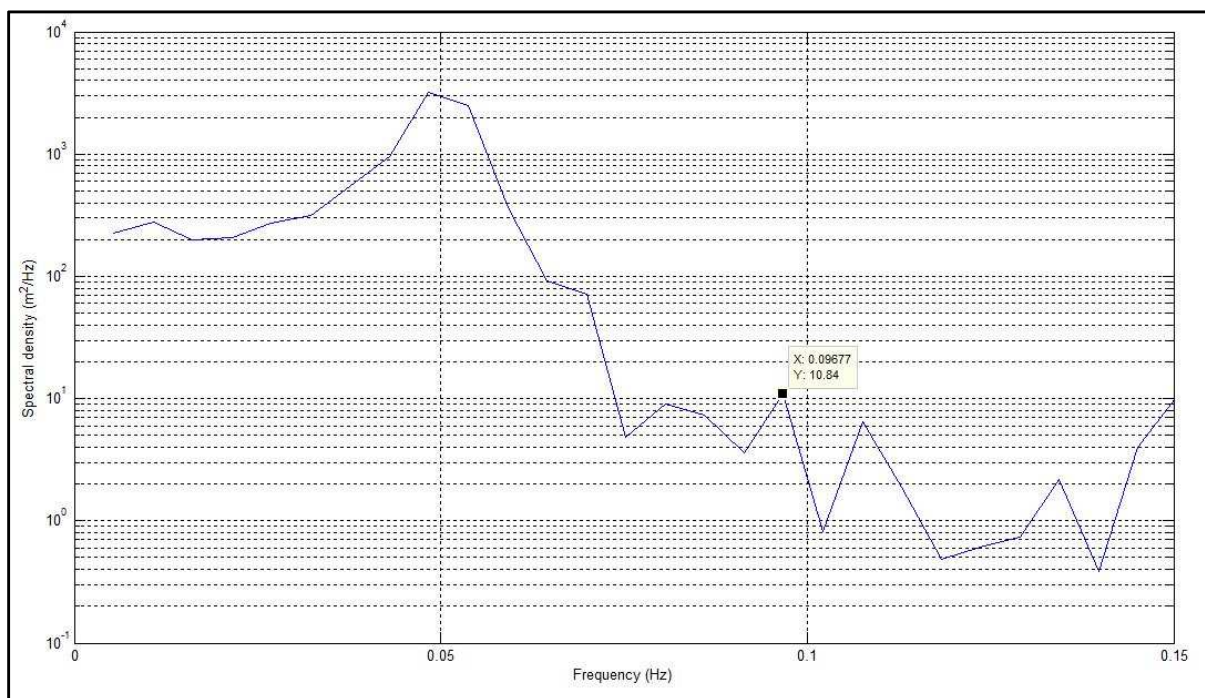


Figura 5.26 b) – Gráfico Densidade Espectral/Frequência para a situação de Fuga de Água após paragem de um Grupo Elevatório – escala logarítmica

É, então, notório que existe um novo “pico” no gráfico obtido para uma frequência de 0.09677 Hz, a que corresponde a 2ª Harmónica (pela expressão 5.1), valor que introduzido na expressão 5.2, indica que a distância da fuga simulada aos grupos elevatórios, é de 981m.

Este valor estimado é bastante aproximado ao real, aproximadamente 3% inferior.

É de salientar que eventuais erros de medição de pressões têm, obviamente, influência nos resultados e, nesta situação, a sensibilidade dos registadores pode revelar-se preponderante na localização mais precisa da fuga de água.

## 6

### CONCLUSÕES

O desenvolvimento do presente Projecto permitiu a criação de um algoritmo de cálculo, baseado no Método das Características, que possibilita o estudo do fenómeno do Choque Hidráulico. Em complemento, a sua aplicação tornou possível estudar a influência de uma fuga de água no normal funcionamento do sistema elevatório contemplando ainda a possibilidade de se aferir da posição da referida fuga.

Pretendeu-se que este algoritmo – aplicável em software Matlab® – fosse de fácil utilização, permitindo ao utilizador aplicá-lo com destreza em qualquer conduta elevatória que se pretenda estudar. Uma vez que a utilização do software Matlab® não está suficientemente alargada para se poder utilizar o algoritmo de cálculo de um modo abrangente, um trabalho futuro poderá visar a sua adaptação a um programa de cálculo com mais utilização no meio, possibilitando que o programa seja, assim, mais útil na exploração de Sistemas Elevatórios de Abastecimento de Água.

As potencialidades do software Matlab® podem ainda ser mais aprofundadas em desenvolvimentos futuros, pela aplicação de funções que permitam o aprimoramento do modelo desenvolvido.

Neste Projecto estudou-se a aplicabilidade do programa de cálculo a um exemplo de conduta elevatória. Por isso, pode afirmar-se, que o programa de cálculo carece de uma melhor afinação e calibração de modo a ser aplicável com mais segurança a qualquer outro sistema elevatório a ser estudado. Assim, dever-se-á, em futuras oportunidades, analisar mais sistemas elevatórios – de outras características que possibilitem ainda a utilização de mais secções de medição, aumentando assim a fiabilidade do modelo matemático a qualquer caso.

A discrepância entre os valores medidos e os valores calculados pelo programa de cálculo, pode ser explicada pela Lei de Paragem dos grupos elevatórios não estar a ser bem reproduzida no modelo (como já foi exposto no Capítulo 5.) e ainda pelo facto de as perdas de carga estarem a ser determinadas analiticamente por um modelo que eventualmente, não se coaduna totalmente com o sistema elevatório em estudo. Assim, sugere-se que em futuros aperfeiçoamentos deste projecto se faça uma aferição de qual a lei mais adequada para tradução das perdas de carga desenvolvidas. Estes dois aspectos constituem, assim, duas oportunidades de melhoria com vista a uma melhor compreensão do modelo e de uma melhor adequação aos casos concretos.

A localização de uma fuga simulada à custa da obtenção do Espectro de Energia do escoamento obtido a partir das Transformadas de Fourier do escoamento, permitiu concluir da necessidade em explorar muito mais esta situação. Com efeito e embora os resultados tenham sido encorajantes, a dificuldade

em visualizar e individualizar as harmónicas a seguir à principal obriga a ponderar em muito a correspondente exactidão desta situação.

Sob a forma de conclusão final, convém realçar o facto de se entender que o presente Projecto ter ficado um pouco aquém dos objectivos – eventualmente ambiciosos – pretendidos. Com efeito, a ideia inicial era mesmo de obter conclusões, se possível irrefutáveis e sólidas. Tal não foi totalmente conseguido. Como razões principais salientam-se as dificuldades de tempo e de meios na realização dos ensaios experimentais e, talvez, o curto tempo disponível. Contudo, fica a certeza que se realizou um passo em frente possibilitando a abertura de outros desenvolvimentos futuros.

Nesse sentido e dado que o presente estudo sobre condutas elevatórias já conheceu similares aplicações ao caso de condutas gravíticas em que se obteve resultados considerados satisfatórios, coloca-se a possibilidade de simular essa mesma situação invertendo – numa conduta elevatória, o sentido do escoamento, isto é, obrigando a elevatória a funcionar como gravítica, possibilitando que o reservatório de montante passasse a funcionar como o reservatório de jusante e vice-versa. Assim, estar-se-ia na presença de um sistema adutor gravítico, em que o estudo e a detecção de fugas se tem mostrado mais eficiente do que em sistemas elevatórios.

## BIBLIOGRAFIA

- Novais Barbosa, J. (1985). *Mecânica dos Fluidos e Hidráulica Geral, Volume 1 e 2*. Porto Editora, Porto.
- Farley, M., Trow, T. (2003). *Losses in water distribution networks*, IWA Publishing,
- Covas, D., (1998). *Detecção e Localização de Fugas em Redes de Distribuição de Água. Método da Análise Hidrodinâmica*. Dissertação para a obtenção de Grau de Mestre em Hidráulica e Recursos Hídricos, Universidade Técnica de Lisboa – Instituto Superior Técnico
- Pacheco Figueiredo, M. M. (1990). *Choque Hidráulico em Conduitas Elevatórias. Protecção com Reservatórios de Ar Comprimido*. Trabalho de síntese para Provas de Aptidão Pedagógica. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Regulamento Geral dos Sistemas Públicos e Prediais de Distribuição de Água e de Drenagem de Águas Residuais (2ª Edição) (1998). Rei dos Livros. Lisboa
- Almeida, B. (1982). *Manual de Protecção contra o Golpe de Aríete em Conduitas Elevatórias*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- Marques, J., Sousa, J. (2006). *Hidráulica Urbana. Sistemas de Abastecimento de Água*. Imprensa da Universidade. Coimbra.
- Coelho, S., Loureiro, D., Alegre, H. (2006). *Modelação e Análise de Sistemas de Abastecimento de Água – Série Guias Técnicos*. Instituto Regulador de Águas e Resíduos. Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- Almeida, B., Martins, S. (1999). *Controlo Hidráulico – Operacional de Sistemas Adutores*. Minerva do Comércio, Lisboa.
- Pacheco Figueiredo, M. M. (2007). *Escoamentos Variáveis em Pressão*. Apontamentos da disciplina de Sistemas de Abastecimento de Água do ano lectivo 2007/2008, 5º Ano da opção de Hidráulica do Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Avilez Valente, P. (2005). *Pré-Dimensionamento de um Reservatório de Ar Comprimido*. Apontamentos da disciplina de Hidráulica Urbana e Ambiental do Ano Lectivo 2006/2007, 4º Ano do Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Tentúgal Valente, J. (2004). *Apontamentos de Hidráulica Urbana e Ambiental*. Apontamentos da disciplina de Hidráulica Urbana e Ambiental do Ano Lectivo 2006/2007, 4º Ano do Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Camargo, L. (1991). *O golpe de aríete em condutos. Análise pelo Método das Características*. XVI Encontro de Engenheiros de Assistência Técnica. 7-11 de Outubro de 1991, Joiville/SC.
- [http://www.aguasdominhoelima.pt/sistema\\_abastecimento.htm#](http://www.aguasdominhoelima.pt/sistema_abastecimento.htm#) . 2008-05-26
- Controlo de Perdas de Água em Sistemas de Adução e Distribuição*. Acção de Formação. 6 de Junho de 2006, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.



# Anexo 1

**ALGORITMO DESENVOLVIDO NO PROGRAMA MATLAB®**

```
% ++++++
% Identificação das VARIÁVEIS utilizadas:
%

% alfa ..... Expoente da lei de estado do ar contido no RAC
%              (p_RAC,abs*V^alfa = constante).

% accb(1:3) ..... Vector dos parâmetros da curva característica
%                  do grupo elevatório para Q (m3/s) e Hb (m);
%                  accb(1)=A, accb(2)=B, accb(3)=C.

% arend(1:4) ..... Vector dos parâmetros da curva de rendimento
%                  (%) do grupo elevatório; arend(1)=aa,
%                  arend(2)=bb, arend(3)=cc, arend(4)=dd.

% beta ..... Expoente da lei de vazão da fuga de água:
%              Qfuga = (H-Zfuga)^beta

% cel ..... Variável com a celeridade (m/s) da conduta.

% comp ..... Variável com o comprimento (metros) total da
%              conduta.

% comp_lig ..... Comprimento (m) do tubo de ligação entre o RAC
%                  e a conduta principal.

% control_code ..... Parâmetro de controlo da existência de solução
%                     e do sinal das soluções:
%                     control_code = 0: não há solução (o argumento
%                     da raiz quadrada é nulo);
%                     control_code = 1: há uma solução positiva ou
%                     nula;
%                     control_code = 2: há duas soluções positivas
%                     ou nulas;
%                     control_code = -2: as duas soluções são
%                     negativas;

% control_grafico ..... Parâmetro de controlo da opção da geração de
%                        gráficos dos resultados da simulação:
%
%                        control_grafico = 1: traçado do perfil da
%                        conduta + linha de carga do escoamento
%                        permanente + envolventes da linha de carga;
%
%                        control_grafico = 2: traçado do perfil da
%                        conduta + linha de carga do escoamento
%                        permanente + variação da linha de carga
%                        durante a execução + envolventes da linha de
%                        carga.

% count ..... Variável auxiliar de "output" de diversas
%              funções do Matlab.

% dados ..... Vector auxiliar para receber a informação
%              numérica contida numa linha de um ficheiro de
%              dados e previamente lida pela variável
%              auxiliar "tline".
```

```
% diam ..... Variável com o diâmetro (mm) da conduta.
% diamm ..... Variável com o diâmetro (metros) da conduta.

% dif_q ..... Valor absoluto da diferença entre os valores
%              do caudal do ponto de funcionamento da
%              instalação em duas iterações consecutivas.

% dlig ..... Diâmetro (interior) do tubo de ligação do RAC
%              à conduta principal.

% dltt ..... "Delta t" (s) do incremento temporal do MdC
%              (dltt=dltx/cel).

% dltx ..... "Delta x" do MdC (dltx=comp/ndx).

% drac ..... Diâmetro (interior) do RAC.

% dtub ..... Diâmetro da tubeira.

% fase ..... Variável para a "fase" (segundos).

% fid ..... Variável com o número atribuído, na abertura,
%              ao ficheiro com os dados; este ficheiro é
%              aberto em modo de "leitura de texto" ('rt').

% fir ..... Variável com o número atribuído, na abertura,
%              ao ficheiro com os resultados; este ficheiro é
%              aberto em modo de "escrita de texto" ('wt').

% flnam_global ..... Variável com o nome global do problema (s/
%              extensão).

% f_maj_cont ..... Variável com o factor de majoração da perda de
%              carga contínua (usar 1.0 quando não for para
%              majorar).

% formato ..... Variável auxiliar para a definição de um
%              formato (p.e., o formato da partição numa
%              linha de dados).

% f1 ..... Parâmetro da curva característica da
%              instalação ( $f_1=8*L*f\_maj\_cont/g/\pi^2/D^5$ ).

% f2 ..... Parâmetro da curva característica da
%              instalação ( $f_2=8*k\_loc/g/\pi^2/D^4$ ).

% hjus ..... Variável com a carga hidráulica a jusante;
%              cota da superfície livre do reservatório
%              abastecido pela conduta elevatória, ou cota da
%              descarga superior neste reservatório.

% hb0_ccb ..... Variável com a altura manométrica do(s)
%              grupo(s) elevatório(s), no ponto de
%              funcionamento da instalação, calculada com a
```

```
%
                                CCB.

% hb0_cci ..... Variável com a altura manométrica do(s)
%                               grupo(s) elevatório(s), no ponto de
%                               funcionamento da instalação, calculada com a
%                               CCI.

% HH(i,j) ..... Matriz para guardar a carga hidráulica nos
%                               pontos e instantes da simulação pelo MdC
%                               (i=1,ninst; j=1,nsec).

% hmont ..... Variável com a carga hidráulica a montante;
%                               cota da superfície livre do reservatório que
%                               alimenta o(s) grupo(s) elevatório(s).

% input_file ..... Variável com o nome global do problema e
%                               extensão ".dat"; define o nome do ficheiro com
%                               os dados da conduta a estudar.

% iter_q ..... Contador do processo iterativo para a
%                               determinação do ponto de funcionamento da
%                               instalação elevatória.

% j0 ..... Variável com a perda de carga unitária do
%                               escoamento permanente (m/m).

% j0_mpkm ..... Variável com a perda de carga unitária do
%                               escoamento permanente (j0) expresso em m/km.

% k_loc ..... Variável com o coeficiente de perdas de carga
%                               localizadas; é a soma dos diversos "k_loc",
%                               admitindo que o diâmetro da conduta é
%                               constante (usar 0.0 quando não for para
%                               considerar).

% k_loc_jus ..... Variável com o coeficiente de perda de carga
%                               localizada na descarga no reservatório de
%                               jusante. Este valor adiciona a "k_loc" na
%                               quantificação das perdas de carga localizadas.

% k_loc_lig ..... Coeficiente de perda de localizada do tubo de
%                               ligação entre o RAC e a conduta principal; não
%                               inclui o efeito produzido pela tubeira que é
%                               considerado à parte.

% lambda ..... Variável com o factor de resistência da
%                               fórmula de Darcy-Weisbach para o cálculo da
%                               perda de carga unitária no escoamento uniforme
%                               em pressão; a calcular pela fórmula de
%                               Colebrook-White.

% lambda_1 ..... Lambda do trecho de conduta a montante da
%                               fuga de água.

% lambda_2 ..... Lambda do trecho de conduta a jusante da
%                               fuga de água.
```

```
% ndados ..... Variável para quantificar o número de
% elementos (dados) numa linha do ficheiro de
% dados; serve para a definição do formato da
% partição numa linha de dados.

% ndt ..... Número de incrementos temporais da integração
% em ordem ao tempo, ie, número de "delta t" do
% MdC.

% ndx ..... Número de trechos da conduta, ie, número de
% intervalos "delta x" do MdC.

% ninst ..... Número de instantes da integração em ordem ao
% tempo pelo MdC (ninst=1+ndt).

% nfase ..... Número de fases; variável que define o tempo
% de simulação: t_simul = nfase*fase;

% nsec ..... Número de secções do MdC (nsec=1+ndx).

% n_sec_fuga ..... Número da secção do MdC com fuga localizada;
% deverá ser maior que 1 e menor que 'ndx'+1
% (1 < n_sec_rac < ndx+1).

% n_sec_rac ..... Número da secção do MdC com RAC; deverá ser
% maior que 1 e menor que 'ndx'+1
% (1 < n_sec_rac < ndx+1).

% pd2 ..... Variável definidora da inércia do Grupo
% Elevatório (N.m^2).

% q_inicial ..... Variável com caudal correspondente ao ponto de
% funcionamento inicial da instalação elevatória
% (intersecção entre as CCB e CCI); início do
% processo iterativo de cálculo do ponto de
% funcionamento); o valor desta variável vai
% sendo modificado durante o processo iterativo.

% QF(i,1) ..... Vector dos caudais da fuga de água (Qfuga) nos
% instantes da simulação pelo MdC (i=1,ninst).

% QPFm(i,1) ..... Vector dos caudais a montante da secção
% interior do MdC com fuga de água (Qp,m) nos
% instantes da simulação pelo MdC (i=1,ninst);
% QPFm(i) = QQ(i,j) + QF(i).

% QPRm(i,1) ..... Vector dos caudais a montante da secção
% interior do MdC com RAC (Qp,m) nos instantes
da
% simulação pelo MdC (i=1,ninst);
% QPRm(i) = QQ(i,j) - QR(i).

% QQ(i,j) ..... Matriz para guardar o caudal nos pontos e
% instantes da simulação pelo MdC (i=1,ninst;
% j=1,nsec).
```

```
% QR(i,1) ..... Vector dos caudais no tubo de ligação do RAC à
%                conduta principal (Qrac) nos instantes da
%                simulação pelo MdC (i=1,ninst).

% q0 ..... Variável com caudal correspondente ao ponto de
%          funcionamento da instalação elevatória
%          (intersecção entre as CCB e CCI); o valor
%          desta variável vai sendo modificado durante o
%          processo iterativo.

% q0_lps ..... Caudal do ponto de funcionamento (q0) expresso
%              em l/s.

% q_fuga_0 ..... Caudal inicial de uma fuga localizada (m^3/s).

% npperfil ..... Número de pontos do perfil longitudinal da
%              conduta.

% output_file ..... Variável com o nome global do problema e
%                  extensão ".res"; define o nome do ficheiro
%                  texto de saída de resultados.

% rug ..... Variável com a rugosidade equivalente (mm) da
%          conduta.
% rugm ..... Variável com a rugosidade equivalente (m) da
%          conduta.

% rug_lig ..... Valor da rugosidade (m) no tubo de ligação.

% s ..... Variável auxiliar para a saída no monitor ou
%          para escrita em ficheiro de dados.

% titulo ..... Variável para ler o título do problema
%              estudar.

% tline ..... Variável auxiliar para onde é transferida cada
%            linha do ficheiro de dados que está a ser
%            lido.

% u0 ..... Velocidade (média) na conduta em regime normal
%          (em m/s).

% visc_cin ..... Variável com a viscosidade cinemática (m^2/s).

% v_a ..... Variável representativa do parâmetro do termo
%          em Q^2 da equação de 2º grau obtida pela
%          intersecção (analítica) entre as CCB e CCI.

% v_b ..... Variável representativa do parâmetro do termo
%          em Q^1 da equação de 2º grau obtida pela
%          intersecção (analítica) entre as CCB e CCI.

% v_c ..... Variável representativa do parâmetro do termo
%          em Q^0 da equação de 2º grau obtida pela
%          intersecção (analítica) entre as CCB e CCI.
```

```
% v_q1 ..... Variável com uma das 2 soluções da intersecção
%              (analítica) entre as CCB e CCI.

% v_q2 ..... Variável com uma das 2 soluções da intersecção
%              (analítica) entre as CCB e CCI.

% vel_ang_0 ..... Variável com a velocidade angular (rpm) do(s)
%              grupo(s) elevatório(s) em regime normal.

% VANG(i,1) ..... Vector da velocidade angular do grupo
%              elevatório(i=1,ninst).

% VR(i,1) ..... Vector do volume de ar no RAC nos sucessivos
%              instantes (i=1,ninst).

% XZ(i,j) ..... Matriz com o perfil longitudinal da conduta
%              (i=1:npperfil, j=1,2); XZ(i,1): distância à
%              origem; XZ(i,2): cota topográfica.

% xymdc(i,j) ..... Matriz com as distâncias à origem (m) e as
%              cotas topográficas (m) das secções do
%              MdC;(i=1,2, j=1:nsec); xymdc(1,j): distância à
%              origem; xymdc(2,j): cota topográfica.

% zmax ..... Cota do topo do RAC; nível máximo da água no
%              interior do RAC.

% zmin ..... Cota do fundo do RAC; nível mínimo da água no
%              interior do RAC.

% ZR(i,1) ..... Vector do nível de ar no RAC nos sucessivos
%              instantes (i=1,ninst).

% zrac_0 ..... Cota da superfície livre da água no interior
%              do RAC durante o regime permanente.

%
% FIM da identificação das VARIÁVEIS utilizadas
% ++++++
% ++++++
% Identificação das FUNÇÕES e PROGRAMAS utilizados:

% calllib ..... Call function in external library. É uma
%              FUNÇÃO do MATLAB.

% eq2grau ..... Função para o cálculo das soluções de uma
%              equação de 2º grau ( $a*x^2+b*x+c=0$ ); função
%              declarada no programa 'eq2grau.m'.

%
% FIM da Identificação das FUNÇÕES e PROGRAMAS utilizados:
% ++++++

% Procedimentos iniciais
```

```
clear all;                % Limpar da memória todas as variáveis.

fclose('all');            % Fechar todos os ficheiros que possam ter ficado
                           % abertos.

tic;                      % Início da contagem do tempo para eventual
                           % acompanhamento da execução do algoritmo.

echo off;                 % Desligar o "report" de ecrã do Matlab.

clc;                      % Limpar o ecrã.

% ::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::

% Abertura do(s) ficheiro(s) de dados e resultados
%
%
% a partir do programa:

%flnam_global = 'elevatoria';    % Definição do nome do problema a
estudar                          % (s/ extensão).

% a partir do teclado:
%
% flnam_global = input('Nome do problema? ','s');

% Concatenar o nome do problema com as extensões ".dat" ".res"

input_file  = strcat(flnam_global, '.dat');
output_file = strcat(flnam_global, '.res');

% Abrir os ficheiros de dados e de resultados
%
% A letra "t" a seguir à permissão "r" ou "w" é para definir que é
% em modo texto; por defeito é em modo binário ('r' ou 'w')

fid = fopen(input_file, 'rt');    % Abrir o ficheiro de dados do problema.
fir = fopen(output_file, 'wt');   % Abrir o ficheiro de resultados.

% .....
% Leitura do ficheiro de dados (e escrita dos mesmos no ficheiro de
% resultados)

% Leitura do nome do problema

fgetl(fid);
titulo = fgetl(fid);
fgetl(fid);

% Enviar para o monitor e ficheiro de dados (*.res)
```

```
disp(' ');
fprintf(1,'Título do problema: %s\n',titulo);

fprintf(fir,'Título do problema: %s\n',titulo);

% .....
% Leitura do Comprimento (m), Diâmetro (mm), Rugosidade (mm)

fgetl(fid);
tline = fgetl(fid);
fgetl(fid);
ndados = 3;
formato = '%g';
for idados = 2:ndados
    formato = strcat(formato, ' %g');
end
dados = sscanf(tline,formato);
% dados = sscanf(tline, '%g %g %g');
comp = dados(1); diam = dados(2); rug = dados(3);
diamm = diam/1000; rugm = rug/1000;
clear formato dados;

% Enviar para o monitor e ficheiro de dados (*.res)

fprintf(1,'\n');
fprintf(1,'Comprimento da conduta: %g m\n',comp);
fprintf(1,'Diâmetro da conduta: %g mm\n',diam);
fprintf(1,'Rugosidade da conduta: %g mm\n',rug);

fprintf(fir,'\n');
fprintf(fir,'Comprimento da conduta: %g m\n',comp);
fprintf(fir,'Diâmetro da conduta: %g mm\n',diam);
fprintf(fir,'Rugosidade da conduta: %g mm\n',rug);

% .....
% Leitura do perfil longitudinal da conduta

fgetl(fid);
fgetl(fid);

% Leitura do número de pontos do perfil da conduta (npperfil)

tline = fgetl(fid);
formato = '%d';
dados = sscanf(tline,formato);
npperfil = dados(1);
clear formato dados;

% Leitura das coordenadas X(m), Z(m) para a matriz XZ(npperfil,2)

fgetl(fid);
ndados = 2;
formato = '%g';
for idados = 2:ndados
```

```
    formato = strcat(formato, ' %g');
end

% Iniciar com ZEROS a matriz com as coordenadas do perfil longitudinal

XZ = zeros(npperfil,2);

% Leitura das coordenadas

for np = 1:npperfil
    tline = fgetl(fid);
    XZ(np,:) = sscanf(tline,formato);
end

fgetl(fid);          % Leitura do separador

% Enviar para o monitor e ficheiro de dados (*.res)

fprintf(1, '\n');
fprintf(fir, '\n');

fprintf(1, 'Número de pontos do perfil longitudinal da conduta: %d
pontos\n', npperfil);
% count = fprintf(fir, 'Número de pontos do perfil longitudinal da conduta:
%d pontos\n', npperfil);

fprintf(1, '\n');
fprintf(1, 'Perfil longitudinal da conduta:\n');
fprintf(fir, 'Perfil longitudinal da conduta (número de pontos: %d)\n', ...
        npperfil);

fprintf(1, '    X(m)      Z(m)\n');
fprintf(fir, '    X(m)      Z(m)\n');

for np = 1:npperfil
    fprintf(1, '%7.1f %7.1f\n', XZ(np,:));
    fprintf(fir, '%7.1f %7.1f\n', XZ(np,:));
end

% .....
% Leitura dos dados definidores do desnível geométrico: Hmontante (hmont) e
% Hjusante (hjus).

fgetl(fid);
fgetl(fid);
tline = fgetl(fid);
fgetl(fid);
ndados = 2;
formato = '%g';
for idados = 2:ndados
    formato = strcat(formato, ' %g');
end
dados = sscanf(tline, formato);
hmont = dados(1); hjus = dados(2);
clear formato dados;
```

```
% Enviar para o monitor e ficheiro de dados (*.res)

fprintf(1, '\n');
fprintf(1, 'Definição do desnível geométrico\n');
fprintf(1, 'Hmontante: %7.2f m\n', hmont);
fprintf(1, 'Hjusante: %7.2f m\n', hjus);

fprintf(fir, '\n');
fprintf(fir, 'Definição do desnível geométrico\n');
fprintf(fir, 'Hmontante: %7.2f m\n', hmont);
fprintf(fir, 'Hjusante: %7.2f m\n', hjus);

% .....
% Leitura dos parâmetros quantificadores das perdas de carga localizadas
% ("f_maj_cont", "k_loc" e "k_loc_jus").

fgetl(fid);
fgetl(fid);
tline = fgetl(fid);
formato = '%g';
dados = sscanf(tline, formato);
f_maj_cont = dados(1);
clear formato dados;

fgetl(fid);
tline = fgetl(fid);
formato = '%g';
dados = sscanf(tline, formato);
k_loc = dados(1);
clear formato dados;

fgetl(fid);
tline = fgetl(fid);
fgetl(fid);
formato = '%g';
dados = sscanf(tline, formato);
k_loc_jus = dados(1);
clear formato dados;

% Enviar para o monitor e ficheiro de dados (*.res)

fprintf(1, '\n');
fprintf(1, 'Majoração da perda de carga contínua\n');
fprintf(1, 'Factor de majoração: %5.2f \n', f_maj_cont);
fprintf(1, '\n');
fprintf(1, 'Perdas de carga localizadas (diâmetro constante)\n');
fprintf(1, 'Coeficiente (K_loc): %5.2f \n', k_loc);
fprintf(1, 'Coeficiente (K_loc_jus): %5.2f \n', k_loc_jus);

fprintf(fir, '\n');
fprintf(fir, 'Majoração da perda de carga contínua\n');
fprintf(fir, 'Factor de majoração: %5.2f \n', f_maj_cont);
fprintf(fir, '\n');
fprintf(fir, 'Perdas de carga localizadas (diâmetro constante)\n');
fprintf(fir, 'Coeficiente (K_loc): %5.2f \n', k_loc);
```

```
fprintf(fir,'Coeficiente (K_loc_jus): %5.2f \n',k_loc_jus);

% .....
% Leitura da viscosidade cinemática

fgetl(fid);
tline = fgetl(fid);
fgetl(fid);
ndados = 1;
formato = '%g';
for idados = 2:ndados
    formato = strcat(formato,' %g');
end
dados = sscanf(tline,formato);
visc_cin = dados(1);
clear formato dados;

% Enviar para o monitor e ficheiro de dados (*.res)

fprintf(1,'\n');
fprintf(1,'Viscosidade cinemática: % 5.2e m^2/s\n',visc_cin);

fprintf(fir,'\n');
fprintf(fir,'Viscosidade cinemática: % 5.2e m^2/s\n',visc_cin);

% .....
% Leitura dos parâmetros da CCB (N0, A, B, C)

fgetl(fid);
fgetl(fid);
tline = fgetl(fid);
fgetl(fid);
ndados = 4;
formato = '%g';
for idados = 2:ndados
    formato = strcat(formato,' %g');
end
dados = sscanf(tline,formato);
% dados = sscanf(tline, '%g %g %g %g');
vel_ang_0 = dados(1);
accb(1) = dados(2); accb(2) = dados(3); accb(3) = dados(4);
clear formato dados;

% Enviar para o monitor e ficheiro de dados (*.res)

fprintf(1,'\n');
fprintf(1,'Curva característica do(s) grupo(s) elevatório(s)\n');
fprintf(1,'(Hb = AN^2+BNQ+CQ^2; Hb:m; Q:m3/s)\n');
fprintf(1,' No: %7.1f rpm\n',vel_ang_0);
fprintf(1,' A : %8.5e\n',accb(1));
fprintf(1,' B : %8.5e\n',accb(2));
fprintf(1,' C : %8.5e\n',accb(3));

fprintf(fir,'\n');
```

```
fprintf(fir,'Curva característica do(s) grupo(s) elevatório(s)\n');
fprintf(fir,'(Hb = AN^2+BNQ+CQ^2; Hb:m; Q:m3/s)\n');
fprintf(fir,' No: %7.1f rpm\n',vel_ang_0);
fprintf(fir,' A : %+8.5e\n',accb(1));
fprintf(fir,' B : %+8.5e\n',accb(2));
fprintf(fir,' C : %+8.5e\n',accb(3));

% .....
% Leitura dos parâmetros da curva de rendimento do grupo elevatório (N0, A,
% B, C)

fgetl(fid);
fgetl(fid);
tline = fgetl(fid);
fgetl(fid);
ndados = 4;
formato = '%g';
for idados = 2:ndados
    formato = strcat(formato, ' %g');
end
dados = sscanf(tline,formato);
% dados = sscanf(tline, '%g %g %g %g');
arend(1) = dados(1); arend(2) = dados(2);
arend(3) = dados(3); arend(4) = dados(4);
clear formato dados;

% Enviar para o monitor e ficheiro de dados (*.res)

fprintf(1,'\n');
fprintf(1,'Curva de rendimento do(s) grupo(s) para No\n');
fprintf(1,'(rend(%%) = aa*Q^3+bb*Q^2+cc*Q+dd; Q:m3/s)\n');
fprintf(1,' aa: %+8.5e\n',arend(1));
fprintf(1,' bb: %+8.5e\n',arend(2));
fprintf(1,' cc: %+8.5e\n',arend(3));
fprintf(1,' dd: %+8.5e\n',arend(4));

fprintf(fir,'\n');
fprintf(fir,'Curva de rendimento do(s) grupo(s) para No\n');
fprintf(fir,'(rend(%%) = aa*Q^3+bb*Q^2+cc*Q+dd; Q:m3/s)\n');
fprintf(fir,' aa: %+8.5e\n',arend(1));
fprintf(fir,' bb: %+8.5e\n',arend(2));
fprintf(fir,' cc: %+8.5e\n',arend(3));
fprintf(fir,' dd: %+8.5e\n',arend(4));

% .....
% Leitura do parâmetro definidor da inércia do grupo elevatório (PD2)

fgetl(fid);
fgetl(fid);
tline = fgetl(fid);
fgetl(fid);
ndados = 1;
formato = '%g';
for idados = 2:ndados
    formato = strcat(formato, ' %g');
```

```

end
dados = sscanf(tline,formato);
pd2 = dados(1);
clear formato dados;

% Enviar para o monitor e ficheiro de dados (*.res)

fprintf(1,'\n');
fprintf(1,'Inércia do(s) grupo(s) elevatório(s)\n');
fprintf(1,'PD2: % 5.2f N.m^2\n',pd2);

fprintf(fir,'\n');
fprintf(fir,'Inércia do(s) grupo(s) elevatório(s)\n');
fprintf(fir,'PD2: % 5.2f N.m^2\n',pd2);

% .....
% Dados para o estudo do choque hidráulico

fprintf(1,'\n');
fprintf(1,'.....\n');
fprintf(1,'Outros dados para o estudo do Choque Hidráulico\n');

fprintf(fir,'\n');
fprintf(fir,'.....\n');
fprintf(fir,'Outros dados para o estudo do Choque Hidráulico\n');

% .....
% Leitura da Celeridade (m/s)

fgetl(fid);
tline = fgetl(fid);
fgetl(fid);
ndados = 1;
formato = '%g';
for idados = 2:ndados
    formato = strcat(formato,' %g');
end
dados = sscanf(tline,formato);
% dados = sscanf(tline, '%g');
cel = dados(1);
clear formato dados;

% Enviar para o monitor e ficheiro de dados (*.res)

fprintf(1,'\n');
fprintf(1,'Celeridade: %g m/s\n',cel);

fprintf(fir,'\n');
fprintf(fir,'Celeridade: %g m/s\n',cel);

% .....
% Leitura do número de trechos da conduta (ndx), ie, nº de "delta x" do
% Método das Características

```

```

fgetl(fid);
tline = fgetl(fid);
fgetl(fid);
formato = '%d';
dados = sscanf(tline,formato);
ndx = dados(1);
clear formato dados;

% Enviar para o monitor e ficheiro de dados (*.res)

fprintf(1,'\n');
fprintf(1,'Divisão da conduta para o Método');
fprintf(1,' das Características (MdC): %d trechos\n',ndx);

fprintf(fir,'\n');
fprintf(fir,'Divisão da conduta para o Método');
fprintf(fir,' das Características (MdC): %d trechos\n',ndx);

% .....
% Determinação das cotas topográficas nas secções do Método das
% Características (MdC)

nsec = 1 + ndx;                % Cálculo do número de secções do MdC.

dltx=comp/ndx;                % Cálculo do "delta x" do MdC.

% Percorrer todas as secções do MdC

xymdc = zeros(2,nsec);        % Iniciar a matriz com as coordenadas
                                % das secções do MdC.

% Definir coordenadas da primeira secção do MDC (porque não é abrangida
% pelo ciclo ns=2:nsec)

% xymdc(1,1) = XZ(1,1);
% xymdc(1,2) = XZ(1,2);

xymdc(1,1) = XZ(1,1);
xymdc(2,1) = XZ(1,2);

for ns = 2:nsec

    xymdc(1,ns) = (ns-1)*dltx;    % Cálculo da distância à origem.

% Procurar o trecho do perfil longitudinal onde se localiza a secção do
% MdC e calcular por interpolação linear a cota topográfica.

    for np = 2:npperfil

        if ( xymdc(1,ns) > XZ(np-1,1) && xymdc(1,ns) <= XZ(np,1) )

            xymdc(2,ns) = (XZ(np,2)-XZ(np-1,2)) / (XZ(np,1)-XZ(np-1,1)) ...
                * (xymdc(1,ns)-XZ(np-1,1)) + XZ(np-1,2);

```

```
        np = npperfil;          % Abreviar o ciclo!

    end

end

end

% Enviar para o monitor e ficheiro de dados (*.res)

fprintf(1, '\n');
fprintf(fir, '\n');

fprintf(1, 'Perfil longitudinal das secções do MdC ');
fprintf(1, '(número de secções: %d)\n', nsec)
fprintf(fir, 'Perfil longitudinal das secções do MdC ');
fprintf(fir, '(número de secções: %d)\n', nsec);

fprintf(1, '    X(m)        Z(m)\n');
fprintf(fir, '    X(m)        Z(m)\n');

for ns = 1:nsec
    fprintf(1, '%7.1f %7.1f\n', xymdc(:, ns));
    fprintf(fir, '%7.1f %7.1f\n', xymdc(:, ns));
end

% .....
% Leitura das características da Reservatório de Ar Comprimido (RAC)

fgetl(fid);
fgetl(fid);
tline = fgetl(fid);
ndados = 1;
formato = '%g';
for idados = 2:ndados
    formato = strcat(formato, ' %g');
end
dados = sscanf(tline, formato);
drac = dados(1);
clear formato dados;

fgetl(fid);
tline = fgetl(fid);
ndados = 3;
formato = '%g';
for idados = 2:ndados
    formato = strcat(formato, ' %g');
end
dados = sscanf(tline, formato);
zrac_0 = dados(1); zmax = dados(2); zmin = dados(3);
clear formato dados;

fgetl(fid);
tline = fgetl(fid);
```

```
ndados = 1;
formato = '%g';
for idados = 2:ndados
    formato = strcat(formato, ' %g');
end
dados = sscanf(tline, formato);
alfa = dados(1);
clear formato dados;

fgetl(fid);
tline = fgetl(fid);
ndados = 2;
formato = '%g';
for idados = 2:ndados
    formato = strcat(formato, ' %g');
end
dados = sscanf(tline, formato);
dlig = dados(1)/1000; dtub = dados(2)/1000;
clear formato dados;

fgetl(fid);
tline = fgetl(fid);
ndados = 2;
formato = '%g';
for idados = 2:ndados
    formato = strcat(formato, ' %g');
end
dados = sscanf(tline, formato);
comp_lig = dados(1); rug_lig = dados(2)/1000;
clear formato dados;

fgetl(fid);
tline = fgetl(fid);
ndados = 1;
formato = '%g';
for idados = 2:ndados
    formato = strcat(formato, ' %g');
end
dados = sscanf(tline, formato);
k_loc_lig = dados(1);
clear formato dados;

fgetl(fid);
tline = fgetl(fid);
fgetl(fid);
ndados = 1;
formato = '%d';
for idados = 2:ndados
    formato = strcat(formato, ' %d');
end
dados = sscanf(tline, formato);
n_sec_rac = dados(1);
clear formato dados;

% Controlo do valor de 'n_sec_rac':
% » verificar se 1 < n_sec_rac < ndx+1;
% » assumir n_sec_rac = 0, caso Drac = 0 (caso em que não há RAC); também
% » se pode assumir que não há RAC se n_sec_rac = 0 no ficheiro de dados,
```

```
% mesmo que Drac > 0.

if ( drac > 0 )
    if ( n_sec_rac < 0 || n_sec_rac == 1 || n_sec_rac >= nsec )
        error('Erro: "n_sec_rac" mal definido no ficheiro de dados!!');
    end
else
    n_sec_rac = 0;          % Se Drac <= 0, não há RAC.
end

% Enviar para o monitor e ficheiro de dados (*.res) se existir RAC

if ( n_sec_rac ~= 0 )

    fprintf(1, '\n');
    fprintf(1, 'Reservatório de Ar Comprimido (RAC)\n');
    fprintf(1, 'Diâmetro do RAC: %g m\n', drac);
    fprintf(1, 'Cota inicial da sup. livre no RAC: % 6.2f m\n', zrac_0);
    fprintf(1, 'Cota do nível máximo no RAC: % 6.2f m\n', zmax);
    fprintf(1, 'Cota do nível mínimo no RAC: % 6.2f m\n', zmin);
    fprintf(1, 'Expoente da lei de estado (alfa): %g\n', alfa);
    fprintf(1, 'Tubo de ligação ao RAC\n');
    fprintf(1, 'Diâmetro de ligação ao RAC: %g mm\n', dlig*1000);
    fprintf(1, 'Diâmetro da tubeira do RAC: %g mm\n', dtub*1000);
    fprintf(1, 'Comprimento do tubo de ligação ao RAC: %g m\n', comp_lig);
    fprintf(1, 'Rugosidade no tubo de ligação ao RAC: %g mm\n', ...
        rug_lig*1000);
    fprintf(1, 'K_loc no tubo de ligação ao RAC: %g \n', k_loc_lig);
    fprintf(1, 'Secção do MdC com RAC: %d \n', n_sec_rac);

    fprintf(fir, '\n');
    fprintf(fir, 'Reservatório de Ar Comprimido (RAC)\n');
    fprintf(fir, 'Diâmetro do RAC: %g m\n', drac);
    fprintf(fir, 'Cota inicial da sup. livre no RAC: % 6.2f m\n', zrac_0);
    fprintf(fir, 'Cota do nível máximo no RAC: % 6.2f m\n', zmax);
    fprintf(fir, 'Cota do nível mínimo no RAC: % 6.2f m\n', zmin);
    fprintf(fir, 'Expoente da lei de estado (alfa): %g\n', alfa);
    fprintf(fir, 'Tubo de ligação ao RAC\n');
    fprintf(fir, 'Diâmetro de ligação ao RAC: %g mm\n', dlig*1000);
    fprintf(fir, 'Diâmetro da tubeira do RAC: %g mm\n', dtub*1000);
    fprintf(fir, 'Comprimento do tubo de ligação ao RAC: %g m\n', comp_lig);
    fprintf(fir, 'Rugosidade no tubo de ligação ao RAC: %g mm\n', ...
        rug_lig*1000);
    fprintf(fir, 'K_loc no tubo de ligação ao RAC: %g \n', k_loc_lig);
    fprintf(fir, 'Secção do MdC com RAC: %d \n', n_sec_rac);

end

% .....
% Leitura dos dados referentes a uma (eventual) fuga de água: caudal e
% localização.

fgetl(fid);
fgetl(fid);
tline = fgetl(fid);
ndados = 1;
formato = '%g';
```

```
for idados = 2:ndados
    formato = strcat(formato, ' %g');
end
dados = sscanf(tline, formato);
q_fuga_0 = dados(1);
clear formato dados;

fgetl(fid);
tline = fgetl(fid);
ndados = 1;
formato = '%g';
for idados = 2:ndados
    formato = strcat(formato, ' %g');
end
dados = sscanf(tline, formato);
beta = dados(1);
clear formato dados;

fgetl(fid);
tline = fgetl(fid);
fgetl(fid);
ndados = 1;
formato = '%d';
for idados = 2:ndados
    formato = strcat(formato, ' %d');
end
dados = sscanf(tline, formato);
n_sec_fuga = dados(1);
clear formato dados;

% Controlo do valor de 'n_sec_fuga':
% » verificar se 1 < n_sec_fuga < ndx+1;
% » assumir n_sec_fuga = 0, caso Qfuga_in = 0 (caso em que não há fuga);
% também se pode assumir que não há fuga se n_sec_rac = 0 no ficheiro de
% dados, mesmo que Qfuga_in > 0;
% » verificar se n_sec_fuga ~= n_sec_rac.

if ( q_fuga_0 > 0 )
    if ( n_sec_fuga < 0 || n_sec_fuga == 1 || n_sec_fuga >= nsec )
        error('Erro: "n_sec_fuga" mal definido no ficheiro de dados!!');
    elseif ( n_sec_fuga == 0 )
        q_fuga_0 = 0;          % Se não há fuga...
    end
else
    n_sec_fuga = 0;          % Se Qfuga_in <= 0, não há fuga.
    q_fuga_0 = 0;          % Se não há fuga...
end

if ( (n_sec_fuga == n_sec_rac) && (n_sec_fuga ~= 0) )
    error('Erro: "n_sec_fuga" coincide com "n_sec_rac"!!');
end

% Enviar para o monitor e ficheiro de resultados (*.res) se existir fuga
% de água

if ( n_sec_fuga ~= 0 )
```

```

q_fuga_0_lps = q_fuga_0*1000;

fprintf(1, '\n');
fprintf(1, 'Fuga localizada de água\n');
fprintf(1, 'Caudal da fuga: %7.3f l/s\n', q_fuga_0_lps);
fprintf(1, 'Expoente da lei de vazão da fuga: %5.2f \n', beta);
fprintf(1, 'Secção do MdC com fuga localizada de água: %d\n', ...
        n_sec_fuga);

fprintf(fir, '\n');
fprintf(fir, 'Fuga localizada de água\n');
fprintf(fir, 'Caudal da fuga: %7.3f l/s\n', q_fuga_0_lps);
fprintf(fir, 'Expoente da lei de vazão da fuga: %5.2f \n', beta);
fprintf(fir, 'Secção do MdC com fuga localizada de água: %d\n', ...
        n_sec_fuga);

end

% .....
% Leitura do parâmetro definidor do tempo de simulação:
% t_simul = nfase*fase;

fgetl(fid);
tline = fgetl(fid);
fgetl(fid);
ndados = 1;
formato = '%d';
for idados = 2:ndados
    formato = strcat(formato, ' %d');
end
dados = sscanf(tline, formato);
nfase = dados(1);
clear formato dados;

% Enviar para o monitor e ficheiro de dados (*.res)

fprintf(1, '\n');
fprintf(1, 'Tempo de simulação do Choque Hidráulico\n');
fprintf(1, 'Número de fases: %d\n', nfase);

fprintf(fir, '\n');
fprintf(fir, 'Tempo de simulação do Choque Hidráulico\n');
fprintf(fir, 'Número de fases: %d\n', nfase);

% .....

% Determinação do ponto de funcionamento (caudal) da instalação elevatória

if ( n_sec_fuga ~= 0 )

    comp1 = (n_sec_fuga -1)*dltx;          % Comprimento de conduta entre o GE
                                           % e a fuga.

    comp2 = comp - comp1;                  % Comprimento de conduta entre a

```

```

else
    % fuga e o reservatório.

    comp1 = comp;
    comp2 = comp - comp1;
    % Comprimento total da conduta.
    % Comprimento nulo.

end

f1 = 8*comp1*f_maj_cont/9.81/pi^2/diamm^5;
f2 = 8*comp2*f_maj_cont/9.81/pi^2/diamm^5;
f3 = 8*(k_loc+k_loc_jus)/9.81/pi^2/diamm^4;

lambda = 0.02;
dif_q = 1;
iter_q = 0;
% Iniciar "lambda".
% Iniciar a diferença entre as resultados das
% iterações.
% Iniciar contador de iterações.

v_a = f1*lambda + f2*lambda + f3 - accb(3);
v_b = -accb(2)*vel_ang_0 - 2*q_fuga_0*(f2*lambda + f3);
v_c = (hjus-hmont) - accb(1)*vel_ang_0^2 + (f2*lambda + f3)*q_fuga_0^2;

[v_q1,v_q2,control_code] = eq2grau(v_a,v_b,v_c);

if ( control_code == 1)
    q_inicial = max(v_q1,v_q2);
else
    error('Não é possível calcular o ponto de funcionamento!!');
end

while ( (dif_q >= 1E-7) && (iter_q <= 10) )

    [lambda_1,it_lambda] = lambda_cw(rugm,visc_cin,diamm,abs(q_inicial));
    [lambda_2,it_lambda] = lambda_cw(rugm,visc_cin,diamm, ...
        abs(q_inicial-q_fuga_0));

    v_a = f1*lambda_1 + f2*lambda_2 + f3 - accb(3);
    v_b = -accb(2)*vel_ang_0 - 2*q_fuga_0*(f2*lambda_2 + f3);
    v_c = (hjus-hmont) - accb(1)*vel_ang_0^2 + ...
        (f2*lambda_2 + f3)*q_fuga_0^2;

    [v_q1,v_q2,control_code] = eq2grau(v_a,v_b,v_c);

    if ( control_code == 1)
        q0 = max(v_q1,v_q2);
        dif_q = abs(q0-q_inicial);
        q_inicial = q0;
        iter_q = iter_q + 1;
    else
        error('Não é possível calcular o ponto de funcionamento!!');
    end

end

% Calcular a altura manométrica do(s) grupo(s) elevatório(s) correspondente
% ao ponto de funcionamento da instalação elevatória

```

```

hb0_ccb = accb(1)*vel_ang_0^2 + accb(2)*vel_ang_0*q0 + accb(3)*q0^2;

hb0_cci = (hjus-hmont) + f1*lambda_1*q0^2 + ...
          f2*lambda_2*(q0-q_fuga_0)^2 + f3*(q0-q_fuga_0)^2;

q0_lps = q0*1000;                                % Caudal elevado em l/s.

u0_1 = 4*q0/pi/diamm^2;                            % Velocidade no trecho a montante
                                                  % da fuga (m/s).

u0_2 = 4*abs(q0-q_fuga_0)/pi/diamm^2; % Velocidade no trecho a montante
                                                  % da fuga (m/s).

j0_1 = 8*lambda_1*q0^2/9.81/pi^2/diamm^5;    % J (m/m) no trecho de conduta
                                                  % a montante da fuga.

j0_2 = 8*lambda_2*(q0-q_fuga_0)^2/9.81/pi^2/diamm^5; % J (m/m) no trecho
                                                  % de conduta a jusante da fuga.

j0_1_mpk = j0_1*1000;                            % Perda de carga unitária em m/km.
j0_2_mpk = j0_2*1000;                            % Perda de carga unitária em m/km.

% Enviar para o monitor e ficheiro de resultados (*.res)

if ( n_sec_fuga ~= 0 )

    fprintf(1, '\n');
    fprintf(1, '.....\n');
    fprintf(1, 'Ponto de funcionamento da instalação elevatória\n\n');
    fprintf(1, 'Caudal elevado: %7.3f l/s\n', q0_lps);
    fprintf(1, 'Altura manométrica do(s) grupo(s) elevatório(s) (p/ CCB):');
    fprintf(1, ' %7.3f m\n', hb0_ccb);
    fprintf(1, 'Altura manométrica do(s) grupo(s) elevatório(s) (p/ CCI):');
    fprintf(1, ' %7.3f m\n', hb0_cci);

    fprintf(1, '\n');
    fprintf(1, 'Velocidade (média) a montante da fuga: %6.3f m/s\n', ...
              u0_1);
    fprintf(1, 'Perda de carga unitária a montante da fuga: %7.3f m/km\n',
    ...
              j0_1_mpk);

    fprintf(1, '\n');
    fprintf(1, 'Velocidade (média) a jusante da fuga: %6.3f m/s\n', ...
              u0_2);
    fprintf(1, 'Perda de carga unitária a jusante da fuga: %7.3f m/km\n',
    ...
              j0_2_mpk);

    fprintf(fir, '\n');
    fprintf(fir, '.....\n');
    fprintf(fir, 'Ponto de funcionamento da instalação elevatória\n\n');
    fprintf(fir, 'Caudal elevado: %7.3f l/s\n', q0_lps);

```

```

        fprintf(fir,'Altura manométrica do(s) grupo(s) elevatório(s) (p/
CCB):');
        fprintf(fir,' %7.3f m\n',hb0_ccb);
        fprintf(fir,'Altura manométrica do(s) grupo(s) elevatório(s) (p/
CCI):');
        fprintf(fir,' %7.3f m\n',hb0_cci);

        fprintf(fir,'\n');
        fprintf(fir,'Velocidade (média) a montante da fuga: %6.3f m/s\n', ...
                u0_1);
        fprintf(fir,'Perda de carga unitária a montante da fuga: %7.3f m/km\n',
        ...
                j0_1_mpk);

        fprintf(fir,'\n');
        fprintf(fir,'Velocidade (média) a jusante da fuga: %6.3f m/s\n', ...
                u0_2);
        fprintf(fir,'Perda de carga unitária a jusante da fuga: %7.3f m/km\n',
        ...
                j0_2_mpk);

else

        fprintf(1,'\n');
        fprintf(1,'.....\n');
        fprintf(1,'Ponto de funcionamento da instalação elevatória\n\n');
        fprintf(1,'Caudal elevado: %7.3f l/s\n',q0_lps);
        fprintf(1,'Altura manométrica do(s) grupo(s) elevatório(s) (p/ CCB):');
        fprintf(1,' %7.3f m\n',hb0_ccb);
        fprintf(1,'Altura manométrica do(s) grupo(s) elevatório(s) (p/ CCI):');
        fprintf(1,' %7.3f m\n',hb0_cci);

        fprintf(1,'\n');
        fprintf(1,'Velocidade (média) na conduta: %6.3f m/s\n',u0_1);
        fprintf(1,'Perda de carga unitária na conduta: %7.3f
m/km\n',j0_1_mpk);

        fprintf(fir,'\n');
        fprintf(fir,'.....\n');
        fprintf(fir,'Ponto de funcionamento da instalação elevatória\n\n');
        fprintf(fir,'Caudal elevado: %7.3f l/s\n',q0_lps);
        fprintf(fir,'Altura manométrica do(s) grupo(s) elevatório(s) (p/
CCB):');
        fprintf(fir,' %7.3f m\n',hb0_ccb);
        fprintf(fir,'Altura manométrica do(s) grupo(s) elevatório(s) (p/
CCI):');
        fprintf(fir,' %7.3f m\n',hb0_cci);

        fprintf(fir,'\n');
        fprintf(fir,'Velocidade (média) na conduta: %6.3f m/s\n',u0_1);
        fprintf(fir,'Perda de carga unitária na conduta: %7.3f
m/km\n',j0_1_mpk);

end

```

```
% .....
% .....
% .....

% MÉTODO DAS CARACTERÍSTICAS

% Calcular as condições iniciais (escoamento permanente) ao longo da
conduta

fase = 2*comp/cel;

dltt = dltx/cel;           % Cálculo do "delta t" do MdC.

ndt = nfase*(2*ndx);       % Cálculo do número de incrementos temporais
                           % da integração em ordem ao tempo pelo MdC;
                           % tempo de simulação: nfase*fase.

ninst = 1 + ndt;           % Cálculo do número de instantes da
                           % integração em ordem ao tempo pelo MdC.

% Iniciar as matrizes e vectores para guardar o caudal e a carga hidráulica
% nos pontos e instantes da simulação pelo MdC: QQ(1:ninst,1:nsec),
% QR(1:ninst), QPRm(1:ninst), VR(1:ninst) e HH(1:ninst,1:nsec).
% Idem para a velocidade angular do Grupo Elevatório: VANG(1:ninst).
% Idem para o vector dos tempos de simulação: tmdc(1:ninst).
% Idem para QF(1:ninst) e QPFm(1:ninst).

HH = zeros(ninst,nsec);
QF = zeros(ninst,1);
QPFm = zeros(ninst,1);
QPRm = zeros(ninst,1);
QQ = zeros(ninst,nsec);
QR = zeros(ninst,1);
tmdc = zeros(ninst,1);
% tt = zeros(ninst,1);
VANG = zeros(ninst,1);
VR = zeros(ninst,1);
% vol_rac = zeros(ninst,1);
ZR = zeros(ninst,1);
% z_rac = zeros(ninst,1);

% Iniciar H na secção inicial do MdC (instante inicial).

HH(1,1) = hmont + hb0_ccb;

% Iniciar H na última secção do MdC (instante inicial).

% HH(1,nsec) = hjus + 8*k_loc_jus/9.81/pi^2/diamm^4*q0^2;

HH(1,nsec) = hjus + 8*k_loc_jus/9.81/pi^2/diamm^4*(q0-q_fuga_0)^2;

% Cálculo da perda de carga nos trechos entre secções do MdC (com
% comprimento "delta x").

% dlth_dx = (HH(1,1)-HH(1,nsec))/ndx;
```

```

dlth_dx_1 = j0_1*f_maj_cont*dltx;
dlth_dx_2 = j0_2*f_maj_cont*dltx;

% Iniciar H e Q nas secções do MdC (instante inicial).

QQ(1,1) = q0;
QF(1,1) = q_fuga_0;
QR(1,1) = 0;

VANG(1,1) = vel_ang_0;

if ( n_sec_fuga == 0 )

    for isec = 2:nsec
        HH(1,isec) = HH(1,1)-(isec-1)*dlth_dx_1;
        QQ(1,isec) = q0;
    end

else

    for isec = 2:nsec

        if ( isec < n_sec_fuga )
            HH(1,isec) = HH(1,1)-(isec-1)*dlth_dx_1;
            QQ(1,isec) = q0;
        elseif ( isec == n_sec_fuga )
            HH(1,isec) = HH(1,1)-(isec-1)*dlth_dx_1;
            QQ(1,isec) = q0-q_fuga_0;
        else
            HH(1,isec) = HH(1,n_sec_fuga)-(isec-n_sec_fuga)*dlth_dx_2;
            QQ(1,isec) = q0-q_fuga_0;
        end

    end

end

if ( n_sec_rac ~= 0 )
    hrac_0 = HH(1,n_sec_rac);
    vrac_0 = pi*drac^2/4*(zmax-zrac_0);
    VR(1,1) = vrac_0;
    ZR(1,1) = zrac_0;
    QPRm(1,1) = QQ(1,n_sec_rac) - QR(1,1);
end

if ( n_sec_fuga ~= 0 )
    hfuga_0 = HH(1,n_sec_fuga);
    z_fuga = xymdc(2,n_sec_fuga);
    QPFm(1,1) = QQ(1,n_sec_fuga) + QF(1,1);
end

% Definir os parâmetros de controlo

```

```

k_mdc = 0.5;
k_lp = 0.5;
control_r = 1;

% Definir os parâmetros da CCB e da curva de rendimento

accb1 = accb(1);
accb2 = accb(2);
accb3 = accb(3);

arend1 = arend(1);
arend2 = arend(2);
arend3 = arend(3);
arend4 = arend(4);

% Produção de gráficos

% Controlo de gráficos a partir do teclado
%
% Grafico = 1: traçado do perfil da conduta + linha de carga do escoamento
%              permanente + envolventes da linha de carga + variação do
%              volume de ar no RAC + variação do nível de água no RAC;
% Grafico = 2: traçado do perfil da conduta + linha de carga do escoamento
%              permanente + variação da linha de carga durante a execução +
%              envolventes da linha de carga + variação do volume de ar no
%              RAC + variação do nível de água no RAC;
% Grafico = 3: traçado do perfil da conduta + linha de carga do escoamento
%              permanente + variação da linha de carga durante a execução +
%              envolventes da linha de carga + variação do volume de ar no
%              RAC durante a execução + variação do nível de água no RAC
%              durante a execução.

fprintf(1, '\n');
% control_grafico = input('Opção de gráficos (1, 2 ou 3)?');    Ocultar a
% hipótese 3 porque torna a execução muito pesada...
control_grafico = input('Opção de gráficos (1 ou 2)?');

figure(1);
clf(1);

figure(2);
clf(2);

% |||||

x = xymdc(1,1:nsec);
z = xymdc(2,1:nsec);

for it = 2:ninst
    tmdc(it,1) = (it-1)*dltt;
end

h0 = HH(1,1:nsec);

```

```

if ( control_grafico == 1 || control_grafico == 2 || control_grafico == 3 )

    figure(1);
    clf(1);

    plot(x,z,'-k','LineWidth',2);
    hold on;
    title('Perfil da conduta. Escoamento permanente.','FontSize',9, ...
        'FontWeight','bold');
    set(gca,'Xlim',[0 2000],'XTick',0:250:2000,'FontSize',8);
    xlabel('X (m)','FontSize',8,'FontWeight','bold');
    set(gca,'Ylim',[00 200],'YTick',00:25:200,'FontSize',8);
    ylabel('H (m)','FontSize',8,'FontWeight','bold');

    plot(x,h0,'-g','LineWidth',2);

    legend('Perfil','H0','Location','NorthEast');
    grid;

    hold off;

    fprintf(1,'\n');
    fprintf(1,'Carregue numa tecla para proseguir\n');
    pause;

    if ( n_sec_rac ~= 0 )

        figure(2);
        clf(2);

        %         tt(1:1,1) = tmdc(1:1,1);
        %         vol_rac(1:1,1) = VR(1:1,1);
        %         z_rac(1:1,1) = ZR(1:1,1);

        [AX,H1,H2] = plotyy(tmdc(1:1,1),VR(1:1,1),tmdc(1:1,1),ZR(1:1,1));

        hold on;

        title('Choque Hidráulico. Desempenho do RAC.',' ...
            'FontSize',9,'FontWeight','bold');

        xlabel('t (segundos)','FontSize',8,'FontWeight','bold');

        set(get(AX(1),'Ylabel'),'String','Volume de ar no RAC (m^3)', ...
            'Color','b','FontSize',8,'FontWeight','bold');
        set(AX(1),'Ylim',[0 5.0],'YTick',0:0.5:5.0,'YColor','b', ...
            'Xlim',[0 (tmdc(ninst,1)+5)], ...
            'XTick',0:10:(tmdc(ninst,1)+5),'FontSize',8);
        set(get(AX(2),'Ylabel'),'Color','r','String', ...
            'Nível da água no RAC (m)','Color','r','FontSize',8, ...
            'FontWeight','bold');
        set(AX(2),'Ylim',[17.5 27.5],'YTick',17.5:1.0:27.5,'YColor','r',
        ...
            'Xlim',[0 (tmdc(ninst,1)+5)], ...
            'XTick',0:10:(tmdc(ninst,1)+5),'FontSize',8);
    
```

```

set(H1,'LineStyle','-','Color','b','LineWidth',1.5);
set(H2,'LineStyle','-','Color','r','LineWidth',1.5);

legend(H1,'Volume de ar no RAC','Location','NorthEast');
legend(H2,'Nível de água no RAC','Location','SouthEast');

grid;

end

end

% Percorrer, para todos os instantes (2º e seguintes), todas as secções do
% MdC.

for it = 2:ninst
    for isec = 1:nsec
        if ( isec == 1 )

            % Secção do grupo elevatório (x=0)

            % Controlar a possibilidade da secção se encontrar
            % imediatamente a jusante o RAC ou a FUGA; se for o caso Qb
            % tem de ser lido no vector QPRm(i,1) ou QPFm(i,1).

            if ( (isec+1) == n_sec_rac )
                qb = QPRm(it-1,1); % Leitura de Qb.
                hb = HH(it-1,isec+1); % Leitura de Hb.
            elseif ( (isec+1) == n_sec_fuga )
                qb = QPFm(it-1,1); % Leitura de Qb.
                hb = HH(it-1,isec+1); % Leitura de Hb.
            else
                qb = QQ(it-1,isec+1); % Leitura de Qb.
                hb = HH(it-1,isec+1); % Leitura de Hb.
            end

            qpi = QQ(it-1,isec); % Leitura de Qp no instante anterior.
            hpi = HH(it-1,isec); % Leitura de Hp no instante anterior.

            vangi = VANG(it-1,1); % Leitura da velocidade angular do GE no
                                % instante anterior.

            % Cálculo de Qp, Hp

            [qp,hp,vangf] = mc_ge(cel,diamm,dltx,rugm,visc_cin, ...
                                f_maj_cont,vel_ang_0,accb1,accb2,accb3,vangi, ...
                                arend1,arend2,arend3,arend4, ...
                                qb,hb,qpi,hpi,hmont,pd2,control_r,k_mdc,k_lp);

```

```

% Guardar Qp, Hp, Velocidade angular

QQ(it, isec) = qp;
HH(it, isec) = hp;
VANG(it, 1) = vangf;

elseif ( ( isec > 1 ) && ( isec < nsec ) && ( isec ~= n_sec_rac ) && ...
        ( isec ~= n_sec_fuga ) )

% Secções interiores

qa = QQ(it-1, isec-1);      % Leitura de Qa.
ha = HH(it-1, isec-1);      % Leitura de Ha.

% Controlar a possibilidade da secção se encontrar
% imediatamente a jusante o RAC ou a FUGA; se for o caso Qb
% tem de ser lido no vector QPRm(i,1) ou QPFm(i,1).

if ( ( isec+1 ) == n_sec_rac )
    qb = QPRm(it-1, 1);      % Leitura de Qb.
    hb = HH(it-1, isec+1);    % Leitura de Hb.
elseif ( ( isec+1 ) == n_sec_fuga )
    qb = QPFm(it-1, 1);      % Leitura de Qb.
    hb = HH(it-1, isec+1);    % Leitura de Hb.
else
    qb = QQ(it-1, isec+1);    % Leitura de Qb.
    hb = HH(it-1, isec+1);    % Leitura de Hb.
end

% Cálculo de Qp, Hp

[qp, hp] = mc_p_interior(cel, diamm, dltx, rugm, visc_cin, ...
    f_maj_cont, qa, ha, qb, hb, control_r);

% Guardar Qp e Hp

QQ(it, isec) = qp;
HH(it, isec) = hp;

elseif ( ( isec > 1 ) && ( isec < nsec ) && ( isec == n_sec_rac ) )

% Secção interior com RAC

qa = QQ(it-1, isec-1);      % Leitura de Qa.
ha = HH(it-1, isec-1);      % Leitura de Ha.

% Controlar a possibilidade da secção se encontrar
% imediatamente a jusante a FUGA; se for o caso Qb
% tem de ser lido no vector QPFm(i,1).

if ( ( isec+1 ) == n_sec_fuga )
    qb = QPFm(it-1, 1);      % Leitura de Qb.
    hb = HH(it-1, isec+1);    % Leitura de Hb.
else
    qb = QQ(it-1, isec+1);    % Leitura de Qb.
    hb = HH(it-1, isec+1);    % Leitura de Hb.

```

```

end

qpm_i = QPRm(it-1,1);      % Leitura de Qp,m no instante
                             % anterior.
qpj_i = QQ(it-1,isec);    % Leitura de Qp,j no instante
                             % anterior.

qrac_i = QR(it-1,1);      % Leitura do Qrac no instante
                             % anterior.

vrac_i = VR(it-1,1);      % Leitura do Qrac no instante
                             % anterior.

% Cálculo de Qpm, Qpj, Hp, Qrac, Vrac, Zrac na secção do RAC

[qpm_f,qpj_f,hp_f,qrac_f,vrac_f,zrac_f] = ...
    mc_rac(cel,diamm,dltx,rugm,visc_cin,f_maj_cont, ...
    qa,ha,qb,hb,qpm_i,qpj_i, ...
    hrac_0,zrac_0,vrac_0, ...
    qrac_i,vrac_i, ...
    drac,dlig,rug_lig,comp_lig,k_loc_lig,dtub, ...
    zmax,zmin,alfa, ...
    control_r);

% Guardar Qpm, Qpj, Hp, Qrac, Vrac, Zrac

QPRm(it,1) = qpm_f;
QQ(it,isec) = qpj_f;
HH(it,isec) = hp_f;
QR(it,1) = qrac_f;
VR(it,1) = vrac_f;
ZR(it,1) = zrac_f;

elseif ( (isec > 1) && (isec < nsec) && (isec == n_sec_fuga ) )

    % Secção interior com FUGA de água

    qa = QQ(it-1,isec-1);    % Leitura de Qa.
    ha = HH(it-1,isec-1);    % Leitura de Ha.

    % Controlar a possibilidade da secção se encontrar
    % imediatamente a jusante o RAC; se for o caso Qb
    % tem de ser lido no vector QPRm(i,1).

    if ( (isec+1) == n_sec_rac )
        qb = QPRm(it-1,1);    % Leitura de Qb.
        hb = HH(it-1,isec+1); % Leitura de Hb.
    else
        qb = QQ(it-1,isec+1); % Leitura de Qb.
        hb = HH(it-1,isec+1); % Leitura de Hb.
    end

    qpm_i = QPFm(it-1,1);    % Leitura de Qp,m no instante
                             % anterior.
    qpj_i = QQ(it-1,isec);    % Leitura de Qp,j no instante
                             % anterior.

```

```
% Cálculo de Qpm, Qpj, Hp, Qfuga na secção da FUGA

[qpm_f,qpj_f,hp_f,qfuga_f] = ...
    mc_fuga(cel,diamm,dltx,rugm,visc_cin,f_maj_cont, ...
    qa,ha,qb,hb,qpm_i,qpj_i, ...
    q_fuga_0,hfuga_0,z_fuga,beta, ...
    control_r);

% Guardar Qpm, Qpj, Hp, Qfuga

QPFm(it,1) = qpm_f;
QQ(it,isec) = qpj_f;
HH(it,isec) = hp_f;
QF(it,1) = qfuga_f;

else

% Secção do reservatório de jusante (x=L)

qa = QQ(it-1,isec-1); % Leitura de Qa.
ha = HH(it-1,isec-1); % Leitura de Ha.

% Cálculo de Qp,Hp

[qp,hp] = mc_res_jus(cel,diamm,dltx,rugm,visc_cin, ...
    f_maj_cont,k_loc_jus,hjus,qa,ha,control_r);

% Guardar Qp e Hp

QQ(it,isec) = qp;
HH(it,isec) = hp;

end

end

% Produção de gráficos

if ( control_grafico == 2 || control_grafico == 3 )

    figure(1);
    clf(1);

    h = HH(it,1:nsec);
    plot(x,h,'-r','LineWidth',2);
    hold on;

    title('Choque Hidráulico. Comportamento da Linha de Carga.', ...
        'FontSize',9,'FontWeight','bold');
    set(gca,'Xlim',[0 2000],'XTick',0:250:2000,'FontSize',8);
    xlabel('X (m)','FontSize',8,'FontWeight','bold');
    set(gca,'Ylim',[00 200],'YTick',00:25:200,'FontSize',8);
    ylabel('H (m)','FontSize',8,'FontWeight','bold');
    grid;
```

```

plot(x,z,'-k','LineWidth',2);
plot(x,h0,'-g','LineWidth',2);

tempo = sprintf('Instante: %7.4f s',tmdc(it,1));
text(1000,25,tempo,'HorizontalAlignment','center',...
     'FontSize',9,'BackgroundColor','w');

hold off;

% Nova versão (((((((((((((((((((((((((((((((((((((((((((((((((((((((((((((((((((
if ( n_sec_rac ~= 0 && control_grafico == 3 )
    figure(2);
    clf(2);

%         [AX,H1,H2] = plotyy(tmdc((it-1):it,1),VR((it-1):it,1), ...
%                               tmdc((it-1):it,1),ZR((it-1):it,1));

    [AX,H1,H2] = plotyy(tmdc(1:it,1),VR(1:it,1), ...
                        tmdc(1:it,1),ZR(1:it,1));

    set(get(AX(1),'Ylabel'),'String','Volume de ar no RAC (m^3)',
...
        'Color','b','FontSize',8,'FontWeight','bold');
    set(AX(1),'Ylim',[0 5.0],'YTick',0:0.5:5.0,'YColor','b', ...
        'Xlim',[0 (tmdc(ninst,1)+5)], ...
        'XTick',0:10:(tmdc(ninst,1)+5),'FontSize',8);

    set(get(AX(2),'Ylabel'),'Color','r','String', ...
        'Nível da água no RAC (m)','Color','r','FontSize',8, ...
        'FontWeight','bold');
    set(AX(2),'Ylim',[17.5
27.5],'YTick',17.5:1.0:27.5,'YColor','r', ...
        'Xlim',[0 (tmdc(ninst,1)+5)], ...
        'XTick',0:10:(tmdc(ninst,1)+5),'FontSize',8);

    set(H1,'LineStyle','-','Color','b','LineWidth',1.5);
    set(H2,'LineStyle','-','Color','r','LineWidth',1.5);

    legend(H1,'Volume de ar no RAC','Location','NorthEast');
    legend(H2,'Nível de água no RAC','Location','SouthEast');

    grid;
% )))))))

end

% Versão antiga !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
%     if ( n_sec_rac ~= 0 )
%         figure(2);
%         clf(2);

```

```
%
    title('Choque Hidráulico. Volume de ar no RAC. ');
%
    set(gca,'Xlim',[0 40],'XTick',0:5:40);
%
    xlabel('t (segundos)');
%
    set(gca,'Ylim',[0 0.40],'YTick',0:0.05:0.40);
%
    ylabel('Volume de ar no RAC (m^3)');
%
    hold on;

%
    tt = tmdc(1:it,1);
%
    vol_rac = VR(1:it,1);
%
    z_rac = ZR(1:it,1);
%
    plot(tt,vol_rac,'-k','LineWidth',2);
%
    plot(tt,z_rac,'-r','LineWidth',2);
%
    hold off;
%
    end
%
    pause(0.005);

end

end

% .....
% .....
% Choque hidráulico - resultados da simulação

% Calcular envolventes superior e inferior da carga hidráulica

h_envol = zeros(2,nsec);      % Iniciar matriz da envolvente de H (carga
                              % hidráulica).
p_envol = zeros(2,nsec);      % Iniciar matriz da envolvente de P (altura
                              % piezométrica).

for isec = 1:nsec

    h_envol(1,isec) = max( HH(1:ninst,isec) );    % H máximo.
    h_envol(2,isec) = min( HH(1:ninst,isec) );    % H mínimo.

    p_envol(1,isec) = h_envol(1,isec) - xymdc(2,isec); % P máximo.
    p_envol(2,isec) = h_envol(2,isec) - xymdc(2,isec); % P mínimo.

end

if ( n_sec_rac ~= 0 )

    vol_rac_max = max( VR(1:ninst,1) );    % Volume máximo de ar no RAC.
    vol_rac_min = min( VR(1:ninst,1) );    % Volume mínimo de ar no RAC.

    vol_total_rac = (zmax-zmin)*pi*drac^2/4; % Volume total do RAC.
    p_vol_rac_max = vol_rac_max/vol_total_rac*100; % Percentagem do volume
                                                    % total do RAC.
```

```

p_vol_rac_min = vol_rac_min/vol_total_rac*100; % Percentagem do volume
                                                % total do RAC.

z_rac_max = max( ZR(1:ninst,1) );      % Nível máximo de água no RAC.
z_rac_min = min( ZR(1:ninst,1) );      % Nível mínimo de água no RAC.

for it = 1:ninst

    if ( VR(it,1) == vol_rac_max )
        t_vrac_max = tmdc(it,1);
    end
    if ( VR(it,1) == vol_rac_min )
        t_vrac_min = tmdc(it,1);
    end
    if ( ZR(it,1) == z_rac_max )
        t_zrac_max = tmdc(it,1);
    end
    if ( ZR(it,1) == z_rac_min )
        t_zrac_min = tmdc(it,1);
    end

end

end

% Escrever no ficheiro de resultados:
% >> perfil longitudinal da conduta; (já está!)
% >> linha de carga do escoamento permanente (t = 0 seg.); (já está!)
% >> envolvente superior da linha de carga (H máximo); (já está!)
% >> envolvente inferior da linha de carga (H mínimo); (já está!)
% >> envolvente superior das pressões (alt. piezométrica máxima); (já
% está!)
% >> envolvente inferior das pressões (alt. piezométrica mínima); (já
% está!)

% >> paragem do grupo elevatório; (já está!)

% >> Vrac máximo e mínimo; (já está!)
% >> comparar Vrac,max com o volume total do RAC; (já está!)
% >> Rrac máximo e mínimo; (já está!)

% Enviar para o monitor

fprintf(1, '\n');
fprintf(1, '.....\n'
);
fprintf(1, 'Choque Hidráulico - Resultados\n\n');
fprintf(1, 'Envolventes da Carga Hidráulica e de Pressão\n');

fprintf(1, '      X(m)      Z(m)      Ho(m)  Hmáx(m)  Hmin(m)  Pmáx(m)
Pmin(m)\n');

for isec = 1:nsec
    fprintf(1, ' % 7.1f % 7.1f % 8.3f % 8.3f % 8.3f % 8.3f % 8.3f\n', ...

```

```

        xymsdc(:,isec),HH(1,isec),h_envol(:,isec),p_envol(:,isec));
end

fprintf(1,'\n');
fprintf(1,'Paragem do(s) grupo(s) elevatório(s)\n');
fprintf(1,'      t(s)  V. ang.(rpm)\n');

it = 1;
itr = -2;
while ( (it <= ninst) && (itr < 0) )
    t = (it-1)*dltt;
    fprintf(1,' %8.3f      %8.3f\n',t,VANG(it,1));
    it = it + 1;
    if ( VANG(it,1) <= 0 )
        itr = itr + 1;
    end
end

if ( n_sec_rac ~= 0 )

    fprintf(1,'\n');
    fprintf(1,'Comportamento do Reservatório de Ar Comprimido (RAC)\n');
    fprintf(1,'Volume de ar máximo: %7.4f m^3 (%5.2f %%) \n', ...
        vol_rac_max,p_vol_rac_max);
    fprintf(1,'(instante: %7.4f s)\n',t_vrac_max);
    fprintf(1,'Nível de água mínimo: %7.3f m\n',z_rac_min);
    fprintf(1,'(instante: %7.4f s)\n',t_zrac_min);
    fprintf(1,'Volume de ar mínimo: %7.4f m^3 (%5.2f %%) \n', ...
        vol_rac_min,p_vol_rac_min);
    fprintf(1,'(instante: %7.4f s)\n',t_vrac_min);
    fprintf(1,'Nível de água máximo: %7.3f m\n',z_rac_max);
    fprintf(1,'(instante: %7.4f s)\n',t_zrac_max);
    fprintf(1,'\n');

end

% Enviar para o ficheiro de dados (*.res)

fprintf(fir,'\n');
fprintf(fir,'.....\n');
fprintf(fir,'Choque Hidráulico - Resultados\n\n');
fprintf(fir,'Envolventes da Carga Hidráulica e de Pressão\n');

fprintf(fir,'      X(m)      Z(m)      Ho(m)  Hmáx(m)  Hmin(m)  Pmáx(m)
Pmin(m)\n');

for isec = 1:nsec
    fprintf(fir,' % 7.1f % 7.1f % 8.3f % 8.3f % 8.3f % 8.3f % 8.3f\n', ...
        xymsdc(:,isec),HH(1,isec),h_envol(:,isec),p_envol(:,isec));
end

fprintf(fir,'\n');
fprintf(fir,'Paragem do(s) grupo(s) elevatório(s)\n');
fprintf(fir,'      t(s)  V. ang.(rpm)\n');

```

```

it = 1;
itr = -2;
while ( (it <= ninst) && (itr < 0) )
    t = (it-1)*dltt;
    fprintf(fir, ' %8.3f      %8.3f\n', t, VANG(it,1));
    it = it + 1;
    if ( VANG(it,1) <= 0 )
        itr = itr + 1;
    end
end

if ( n_sec_rac ~= 0 )

    fprintf(fir, '\n');
    fprintf(fir, 'Comportamento do Reservatório de Ar Comprimido (RAC)\n');
    fprintf(fir, 'Volume de ar máximo: %7.4f m^3 (%5.2f %%) \n', ...
        vol_rac_max, p_vol_rac_max);
    fprintf(fir, '(instante: %7.4f s)\n', t_vrac_max);
    fprintf(fir, 'Nível de água mínimo: %7.3f m \n', z_rac_min);
    fprintf(fir, '(instante: %7.4f s)\n', t_zrac_min);
    fprintf(fir, 'Volume de ar mínimo: %7.4f m^3 (%5.2f %%) \n', ...
        vol_rac_min, p_vol_rac_min);
    fprintf(fir, '(instante: %7.4f s)\n', t_vrac_min);
    fprintf(fir, 'Nível de água máximo: %7.3f m \n', z_rac_max);
    fprintf(fir, '(instante: %7.4f s)\n', t_zrac_max);
    fprintf(fir, '\n');

end

fprintf(1, '\n');
fprintf(1, 'Fim de Resultados\n\n');

fprintf(fir, '\n');
fprintf(fir, 'Fim de Resultados\n\n');

% //////////////////////////////////////
% Produção de gráficos

hmax = h_envol(1,1:nsec);
hmin = h_envol(2,1:nsec);

pmax = p_envol(1,1:nsec);
pmin = p_envol(2,1:nsec);

if ( control_grafico == 1 || control_grafico == 2 || control_grafico == 3 )

    figure(1);
    clf(1);

    plot(x,z, '-k', 'LineWidth',2);
    hold on;
    plot(x,h0, '-g', 'LineWidth',2);

```

```

plot(x,hmax,'-^r','LineWidth',1.5,'MarkerSize',4);
plot(x,hmin,'-vb','LineWidth',1.5,'MarkerSize',4);

title('Choque Hidráulico. Envolventes da Linha de Carga', ...
      'FontSize',9,'FontWeight','bold');

set(gca,'Xlim',[0 2000],'XTick',0:250:2000,'FontSize',8);
xlabel('X (m)','FontSize',8,'FontWeight','bold');

set(gca,'Ylim',[00 200],'YTick',00:25:200,'FontSize',8);
ylabel('H (m)','FontSize',8,'FontWeight','bold');

legend('Perfil','H0','Hmax','Hmin','Location','NorthEast');

grid;

tempo = sprintf('Tempo da simulação: %7.4f s',tmdc(ninst,1));
text(1000,50,tempo,'HorizontalAlignment','center', ...
     'FontSize',9,'BackgroundColor','w');

hold off;

if ( n_sec_rac ~= 0 )

    figure(2);
    clf(2);

%     tt(1:ninst,1) = tmdc(1:ninst,1);
%     vol_rac(1:ninst,1) = VR(1:ninst,1);
%     z_rac(1:ninst,1) = ZR(1:ninst,1);

    [AX,H1,H2] = plotyy(tmdc,VR,tmdc,ZR);

    title('Choque Hidráulico. Desempenho do RAC.', ...
          'FontSize',9,'FontWeight','bold');

    xlabel('t (segundos)','FontSize',8,'FontWeight','bold');

    set(get(AX(1),'Ylabel'),'String','Volume de ar no RAC (m^3)', ...
        'Color','b','FontSize',8,'FontWeight','bold');
    set(AX(1),'Ylim',[0 5.0],'YTick',0:0.5:5.0,'YColor','b', ...
        'Xlim',[0 (tmdc(ninst,1)+5)], ...
        'XTick',0:10:(tmdc(ninst,1)+5),'FontSize',8);

    set(get(AX(2),'Ylabel'),'Color','r','String', ...
        'Nível da água no RAC (m)','Color','r','FontSize',8, ...
        'FontWeight','bold');
    set(AX(2),'Ylim',[17.5 27.5],'YTick',17.5:1.0:27.5,'YColor','r',
    ...
        'Xlim',[0 (tmdc(ninst,1)+5)], ...
        'XTick',0:10:(tmdc(ninst,1)+5),'FontSize',8);

    set(H1,'LineStyle','-','Color','b','LineWidth',1.5);
    set(H2,'LineStyle','-','Color','r','LineWidth',1.5);

```

```
%      set(gca,'Xlim',[0 tmdc(ninst,1)],'XTick',0:10:tmdc(ninst,1));
%      set(gca,'Ylim',[0 0.40],'YTick',0:0.05:0.40);
%      ylabel('Volume de ar no RAC (m^3)');
%      legend('Volume de ar no RAC');

      legend(H1,'Volume de ar no RAC','Location','NorthEast');
      legend(H2,'Nível de água no RAC','Location','SouthEast');
%      hold on;
%      legend('Nível de água no RAC');
      grid;

      tempo = sprintf('Tempo da simulação: %7.4f s',tmdc(ninst,1));
      text((tmdc(ninst,1)+5)/2,1.00,tempo, ...
           'HorizontalAlignment','center','FontSize',9, ...
           'BackgroundColor','w');

%      hold off;

      end

end

% .....
% Fechar ficheiros e eliminar os respectivos apontadores (fid, fir)
%
fclose(fid);
clear fid;
%
fclose(fir);
clear fir;
```

# **Anexo 2**

**DADOS DE INPUT FORNECIDOS AO SOFTWARE MATLAB® PARA SIMULAÇÃO DO FENÓMENO DO  
CHOQUE HIDRÁULICO**

Nome

Cavada\_00 (s/ RAC e s/fuga)

#

Comprimento (m), Diâmetro (mm), Rugosidade (mm)

1881 287.00 0.04

#

Perfil da conduta

Número de pontos

87

X(m), Z(m)

|        |       |
|--------|-------|
| 0      | 21.4  |
| 16.3   | 18.37 |
| 36.3   | 19.5  |
| 53.3   | 16.57 |
| 120.88 | 17.16 |
| 158.95 | 17.95 |
| 186.31 | 18.76 |
| 195.37 | 19.03 |
| 212.74 | 19.7  |
| 235.47 | 21    |
| 242.71 | 21.31 |
| 248.98 | 21.58 |
| 257.1  | 21.88 |
| 269.44 | 22.26 |
| 283.9  | 22.75 |
| 304.54 | 23.36 |
| 308.6  | 23.56 |
| 320    | 24.18 |
| 334.53 | 25.39 |
| 354.04 | 26.71 |
| 363.46 | 27.31 |
| 370.95 | 27.79 |
| 381.7  | 28.47 |
| 408.77 | 30.28 |
| 416.28 | 31.49 |
| 425.82 | 33.43 |
| 436.31 | 33.7  |
| 438.67 | 33.83 |
| 452.88 | 33.33 |
| 473.96 | 32.45 |
| 486.35 | 32.15 |
| 499.59 | 31.99 |
| 515.26 | 31.87 |
| 524.44 | 31.78 |
| 552.57 | 31.43 |
| 593.67 | 29.71 |
| 623.01 | 27.58 |
| 651.28 | 25.39 |
| 667.71 | 24.58 |
| 697.36 | 23.62 |

|         |        |
|---------|--------|
| 712.98  | 23.14  |
| 732.3   | 22.13  |
| 735.43  | 21.98  |
| 754.4   | 21.11  |
| 763.93  | 20.68  |
| 776.37  | 20.34  |
| 790.92  | 20.07  |
| 806.7   | 19.01  |
| 822.7   | 17.42  |
| 853.37  | 14.06  |
| 897.39  | 10.27  |
| 928.66  | 8.63   |
| 960.5   | 7.38   |
| 987.86  | 7.05   |
| 997.78  | 6.94   |
| 1011.88 | 6.78   |
| 1057.78 | 7.29   |
| 1075.44 | 7.51   |
| 1107.02 | 9.24   |
| 1139.3  | 16.51  |
| 1183.35 | 24.68  |
| 1206.72 | 29.32  |
| 1259.0  | 32.79  |
| 1267.5  | 33.66  |
| 1333.61 | 41.01  |
| 1407.97 | 52.95  |
| 1431.13 | 55.97  |
| 1443.22 | 57.1   |
| 1457.12 | 58.47  |
| 1493.47 | 61.21  |
| 1520.83 | 61.67  |
| 1546.97 | 64.88  |
| 1577.68 | 66.61  |
| 1606.6  | 67.59  |
| 1647.74 | 73.22  |
| 1672.38 | 78.72  |
| 1693.26 | 80.95  |
| 1709.33 | 82.15  |
| 1722.55 | 83.93  |
| 1743.2  | 85.47  |
| 1752.93 | 89.49  |
| 1771.53 | 92.63  |
| 1785.18 | 94.58  |
| 1794.44 | 96.51  |
| 1813.3  | 98.79  |
| 1859.8  | 100.98 |
| 1881    | 101.3  |
| #       |        |

Definicao do desnivel geometrico

Hmontante (m), Hjusante (m)

21.4 101.3

#

Perdas de carga localizadas na conduta

Factor de majoracao da perda de carga continua (usar 1.0 para não majorar)

1.2

Coeficiente de perdas de carga localizadas (usar 0.0 para não considerar)

0.0

Coeficiente de perda de carga localizada no reservatorio de jusante (usar 0.0 para não considerar)

0.0

#

Viscosidade cinematica ( $m^2/s$ )

1.31E-06

#

Curva Característica do Grupo Elevatório ( $H_b = AN^2 + BNQ + CQ^2$ ;  $H_b:m$ ;  $Q:m^3/s$ )

$N_o$  (rpm), A, B, C

1450 6.252509E-5 0.011268 -7202.4

#

Curva de Rendimento do Grupo Elevatório para  $N_o$  ( $rend\ (%) = aa*Q^3 + bb*Q^2 + cc*Q + dd$ ;  $Q:m^3/s$ )

aa, bb, cc, dd

9906.6 -20740 2571.5 0.1377

#

Inercia do grupo elevatorio

$PD^2$  ( $Nm^2$ )

2000

#

Celeridade ( $m/s$ )

379.62

#

Número de trechos da conduta (numero de "delta x")

99

#

Reservatorio de Ar Comprimido (RAC)

Diametro do RAC (m); se  $Drac=0$ , não há RAC.

1.5

$Z_{rac\_0}$  (m),  $Z_{rac\_max}$  (m),  $Z_{rac\_min}$  (m)

21.85 23.28 20.45

Alfa (expoente da lei de estado do ar no RAC)

1.1

$D_{lig}$  (mm),  $D_{tub}$  (mm)

250 250

Comprimento do tubo de ligação (m), Rugosidade no tubo de ligação (mm)

12 0.05

Coef. de perda de carga localizada no tubo de ligação (não considerar aqui a tubeira)

0.0

Seccao com RAC (maior que 1 e menor que numero de "delta x" + 1; se igual a 0 não há RAC)

0

#

Fuga localizada de agua

Q\_fuga inicial ( $m^3/s$ ); se Q\_fuga\_in=0, não há fuga.

00.0E-3

Beta (expoente da lei de vazão da fuga; geralmente adopta-se 0.5)

0.5

Secção com fuga (maior que 1 e menor que número de "delta x" + 1; se igual a 0 não há fuga)

0

#

Tempo de simulação (número de fases)

30

#

NOTA: As palavras acima expostas estão sem acentos e cedilhas, uma vez que o software Matlab® não os reconhece.



# Anexo 3

## TABELAS DE VALORES MEDIDOS

**(EXEMPLO DE EXPERIÊNCIAS DE PARAGEM DE UMA E DUAS BOMBAS, SEM FUGA)**

| t (s) | Valores medidos (após paragem de 1 bomba) |                  |                  |                  |
|-------|-------------------------------------------|------------------|------------------|------------------|
|       | Q(l/s)                                    | P secção 2 (mca) | P secção 3 (mca) | P secção 5 (mca) |
| 0     | 76.61                                     | 85.97            | 83.98            | 44.7             |
| 1     | 73.66                                     | 83.53            | 81.63            | 43.29            |
| 2     | 69.92                                     | 82.41            | 79.23            | 40.75            |
| 3     | 65.51                                     | 78.69            | 76.81            | 38.14            |
| 4     | 60.54                                     | 76.26            | 73.91            | 36.31            |
| 5     | 55.18                                     | 73.35            | 70.45            | 35.3             |
| 6     | 48.88                                     | 69.90            | 66.67            | 34.25            |
| 7     | 41.20                                     | 65.63            | 63.38            | 32.98            |
| 8     | 32.07                                     | 62.65            | 62.48            | 30.99            |
| 9     | 22.86                                     | 62.23            | 64.30            | 28.87            |
| 10    | 15.07                                     | 63.02            | 67.88            | 27.3             |
| 11    | 9.26                                      | 66.42            | 71.99            | 27.57            |
| 12    | 5.18                                      | 70.47            | 76.25            | 31.27            |
| 13    | 2.42                                      | 74.70            | 81.33            | 37.4             |
| 14    | 0.03                                      | 79.65            | 87.68            | 43.19            |
| 15    | 0.02                                      | 85.85            | 95.20            | 47.19            |
| 16    | 0.03                                      | 90.10            | 102.25           | 49.95            |
| 17    | 0.07                                      | 97.49            | 106.58           | 52.17            |
| 18    | 0.03                                      | 105.05           | 106.93           | 54.56            |
| 19    | 0.07                                      | 106.08           | 104.52           | 56.34            |
| 20    | 0.05                                      | 104.10           | 101.05           | 56.41            |
| 21    | 0.08                                      | 100.79           | 97.55            | 53.91            |
| 22    | 0.08                                      | 97.24            | 93.53            | 48.82            |
| 23    | 0.08                                      | 94.35            | 88.58            | 43.52            |
| 24    | 0.05                                      | 94.55            | 82.72            | 39.72            |
| 25    | 0.05                                      | 83.03            | 77.05            | 37.42            |
| 26    | 0.07                                      | 77.33            | 72.70            | 36.05            |
| 27    | 0.06                                      | 72.50            | 70.56            | 34.53            |
| 28    | 0.05                                      | 70.06            | 70.53            | 33.16            |
| 29    | 0.05                                      | 69.71            | 72.21            | 32.34            |
| 30    | 0.04                                      | 70.75            | 74.79            | 32.67            |
| 31    | 0.05                                      | 70.74            | 77.93            | 34.37            |
| 32    | 0.05                                      | 76.51            | 81.49            | 37.52            |
| 33    | 0.03                                      | 79.93            | 85.70            | 41.18            |
| 34    | 0.03                                      | 83.99            | 90.52            | 44.39            |
| 35    | 0.05                                      | 88.70            | 95.16            | 46.91            |
| 36    | 0.03                                      | 93.34            | 98.75            | 48.74            |
| 37    | 0.03                                      | 97.15            | 100.25           | 50.21            |
| 38    | 0.04                                      | 97.17            | 99.72            | 51.57            |

|    |      |       |       |       |
|----|------|-------|-------|-------|
| 39 | 0.04 | 99.03 | 97.98 | 51.98 |
| 40 | 0.06 | 97.39 | 95.53 | 50.83 |
| 41 | 0.05 | 95.13 | 92.64 | 48.22 |
| 42 | 0.05 | 92.27 | 89.26 | 44.98 |
| 43 | 0.05 | 88.97 | 85.39 | 42.06 |
| 44 | 0.02 | 85.19 | 81.54 | 39.95 |
| 45 | 0.04 | 84.97 | 78.07 | 38.27 |
| 46 | 0.05 | 77.81 | 75.94 | 36.93 |
| 47 | 0.03 | 75.41 | 75.13 | 35.99 |
| 48 | 0.04 | 74.43 | 75.64 | 35.41 |
| 49 | 0.06 | 74.70 | 77.20 | 35.46 |
| 50 | 0.06 | 76.05 | 79.30 | 36.33 |
| 51 | 0.09 | 77.97 | 81.87 | 38.12 |
| 52 | 0.07 | 78.44 | 84.79 | 40.55 |
| 53 | 0.07 | 83.30 | 88.06 | 42.93 |
| 54 | 0.06 | 86.59 | 91.38 | 44.89 |
| 55 | 0.06 | 90.01 | 94.07 | 46.42 |
| 56 | 0.05 | 92.88 | 95.80 | 47.77 |
| 57 | 0.04 | 94.73 | 96.20 | 48.75 |
| 58 | 0.03 | 95.35 | 95.38 | 49.14 |
| 59 | 0.03 | 95.28 | 93.86 | 48.66 |
| 60 | 0.03 | 93.34 | 91.87 | 47.29 |
| 61 | 0.01 | 91.47 | 89.56 | 45.38 |
| 62 | 0.02 | 89.20 | 86.74 | 43.09 |
| 63 | 0.04 | 86.45 | 83.96 | 41.26 |
| 64 | 0.02 | 83.62 | 81.35 | 39.92 |
| 65 | 0.02 | 80.78 | 79.33 | 38.76 |
| 66 | 0.06 | 80.05 | 78.31 | 37.95 |
| 67 | 0.04 | 77.69 | 78.36 | 37.34 |
| 68 | 0.04 | 77.50 | 79.13 | 37.22 |
| 69 | 0.04 | 78.16 | 80.50 | 37.78 |
| 70 | 0.08 | 79.42 | 82.30 | 38.86 |
| 71 | 0.05 | 81.14 | 84.45 | 40.37 |
| 72 | 0.06 | 83.20 | 86.80 | 42.11 |
| 73 | 0.06 | 84.28 | 89.14 | 43.65 |
| 74 | 0.05 | 87.89 | 91.37 | 45.03 |
| 75 | 0.07 | 90.14 | 92.81 | 46.11 |
| 76 | 0.06 | 91.74 | 93.53 | 46.85 |
| 77 | 0.08 | 92.57 | 93.27 | 47.25 |
| 78 | 0.06 | 92.57 | 92.36 | 47.15 |
| 79 | 0.04 | 91.89 | 91.12 | 46.39 |
| 80 | 0.07 | 91.09 | 89.39 | 45.16 |
| 81 | 0.07 | 89.84 | 87.36 | 43.62 |
| 82 | 0.06 | 86.99 | 85.31 | 42.23 |

|     |      |       |       |       |
|-----|------|-------|-------|-------|
| 83  | 0.05 | 84.80 | 83.36 | 40.93 |
| 84  | 0.06 | 82.84 | 81.82 | 39.95 |
| 85  | 0.04 | 81.15 | 80.77 | 39.2  |
| 86  | 0.07 | 80.05 | 80.37 | 38.77 |
| 87  | 0.04 | 79.60 | 80.66 | 38.56 |
| 88  | 0.02 | 79.61 | 81.49 | 38.86 |
| 89  | 0.03 | 80.48 | 82.81 | 39.5  |
| 90  | 0.02 | 81.67 | 84.28 | 40.47 |
| 91  | 0.03 | 83.16 | 86.10 | 41.76 |
| 92  | 0.03 | 84.84 | 87.85 | 42.96 |
| 93  | 0.04 | 86.77 | 89.49 | 44.03 |
| 94  | 0.05 | 88.10 | 90.76 | 44.94 |
| 95  | 0.04 | 88.11 | 91.55 | 45.61 |
| 96  | 0.08 | 90.63 | 91.63 | 46.01 |
| 97  | 0.07 | 90.83 | 91.21 | 45.99 |
| 98  | 0.05 | 90.47 | 90.40 | 45.6  |
| 99  | 0.07 | 89.70 | 89.16 | 44.86 |
| 100 | 0.07 | 88.59 | 87.78 | 43.77 |
| 101 | 0.04 | 87.26 | 86.21 | 42.73 |
| 102 | 0.08 | 87.22 | 84.67 | 41.73 |
| 103 | 0.05 | 84.09 | 83.37 | 40.83 |
| 104 | 0.02 | 82.74 | 82.36 | 40.14 |
| 105 | 0.05 | 81.73 | 81.94 | 39.72 |
| 106 | 0.06 | 81.23 | 81.91 | 39.48 |
| 107 | 0.05 | 81.09 | 82.41 | 39.6  |
| 108 | 0.04 | 81.47 | 83.28 | 40.07 |
| 109 | 0.03 | 81.50 | 84.36 | 40.75 |
| 110 | 0.04 | 83.27 | 85.70 | 41.53 |
| 111 | 0.04 | 84.51 | 86.98 | 42.44 |
| 112 | 0.06 | 85.96 | 88.35 | 43.35 |
| 113 | 0.07 | 87.25 | 89.38 | 44.1  |
| 114 | 0.06 | 88.40 | 90.07 | 44.72 |
| 115 | 0.07 | 89.20 | 90.35 | 45.06 |
| 116 | 0.06 | 89.22 | 90.17 | 45.17 |
| 117 | 0.04 | 89.42 | 89.65 | 44.96 |
| 118 | 0.04 | 88.98 | 88.80 | 44.5  |
| 119 | 0.03 | 88.16 | 87.77 | 43.72 |
| 120 | 0.03 | 87.17 | 86.66 | 42.97 |
| 121 | 0.04 | 85.98 | 85.40 | 42.2  |
| 122 | 0.06 | 84.80 | 84.43 | 41.46 |
| 123 | 0.08 | 84.55 | 83.60 | 40.88 |
| 124 | 0.06 | 82.86 | 83.10 | 40.45 |
| 125 | 0.07 | 82.37 | 83.01 | 40.19 |
| 126 | 0.06 | 82.17 | 83.16 | 40.25 |

|     |      |       |       |       |
|-----|------|-------|-------|-------|
| 127 | 0.08 | 82.37 | 83.73 | 40.53 |
| 128 | 0.05 | 82.79 | 84.57 | 40.95 |
| 129 | 0.04 | 83.56 | 85.49 | 41.56 |
| 130 | 0.03 | 83.87 | 86.64 | 42.24 |
| 131 | 0.04 | 85.49 | 87.52 | 42.93 |
| 132 | 0.02 | 86.51 | 88.45 | 43.55 |
| 133 | 0.02 | 87.41 | 89.04 | 44.05 |
| 134 | 0.05 | 88.08 | 89.45 | 44.41 |
| 135 | 0.03 | 88.46 | 89.44 | 44.58 |
| 136 | 0.01 | 88.56 | 89.11 | 44.46 |
| 137 | 0.03 | 88.51 | 88.60 | 44.08 |
| 138 | 0.02 | 87.83 | 87.79 | 43.65 |
| 139 | 0.03 | 87.18 | 86.89 | 43.11 |
| 140 | 0.00 | 86.22 | 86.05 | 42.51 |
| 141 | 0.03 | 85.33 | 85.14 | 41.91 |
| 142 | 0.03 | 84.46 | 84.52 | 41.4  |
| 143 | 0.00 | 83.72 | 84.05 | 41.13 |
| 144 | 0.03 | 83.47 | 83.88 | 40.81 |
| 145 | 0.02 | 83.02 | 83.95 | 40.74 |
| 146 | 0.01 | 83.01 | 84.28 | 40.89 |
| 147 | 0.03 | 83.33 | 84.80 | 41.18 |
| 148 | 0.04 | 83.80 | 85.49 | 41.64 |
| 149 | 0.03 | 84.52 | 86.23 | 42.12 |
| 150 | 0.04 | 85.29 | 87.09 | 42.66 |
| 151 | 0.04 | 85.79 | 87.70 | 43.09 |
| 152 | 0.04 | 86.16 | 88.29 | 43.59 |
| 153 | 0.03 | 87.35 | 88.55 | 43.82 |
| 154 | 0.05 | 87.68 | 88.66 | 43.99 |
| 155 | 0.05 | 87.79 | 88.53 | 44.05 |
| 156 | 0.04 | 87.70 | 88.24 | 43.85 |
| 157 | 0.05 | 87.40 | 87.60 | 43.49 |
| 158 | 0.06 | 86.99 | 86.98 | 43.07 |
| 159 | 0.08 | 87.00 | 86.38 | 42.63 |
| 160 | 0.08 | 85.60 | 85.66 | 42.19 |
| 161 | 0.06 | 84.92 | 85.06 | 41.83 |
| 162 | 0.06 | 84.33 | 84.77 | 41.44 |
| 163 | 0.06 | 83.92 | 84.46 | 41.28 |
| 164 | 0.05 | 83.65 | 84.46 | 41.18 |
| 165 | 0.02 | 83.62 | 84.67 | 41.21 |
| 166 | 0.04 | 83.60 | 85.00 | 41.37 |
| 167 | 0.03 | 84.06 | 85.50 | 41.78 |
| 168 | 0.04 | 84.56 | 86.14 | 42.08 |
| 169 | 0.04 | 85.17 | 86.74 | 42.51 |
| 170 | 0.07 | 85.79 | 87.28 | 42.87 |

|     |      |       |       |       |
|-----|------|-------|-------|-------|
| 171 | 0.08 | 86.32 | 87.73 | 43.24 |
| 172 | 0.06 | 86.80 | 87.94 | 43.45 |
| 173 | 0.04 | 86.81 | 88.13 | 43.58 |
| 174 | 0.05 | 87.26 | 88.05 | 43.67 |
| 175 | 0.06 | 87.29 | 87.91 | 43.55 |
| 176 | 0.04 | 87.05 | 87.54 | 43.29 |
| 177 | 0.05 | 86.71 | 86.98 | 43.02 |
| 178 | 0.07 | 86.25 | 86.49 | 42.7  |
| 179 | 0.06 | 85.76 | 86.05 | 42.38 |
| 180 | 0.05 | 85.67 | 85.52 | 42.07 |
| 181 | 0.06 | 84.74 | 85.14 | 41.79 |
| 182 | 0.05 | 84.36 | 85.02 | 41.57 |
| 183 | 0.05 | 84.17 | 84.88 | 41.51 |
| 184 | 0.05 | 84.06 | 85.00 | 41.49 |
| 185 | 0.05 | 84.16 | 85.24 | 41.6  |
| 186 | 0.06 | 84.34 | 85.61 | 41.87 |
| 187 | 0.03 | 84.43 | 86.10 | 42.07 |
| 188 | 0.03 | 85.11 | 86.49 | 42.41 |
| 189 | 0.02 | 85.55 | 87.02 | 42.65 |
| 190 | 0.03 | 85.96 | 87.36 | 42.96 |
| 191 | 0.02 | 86.42 | 87.54 | 43.18 |
| 192 | 0.02 | 86.72 | 87.70 | 43.34 |
| 193 | 0.01 | 86.85 | 87.69 | 43.43 |
| 194 | 0.03 | 86.89 | 87.56 | 43.29 |
| 195 | 0.04 | 86.79 | 87.33 | 43.18 |
| 196 | 0.02 | 86.53 | 87.04 | 42.99 |
| 197 | 0.07 | 86.21 | 86.65 | 42.72 |
| 198 | 0.06 | 85.82 | 86.21 | 42.47 |
| 199 | 0.07 | 85.41 | 85.76 | 42.24 |
| 200 | 0.07 | 84.98 | 85.58 | 42    |
| 201 | 0.06 | 84.88 | 85.36 | 41.84 |
| 202 | 0.05 | 84.50 | 85.24 | 41.73 |
| 203 | 0.07 | 84.44 | 85.33 | 41.71 |
| 204 | 0.03 | 84.42 | 85.42 | 41.78 |
| 205 | 0.06 | 84.54 | 85.72 | 41.99 |
| 206 | 0.06 | 84.79 | 85.99 | 42.17 |
| 207 | 0.06 | 85.13 | 86.43 | 42.36 |
| 208 | 0.07 | 85.27 | 86.84 | 42.54 |
| 209 | 0.08 | 85.79 | 87.05 | 42.83 |
| 210 | 0.05 | 86.16 | 87.21 | 43.01 |
| 211 | 0.08 | 86.39 | 87.30 | 43.09 |
| 212 | 0.04 | 86.51 | 87.40 | 43.13 |
| 213 | 0.06 | 86.60 | 87.38 | 43.17 |
| 214 | 0.04 | 86.54 | 87.23 | 43.06 |

|     |      |       |       |       |
|-----|------|-------|-------|-------|
| 215 | 0.02 | 86.49 | 86.91 | 42.92 |
| 216 | 0.02 | 86.37 | 86.62 | 42.71 |
| 217 | 0.05 | 85.88 | 86.37 | 42.52 |
| 218 | 0.04 | 85.55 | 86.07 | 42.35 |
| 219 | 0.03 | 85.22 | 85.78 | 42.12 |
| 220 | 0.05 | 84.99 | 85.68 | 42.01 |
| 221 | 0.05 | 84.80 | 85.56 | 41.91 |
| 222 | 0.06 | 84.70 | 85.58 | 41.88 |
| 223 | 0.04 | 84.74 | 85.57 | 41.89 |
| 224 | 0.07 | 84.74 | 85.76 | 42.05 |
| 225 | 0.06 | 84.95 | 86.02 | 42.2  |
| 226 | 0.07 | 85.16 | 86.38 | 42.35 |

| Valores medidos (após paragem de 2 |        |                  |                  |                  |
|------------------------------------|--------|------------------|------------------|------------------|
| t (s)                              | Q(l/s) | P secção 2 (mca) | P secção 3 (mca) | P secção 5 (mca) |
| 0                                  | 148.00 | 97.53            | 95.87            | 53.06            |
| 1                                  | 146.61 | 95.36            | 92.46            | 52.14            |
| 2                                  | 143.72 | 91.61            | 88.51            | 50.81            |
| 3                                  | 139.17 | 89.01            | 84.51            | 48.01            |
| 4                                  | 133.27 | 84.15            | 80.39            | 44.46            |
| 5                                  | 126.18 | 79.80            | 76.14            | 40.84            |
| 6                                  | 118.28 | 79.53            | 71.43            | 37.48            |
| 7                                  | 109.16 | 69.66            | 67.00            | 34.9             |
| 8                                  | 99.17  | 66.47            | 63.60            | 32.8             |
| 9                                  | 88.54  | 62.48            | 60.67            | 30.72            |
| 10                                 | 77.69  | 60.59            | 57.93            | 28.51            |
| 11                                 | 65.64  | 56.83            | 55.65            | 26.77            |
| 12                                 | 52.81  | 55.68            | 53.55            | 25.91            |
| 13                                 | 39.05  | 54.08            | 54.81            | 25.04            |
| 14                                 | 26.60  | 53.05            | 58.81            | 24.37            |
| 15                                 | 16.86  | 58.51            | 65.04            | 24.97            |
| 16                                 | 9.89   | 63.75            | 72.62            | 27.51            |
| 17                                 | 5.11   | 71.09            | 80.91            | 33               |
| 18                                 | 1.77   | 79.82            | 89.39            | 40.59            |
| 19                                 | 0.09   | 87.27            | 98.20            | 47.67            |
| 20                                 | 0.03   | 88.13            | 106.00           | 53.59            |
| 21                                 | 0.09   | 102.91           | 111.91           | 57.98            |
| 22                                 | 0.09   | 110.56           | 114.56           | 60.29            |
| 23                                 | 0.08   | 113.81           | 113.04           | 61.05            |
| 24                                 | 0.00   | 111.80           | 108.72           | 60.05            |
| 25                                 | 0.05   | 108.28           | 102.63           | 56.75            |

|    |       |        |        |       |
|----|-------|--------|--------|-------|
| 26 | 0.16  | 101.89 | 95.57  | 52.01 |
| 27 | 0.00  | 100.98 | 88.39  | 45.99 |
| 28 | 0.09  | 88.24  | 81.25  | 40.09 |
| 29 | 0.04  | 81.47  | 74.70  | 35.64 |
| 30 | 0.14  | 74.97  | 69.65  | 32.73 |
| 31 | 0.02  | 69.98  | 66.58  | 30.85 |
| 32 | 0.05  | 64.45  | 65.38  | 30.05 |
| 33 | 0.11  | 64.40  | 66.52  | 29.95 |
| 34 | 0.00  | 64.92  | 69.52  | 30.81 |
| 35 | 0.05  | 67.36  | 74.10  | 32.63 |
| 36 | 0.04  | 72.68  | 79.76  | 35.3  |
| 37 | 0.09  | 77.14  | 85.78  | 38.76 |
| 38 | 0.06  | 83.54  | 91.68  | 43.06 |
| 39 | 0.03  | 89.37  | 96.94  | 47.6  |
| 40 | 0.01  | 95.17  | 101.00 | 51.28 |
| 41 | 0.01  | 96.92  | 103.49 | 53.86 |
| 42 | 0.08  | 101.29 | 104.20 | 54.75 |
| 43 | 0.02  | 104.54 | 102.89 | 54.42 |
| 44 | 0.07  | 103.70 | 99.83  | 52.86 |
| 45 | 0.03  | 100.10 | 95.43  | 49.98 |
| 46 | 0.04  | 95.54  | 90.27  | 46.73 |
| 47 | -0.01 | 90.27  | 85.15  | 43.46 |
| 48 | 0.11  | 88.05  | 80.43  | 40.11 |
| 49 | -0.03 | 79.71  | 76.67  | 37.12 |
| 50 | -0.07 | 75.41  | 73.91  | 34.94 |
| 51 | -0.04 | 73.67  | 72.55  | 33.65 |
| 52 | 0.04  | 72.92  | 72.44  | 33.52 |
| 53 | -0.01 | 72.66  | 73.62  | 33.99 |
| 54 | 0.02  | 73.59  | 76.27  | 35.07 |
| 55 | -0.01 | 73.82  | 79.81  | 36.86 |
| 56 | 0.09  | 74.22  | 84.01  | 39.24 |
| 57 | 0.06  | 82.49  | 88.41  | 41.78 |
| 58 | -0.01 | 86.36  | 92.24  | 44.55 |
| 59 | 0.02  | 90.58  | 95.40  | 47.24 |
| 60 | -0.03 | 93.36  | 97.49  | 49.66 |
| 61 | 0.11  | 95.87  | 98.54  | 50.98 |
| 62 | -0.03 | 98.38  | 98.27  | 51.06 |
| 63 | 0.06  | 97.64  | 96.91  | 50.06 |
| 64 | 0.08  | 96.21  | 94.33  | 48.46 |
| 65 | -0.01 | 95.54  | 90.93  | 46.46 |
| 66 | 0.02  | 90.14  | 87.18  | 44.18 |
| 67 | -0.05 | 86.87  | 83.50  | 41.96 |
| 68 | 0.04  | 82.29  | 80.55  | 39.72 |
| 69 | 0.08  | 79.29  | 78.29  | 37.91 |

|     |       |       |       |       |
|-----|-------|-------|-------|-------|
| 70  | 0.11  | 81.31 | 76.88 | 36.53 |
| 71  | 0.05  | 75.37 | 76.44 | 35.88 |
| 72  | 0.03  | 76.29 | 76.84 | 36.05 |
| 73  | 0.00  | 78.29 | 78.22 | 36.84 |
| 74  | -0.03 | 77.61 | 80.52 | 38    |
| 75  | 0.09  | 79.80 | 83.37 | 39.56 |
| 76  | 0.02  | 81.53 | 86.56 | 41.3  |
| 77  | 0.02  | 81.26 | 89.49 | 43.28 |
| 78  | 0.06  | 87.49 | 92.05 | 45.21 |
| 79  | 0.07  | 89.38 | 93.88 | 46.88 |
| 80  | 0.04  | 92.80 | 94.89 | 48.17 |
| 81  | -0.02 | 95.01 | 95.05 | 48.74 |
| 82  | 0.11  | 96.48 | 94.42 | 48.33 |
| 83  | 0.01  | 95.24 | 92.96 | 47.31 |
| 84  | 0.11  | 94.99 | 90.73 | 45.96 |
| 85  | 0.06  | 91.39 | 88.17 | 44.34 |
| 86  | 0.14  | 86.33 | 85.44 | 42.77 |
| 87  | 0.05  | 84.26 | 83.04 | 41.17 |
| 88  | 0.11  | 81.39 | 81.11 | 39.68 |
| 89  | 0.11  | 80.37 | 79.77 | 38.52 |
| 90  | 0.11  | 77.77 | 79.30 | 37.82 |
| 91  | 0.06  | 78.90 | 79.28 | 37.66 |
| 92  | 0.08  | 79.42 | 79.96 | 38.02 |
| 93  | 0.14  | 78.83 | 81.45 | 38.91 |
| 94  | 0.05  | 81.47 | 83.34 | 40.02 |
| 95  | -0.05 | 81.83 | 85.58 | 41.26 |
| 96  | 0.06  | 85.36 | 87.86 | 42.57 |
| 97  | 0.16  | 85.41 | 89.88 | 44.01 |
| 98  | -0.03 | 86.97 | 91.48 | 45.4  |
| 99  | 0.03  | 91.00 | 92.34 | 46.37 |
| 100 | 0.04  | 90.98 | 92.76 | 46.96 |
| 101 | 0.06  | 92.66 | 92.56 | 46.93 |
| 102 | 0.17  | 93.14 | 91.79 | 46.5  |
| 103 | 0.11  | 91.17 | 90.35 | 45.51 |
| 104 | 0.18  | 89.79 | 88.48 | 44.33 |
| 105 | 0.02  | 89.03 | 86.43 | 43.11 |
| 106 | 0.09  | 86.00 | 84.53 | 41.94 |
| 107 | 0.07  | 84.48 | 83.02 | 40.8  |
| 108 | 0.07  | 82.53 | 81.84 | 39.85 |
| 109 | 0.06  | 80.32 | 81.20 | 39.14 |
| 110 | -0.02 | 82.32 | 80.93 | 38.87 |
| 111 | 0.11  | 80.56 | 81.37 | 39.03 |
| 112 | 0.04  | 80.36 | 82.24 | 39.53 |
| 113 | 0.02  | 82.26 | 83.52 | 40.27 |

|     |       |       |       |       |
|-----|-------|-------|-------|-------|
| 114 | 0.03  | 82.45 | 85.17 | 41.24 |
| 115 | 0.08  | 83.98 | 86.91 | 42.24 |
| 116 | 0.13  | 85.24 | 88.47 | 43.27 |
| 117 | 0.11  | 87.68 | 89.83 | 44.28 |
| 118 | 0.04  | 89.20 | 90.72 | 45.24 |
| 119 | 0.06  | 90.74 | 91.15 | 45.76 |
| 120 | 0.18  | 90.39 | 91.14 | 45.88 |
| 121 | 0.14  | 91.11 | 90.70 | 45.63 |
| 122 | 0.06  | 90.62 | 89.76 | 45.06 |
| 123 | 0.06  | 88.71 | 88.56 | 44.31 |
| 124 | 0.11  | 86.99 | 87.02 | 43.37 |
| 125 | 0.09  | 84.78 | 85.53 | 42.44 |
| 126 | 0.05  | 84.91 | 84.24 | 41.55 |
| 127 | 0.13  | 83.31 | 83.25 | 40.77 |
| 128 | 0.07  | 81.85 | 82.54 | 40.16 |
| 129 | 0.05  | 81.98 | 82.38 | 39.89 |
| 130 | 0.03  | 81.72 | 82.44 | 39.78 |
| 131 | 0.02  | 82.16 | 82.99 | 40.08 |
| 132 | 0.05  | 82.64 | 83.94 | 40.62 |
| 133 | 0.11  | 82.77 | 84.99 | 41.26 |
| 134 | 0.09  | 82.34 | 86.31 | 42.05 |
| 135 | 0.09  | 85.55 | 87.56 | 42.83 |
| 136 | 0.05  | 86.46 | 88.60 | 43.58 |
| 137 | 0.08  | 87.76 | 89.46 | 44.31 |
| 138 | 0.07  | 87.70 | 89.93 | 44.86 |
| 139 | -0.02 | 88.85 | 89.99 | 45.04 |
| 140 | 0.18  | 88.61 | 89.77 | 45    |
| 141 | 0.11  | 88.69 | 89.27 | 44.67 |
| 142 | -0.01 | 88.48 | 88.33 | 44.06 |
| 143 | 0.06  | 87.65 | 87.28 | 43.45 |
| 144 | 0.09  | 87.77 | 86.23 | 42.75 |
| 145 | 0.06  | 85.42 | 85.11 | 42.09 |
| 146 | 0.08  | 84.30 | 84.32 | 41.42 |
| 147 | 0.05  | 84.39 | 83.73 | 40.85 |
| 148 | 0.07  | 83.26 | 83.37 | 40.5  |
| 149 | 0.05  | 81.29 | 83.43 | 40.5  |
| 150 | 0.08  | 81.17 | 83.64 | 40.57 |
| 151 | 0.03  | 82.57 | 84.19 | 40.85 |
| 152 | -0.02 | 81.68 | 85.04 | 41.43 |
| 153 | 0.11  | 82.13 | 86.01 | 41.97 |
| 154 | 0.14  | 85.95 | 86.96 | 42.53 |
| 155 | 0.07  | 84.56 | 87.82 | 43.13 |
| 156 | 0.11  | 86.24 | 88.57 | 43.72 |
| 157 | 0.09  | 87.39 | 88.94 | 44.13 |

|     |       |       |       |       |
|-----|-------|-------|-------|-------|
| 158 | 0.06  | 86.85 | 89.16 | 44.36 |
| 159 | 0.13  | 88.21 | 89.07 | 44.36 |
| 160 | -0.04 | 85.62 | 88.69 | 44.25 |
| 161 | 0.01  | 88.02 | 88.13 | 43.85 |
| 162 | 0.13  | 87.39 | 87.34 | 43.38 |
| 163 | -0.05 | 85.09 | 86.57 | 42.9  |
| 164 | 0.11  | 84.78 | 85.67 | 42.35 |
| 165 | 0.01  | 85.16 | 84.97 | 41.84 |
| 166 | 0.02  | 84.36 | 84.48 | 41.42 |
| 167 | 0.09  | 83.67 | 84.19 | 41.13 |
| 168 | -0.01 | 82.55 | 84.03 | 40.94 |
| 169 | 0.02  | 83.07 | 84.15 | 41    |
| 170 | 0.08  | 84.23 | 84.69 | 41.16 |
| 171 | 0.02  | 83.70 | 85.13 | 41.51 |
| 172 | 0.08  | 84.46 | 85.89 | 42    |
| 173 | 0.07  | 87.09 | 86.64 | 42.43 |
| 174 | 0.00  | 85.33 | 87.30 | 42.84 |
| 175 | 0.04  | 85.70 | 87.82 | 43.27 |
| 176 | 0.02  | 86.96 | 88.32 | 43.71 |
| 177 | 0.04  | 86.89 | 88.55 | 43.88 |
| 178 | 0.02  | 87.83 | 88.50 | 43.99 |
| 179 | 0.06  | 87.22 | 88.30 | 43.87 |
| 180 | 0.04  | 86.95 | 87.88 | 43.67 |
| 181 | -0.13 | 87.39 | 87.31 | 43.25 |
| 182 | 0.14  | 85.43 | 86.74 | 42.98 |
| 183 | -0.02 | 85.82 | 86.06 | 42.53 |
| 184 | 0.07  | 84.80 | 85.48 | 42.12 |
| 185 | 0.09  | 83.80 | 85.08 | 41.78 |
| 186 | 0.06  | 83.80 | 84.73 | 41.52 |
| 187 | 0.02  | 83.79 | 84.73 | 41.39 |
| 188 | 0.11  | 84.02 | 84.77 | 41.29 |
| 189 | 0.02  | 84.60 | 85.02 | 41.42 |
| 190 | 0.01  | 83.45 | 85.38 | 41.73 |
| 191 | 0.11  | 84.52 | 85.81 | 41.99 |
| 192 | 0.06  | 85.26 | 86.37 | 42.37 |
| 193 | 0.11  | 83.78 | 86.94 | 42.63 |
| 194 | 0.00  | 85.10 | 87.42 | 42.98 |
| 195 | 0.16  | 85.40 | 87.79 | 43.33 |
| 196 | -0.01 | 87.25 | 87.96 | 43.55 |
| 197 | 0.07  | 87.13 | 88.01 | 43.65 |
| 198 | 0.19  | 87.38 | 87.92 | 43.56 |
| 199 | 0.03  | 88.04 | 87.63 | 43.46 |
| 200 | 0.19  | 87.14 | 87.31 | 43.23 |
| 201 | 0.21  | 87.66 | 86.84 | 42.96 |

|     |       |       |       |       |
|-----|-------|-------|-------|-------|
| 202 | 0.09  | 86.18 | 86.28 | 42.61 |
| 203 | 0.04  | 86.35 | 85.83 | 42.32 |
| 204 | 0.11  | 84.65 | 85.42 | 42.08 |
| 205 | 0.14  | 84.64 | 85.12 | 41.76 |
| 206 | 0.08  | 85.04 | 85.06 | 41.65 |
| 207 | 0.06  | 85.19 | 85.03 | 41.6  |
| 208 | 0.03  | 84.64 | 85.22 | 41.71 |
| 209 | 0.03  | 86.89 | 85.47 | 41.84 |
| 210 | -0.04 | 86.09 | 85.81 | 42.06 |
| 211 | 0.16  | 86.62 | 86.29 | 42.35 |
| 212 | 0.04  | 85.67 | 86.75 | 42.59 |
| 213 | 0.03  | 84.88 | 87.11 | 42.87 |
| 214 | 0.05  | 87.32 | 87.32 | 43.13 |
| 215 | -0.02 | 86.53 | 87.52 | 43.2  |
| 216 | 0.05  | 85.89 | 87.58 | 43.35 |
| 217 | 0.03  | 86.27 | 87.63 | 43.33 |
| 218 | 0.09  | 86.15 | 87.40 | 43.24 |
| 219 | 0.05  | 86.07 | 87.22 | 43.11 |
| 220 | -0.02 | 87.80 | 86.82 | 42.91 |

# Anexo 4

TABELAS DE VALORES CALCULADOS

**VALORES CALCULADOS PARA PARAGEM DE UM GRUPO ELEVATÓRIO**

| t (s)  | Secção 2 e 3 | Secção 5 |
|--------|--------------|----------|
| 0      | 92.96        | 41.7269  |
| 0.0501 | 92.96        | 41.7269  |
| 0.1001 | 92.62        | 41.7269  |
| 0.1502 | 92.28        | 41.7269  |
| 0.2002 | 91.95        | 41.7269  |
| 0.2503 | 91.62        | 41.7269  |
| 0.3003 | 91.29        | 41.7269  |
| 0.3504 | 90.97        | 41.7269  |
| 0.4004 | 90.64        | 41.7269  |
| 0.4505 | 90.32        | 41.7269  |
| 0.5005 | 90.00        | 41.7269  |
| 0.5506 | 89.69        | 41.7269  |
| 0.6006 | 89.37        | 41.7269  |
| 0.6507 | 89.06        | 41.7269  |
| 0.7007 | 88.74        | 41.7269  |
| 0.7508 | 88.44        | 41.7269  |
| 0.8008 | 88.13        | 41.7269  |
| 0.8509 | 87.82        | 41.7269  |
| 0.9009 | 87.52        | 41.7269  |
| 0.951  | 87.22        | 41.7269  |
| 1.001  | 86.92        | 41.7269  |
| 1.0511 | 86.62        | 41.7269  |
| 1.1011 | 86.32        | 41.7269  |
| 1.1512 | 86.03        | 41.7269  |
| 1.2012 | 85.73        | 41.7269  |
| 1.2513 | 85.44        | 41.7269  |
| 1.3013 | 85.15        | 41.7269  |
| 1.3514 | 84.87        | 41.7269  |
| 1.4014 | 84.58        | 41.7269  |
| 1.4515 | 84.30        | 41.7269  |
| 1.5015 | 84.01        | 41.7269  |
| 1.5516 | 83.73        | 41.7269  |
| 1.6016 | 83.45        | 41.7269  |
| 1.6517 | 83.18        | 41.7269  |
| 1.7017 | 82.90        | 41.7269  |
| 1.7518 | 82.63        | 41.7269  |
| 1.8018 | 82.35        | 41.7269  |
| 1.8519 | 82.08        | 41.7269  |
| 1.9019 | 81.81        | 41.7269  |
| 1.952  | 81.54        | 41.7269  |
| 2.002  | 81.28        | 41.7269  |
| 2.0521 | 81.01        | 41.7269  |

|        |       |         |
|--------|-------|---------|
| 2.1021 | 80.75 | 41.7269 |
| 2.1522 | 80.49 | 41.7269 |
| 2.2022 | 80.23 | 41.7269 |
| 2.2523 | 79.97 | 41.7269 |
| 2.3023 | 79.71 | 41.7269 |
| 2.3524 | 79.45 | 41.7269 |
| 2.4024 | 79.20 | 41.7269 |
| 2.4525 | 78.94 | 41.7269 |
| 2.5025 | 78.69 | 41.7269 |
| 2.5526 | 78.44 | 41.7269 |
| 2.6026 | 78.19 | 41.7269 |
| 2.6527 | 77.94 | 41.7269 |
| 2.7027 | 77.70 | 41.7269 |
| 2.7528 | 77.45 | 41.7269 |
| 2.8028 | 77.21 | 41.7269 |
| 2.8529 | 76.96 | 41.7269 |
| 2.9029 | 76.72 | 41.7269 |
| 2.953  | 76.48 | 41.7269 |
| 3.003  | 76.24 | 41.7269 |
| 3.0531 | 76.01 | 41.7269 |
| 3.1031 | 75.77 | 41.7269 |
| 3.1532 | 75.53 | 41.7269 |
| 3.2032 | 75.30 | 41.7269 |
| 3.2533 | 75.07 | 41.7269 |
| 3.3033 | 74.83 | 41.7269 |
| 3.3534 | 74.60 | 41.7269 |
| 3.4034 | 74.38 | 41.7269 |
| 3.4535 | 74.15 | 41.7269 |
| 3.5035 | 73.92 | 41.7269 |
| 3.5536 | 73.69 | 41.7269 |
| 3.6036 | 73.47 | 41.7269 |
| 3.6537 | 73.25 | 41.7269 |
| 3.7037 | 73.02 | 41.7269 |
| 3.7538 | 72.80 | 41.7269 |
| 3.8038 | 72.58 | 41.7269 |
| 3.8539 | 72.36 | 41.7269 |
| 3.9039 | 72.14 | 41.7269 |
| 3.954  | 71.93 | 41.7269 |
| 4.004  | 71.71 | 41.4355 |
| 4.0541 | 71.50 | 41.1462 |
| 4.1041 | 71.28 | 40.8581 |
| 4.1542 | 71.07 | 40.572  |
| 4.2042 | 70.86 | 40.2872 |
| 4.2543 | 70.65 | 40.0044 |

|        |       |         |
|--------|-------|---------|
| 4.3043 | 70.44 | 39.7227 |
| 4.3544 | 70.23 | 39.443  |
| 4.4044 | 70.02 | 39.1645 |
| 4.4545 | 69.81 | 38.8878 |
| 4.5045 | 69.61 | 38.6123 |
| 4.5546 | 69.40 | 38.3387 |
| 4.6046 | 69.20 | 38.0662 |
| 4.6547 | 69.00 | 37.7956 |
| 4.7047 | 68.80 | 37.526  |
| 4.7548 | 68.59 | 37.2583 |
| 4.8048 | 68.39 | 36.9916 |
| 4.8549 | 68.20 | 36.7267 |
| 4.9049 | 68.00 | 36.4628 |
| 4.955  | 67.80 | 36.2007 |
| 5.005  | 67.60 | 35.9396 |
| 5.0551 | 67.41 | 35.6802 |
| 5.1051 | 67.21 | 35.4218 |
| 5.1552 | 67.02 | 35.1652 |
| 5.2052 | 66.83 | 34.9095 |
| 5.2553 | 66.64 | 34.6554 |
| 5.3053 | 66.45 | 34.4023 |
| 5.3554 | 66.26 | 34.1509 |
| 5.4054 | 66.07 | 33.9004 |
| 5.4555 | 65.88 | 33.6515 |
| 5.5055 | 65.69 | 33.4035 |
| 5.5556 | 65.50 | 33.1572 |
| 5.6056 | 65.32 | 32.9117 |
| 5.6557 | 65.13 | 32.6678 |
| 5.7057 | 64.95 | 32.4247 |
| 5.7558 | 64.77 | 32.1832 |
| 5.8058 | 64.58 | 31.9426 |
| 5.8559 | 64.40 | 31.7035 |
| 5.9059 | 64.22 | 31.4652 |
| 5.956  | 64.04 | 31.2284 |
| 6.006  | 63.86 | 31.2638 |
| 6.0561 | 63.68 | 31.299  |
| 6.1061 | 63.51 | 31.3339 |
| 6.1562 | 63.33 | 31.3687 |
| 6.2062 | 63.15 | 31.4032 |
| 6.2563 | 62.98 | 31.4375 |
| 6.3063 | 62.80 | 31.4716 |
| 6.3564 | 62.63 | 31.5055 |
| 6.4064 | 62.46 | 31.5391 |
| 6.4565 | 62.28 | 31.5726 |

|        |       |         |
|--------|-------|---------|
| 6.5065 | 62.11 | 31.6059 |
| 6.5566 | 61.94 | 31.639  |
| 6.6066 | 61.77 | 31.6718 |
| 6.6567 | 61.60 | 31.7045 |
| 6.7067 | 61.43 | 31.737  |
| 6.7568 | 61.27 | 31.7694 |
| 6.8068 | 61.10 | 31.8015 |
| 6.8569 | 60.93 | 31.8335 |
| 6.9069 | 60.77 | 31.8652 |
| 6.957  | 60.60 | 31.8968 |
| 7.007  | 60.44 | 31.9283 |
| 7.0571 | 60.28 | 31.9595 |
| 7.1071 | 60.11 | 31.9906 |
| 7.1572 | 59.95 | 32.0216 |
| 7.2072 | 59.79 | 32.0523 |
| 7.2573 | 59.63 | 32.0829 |
| 7.3073 | 59.47 | 32.1134 |
| 7.3574 | 59.31 | 32.1437 |
| 7.4074 | 59.15 | 32.1738 |
| 7.4575 | 58.99 | 32.2038 |
| 7.5075 | 58.83 | 32.2336 |
| 7.5576 | 58.68 | 32.2633 |
| 7.6076 | 58.52 | 32.2929 |
| 7.6577 | 58.37 | 32.3223 |
| 7.7077 | 58.21 | 32.3515 |
| 7.7578 | 58.06 | 32.3806 |
| 7.8078 | 57.90 | 32.4096 |
| 7.8579 | 57.75 | 32.4384 |
| 7.9079 | 57.60 | 32.4671 |
| 7.958  | 57.45 | 32.4957 |
| 8.008  | 57.30 | 32.5241 |
| 8.0581 | 57.14 | 32.5524 |
| 8.1081 | 56.99 | 32.5806 |
| 8.1582 | 56.85 | 32.6087 |
| 8.2082 | 56.70 | 32.6366 |
| 8.2583 | 56.55 | 32.6644 |
| 8.3083 | 56.40 | 32.6921 |
| 8.3584 | 56.26 | 32.7196 |
| 8.4084 | 56.11 | 32.747  |
| 8.4585 | 55.96 | 32.7744 |
| 8.5085 | 55.82 | 32.8016 |
| 8.5586 | 55.67 | 32.8286 |
| 8.6086 | 55.53 | 32.8556 |
| 8.6587 | 55.39 | 32.8825 |

|         |       |         |
|---------|-------|---------|
| 8.7087  | 55.24 | 32.9092 |
| 8.7588  | 55.10 | 32.9359 |
| 8.8088  | 54.96 | 32.9624 |
| 8.8589  | 54.82 | 32.9888 |
| 8.9089  | 54.68 | 33.0151 |
| 8.959   | 54.54 | 33.0414 |
| 9.009   | 54.40 | 33.0675 |
| 9.0591  | 54.26 | 33.0935 |
| 9.1091  | 54.12 | 33.1194 |
| 9.1592  | 53.99 | 33.1452 |
| 9.2092  | 53.85 | 33.1709 |
| 9.2593  | 53.71 | 33.1965 |
| 9.3093  | 53.58 | 33.222  |
| 9.3594  | 53.44 | 33.2474 |
| 9.4094  | 53.31 | 33.2728 |
| 9.4595  | 53.17 | 33.298  |
| 9.5095  | 53.04 | 33.3232 |
| 9.5596  | 52.91 | 33.3482 |
| 9.6096  | 52.77 | 33.3732 |
| 9.6597  | 52.64 | 33.398  |
| 9.7097  | 52.51 | 33.4228 |
| 9.7598  | 52.38 | 33.4475 |
| 9.8098  | 52.25 | 33.4721 |
| 9.8599  | 52.12 | 33.4967 |
| 9.9099  | 52.24 | 33.5211 |
| 9.96    | 52.36 | 33.5455 |
| 10.01   | 52.38 | 33.5697 |
| 10.0601 | 52.39 | 33.5939 |
| 10.1101 | 52.40 | 33.6181 |
| 10.1602 | 52.40 | 33.6421 |
| 10.2102 | 52.40 | 33.6661 |
| 10.2603 | 52.40 | 33.6899 |
| 10.3103 | 52.39 | 33.7137 |
| 10.3604 | 52.37 | 33.7375 |
| 10.4104 | 52.35 | 33.7611 |
| 10.4605 | 52.32 | 33.7847 |
| 10.5105 | 52.29 | 33.8082 |
| 10.5606 | 52.25 | 33.8317 |
| 10.6106 | 52.20 | 33.855  |
| 10.6607 | 52.15 | 33.8783 |
| 10.7107 | 52.09 | 33.9016 |
| 10.7608 | 52.02 | 33.9247 |
| 10.8108 | 51.95 | 33.9478 |
| 10.8609 | 51.87 | 33.9708 |

|         |       |         |
|---------|-------|---------|
| 10.9109 | 51.78 | 33.9938 |
| 10.961  | 51.68 | 34.0167 |
| 11.011  | 51.58 | 34.0395 |
| 11.0611 | 51.46 | 34.0623 |
| 11.1111 | 51.36 | 34.085  |
| 11.1612 | 51.75 | 34.1076 |
| 11.2112 | 52.16 | 34.1301 |
| 11.2613 | 52.58 | 34.1526 |
| 11.3113 | 52.99 | 34.175  |
| 11.3614 | 53.40 | 34.1973 |
| 11.4114 | 53.81 | 34.2195 |
| 11.4615 | 54.22 | 34.2417 |
| 11.5115 | 54.62 | 34.2638 |
| 11.5616 | 55.03 | 34.2858 |
| 11.6116 | 55.43 | 34.3078 |
| 11.6617 | 55.83 | 34.3296 |
| 11.7117 | 56.23 | 34.3514 |
| 11.7618 | 56.63 | 34.3732 |
| 11.8118 | 57.02 | 34.3948 |
| 11.8619 | 57.42 | 34.4164 |
| 11.9119 | 57.81 | 34.4379 |
| 11.962  | 58.20 | 34.4593 |
| 12.012  | 58.60 | 34.4806 |
| 12.0621 | 58.98 | 34.5019 |
| 12.1121 | 59.37 | 34.5231 |
| 12.1622 | 59.76 | 34.5442 |
| 12.2122 | 60.14 | 34.5652 |
| 12.2623 | 60.53 | 34.5861 |
| 12.3123 | 60.91 | 34.607  |
| 12.3624 | 61.29 | 34.6278 |
| 12.4124 | 61.67 | 34.6485 |
| 12.4625 | 62.04 | 34.6692 |
| 12.5125 | 62.42 | 34.6897 |
| 12.5626 | 62.79 | 34.7102 |
| 12.6126 | 63.17 | 34.7306 |
| 12.6627 | 63.54 | 34.7509 |
| 12.7127 | 63.91 | 34.7712 |
| 12.7628 | 64.28 | 34.7913 |
| 12.8128 | 64.64 | 34.8114 |
| 12.8629 | 65.01 | 34.8314 |
| 12.9129 | 65.37 | 34.8514 |
| 12.963  | 65.74 | 34.8712 |
| 13.013  | 66.10 | 34.891  |
| 13.0631 | 66.46 | 34.9107 |

|         |       |         |
|---------|-------|---------|
| 13.1131 | 66.82 | 34.9303 |
| 13.1632 | 67.17 | 34.9498 |
| 13.2132 | 67.53 | 34.9693 |
| 13.2633 | 67.88 | 34.9886 |
| 13.3133 | 68.23 | 35.0079 |
| 13.3634 | 68.59 | 35.0272 |
| 13.4134 | 68.93 | 35.0463 |
| 13.4635 | 69.28 | 35.0654 |
| 13.5135 | 69.63 | 35.0843 |
| 13.5636 | 69.97 | 35.1032 |
| 13.6136 | 70.32 | 35.1221 |
| 13.6637 | 70.66 | 35.1408 |
| 13.7137 | 71.00 | 35.1595 |
| 13.7638 | 71.34 | 35.1781 |
| 13.8138 | 71.68 | 35.1966 |
| 13.8639 | 72.02 | 35.215  |
| 13.9139 | 72.35 | 35.134  |
| 13.964  | 72.68 | 35.0491 |
| 14.014  | 73.02 | 34.9598 |
| 14.0641 | 73.35 | 34.8663 |
| 14.1141 | 73.68 | 34.7683 |
| 14.1642 | 74.00 | 34.6658 |
| 14.2142 | 74.33 | 34.5586 |
| 14.2643 | 74.66 | 34.4467 |
| 14.3143 | 74.98 | 34.3298 |
| 14.3644 | 75.30 | 34.208  |
| 14.4144 | 75.62 | 34.0808 |
| 14.4645 | 75.94 | 33.9483 |
| 14.5145 | 76.26 | 33.8101 |
| 14.5646 | 76.58 | 33.6663 |
| 14.6146 | 76.89 | 33.5164 |
| 14.6647 | 77.21 | 33.3604 |
| 14.7147 | 77.52 | 33.1979 |
| 14.7648 | 77.83 | 33.0288 |
| 14.8148 | 78.14 | 32.8528 |
| 14.8649 | 78.45 | 32.6697 |
| 14.9149 | 78.76 | 32.4793 |
| 14.965  | 79.06 | 32.2822 |
| 15.015  | 79.37 | 32.0978 |
| 15.0651 | 79.67 | 32.3762 |
| 15.1151 | 79.97 | 32.6819 |
| 15.1652 | 80.27 | 32.9869 |
| 15.2152 | 80.57 | 33.2902 |
| 15.2653 | 80.87 | 33.5928 |

|         |       |         |
|---------|-------|---------|
| 15.3153 | 81.16 | 33.8936 |
| 15.3654 | 81.46 | 34.1937 |
| 15.4154 | 81.75 | 34.4921 |
| 15.4655 | 82.05 | 34.7898 |
| 15.5155 | 82.34 | 35.0857 |
| 15.5656 | 82.63 | 35.3809 |
| 15.6156 | 82.91 | 35.6744 |
| 15.6657 | 83.20 | 35.9673 |
| 15.7157 | 83.49 | 36.2583 |
| 15.7658 | 83.77 | 36.5488 |
| 15.8158 | 84.05 | 36.8374 |
| 15.8659 | 84.34 | 37.1255 |
| 15.9159 | 84.62 | 37.5075 |
| 15.966  | 84.90 | 37.8925 |
| 16.016  | 85.17 | 38.2799 |
| 16.0661 | 85.45 | 38.6705 |
| 16.1161 | 85.73 | 39.0636 |
| 16.1662 | 86.00 | 39.4603 |
| 16.2162 | 86.27 | 39.8596 |
| 16.2663 | 86.54 | 40.2627 |
| 16.3163 | 86.81 | 40.6687 |
| 16.3664 | 87.08 | 41.0787 |
| 16.4164 | 87.35 | 41.492  |
| 16.4665 | 87.62 | 41.9097 |
| 16.5165 | 87.88 | 42.3308 |
| 16.5666 | 88.15 | 42.7568 |
| 16.6166 | 88.41 | 43.1866 |
| 16.6667 | 88.67 | 43.6215 |
| 16.7167 | 88.93 | 44.0607 |
| 16.7668 | 89.19 | 44.5056 |
| 16.8168 | 89.45 | 44.9551 |
| 16.8669 | 89.71 | 45.4108 |
| 16.9169 | 89.96 | 45.8714 |
| 16.967  | 90.22 | 46.3378 |
| 17.017  | 90.47 | 46.7901 |
| 17.0671 | 90.72 | 46.8002 |
| 17.1171 | 90.97 | 46.7821 |
| 17.1672 | 91.22 | 46.7642 |
| 17.2172 | 91.47 | 46.746  |
| 17.2673 | 91.72 | 46.7279 |
| 17.3173 | 91.96 | 46.7096 |
| 17.3674 | 92.21 | 46.6913 |
| 17.4174 | 92.45 | 46.6728 |
| 17.4675 | 92.69 | 46.6544 |

|         |        |         |
|---------|--------|---------|
| 17.5175 | 92.94  | 46.6357 |
| 17.5676 | 93.18  | 46.6172 |
| 17.6176 | 93.42  | 46.5983 |
| 17.6677 | 93.65  | 46.5796 |
| 17.7177 | 93.89  | 46.5606 |
| 17.7678 | 94.13  | 46.5417 |
| 17.8178 | 94.36  | 46.5226 |
| 17.8679 | 94.59  | 46.5035 |
| 17.9179 | 94.83  | 46.4842 |
| 17.968  | 95.06  | 46.465  |
| 18.018  | 95.29  | 46.4456 |
| 18.0681 | 95.52  | 46.4262 |
| 18.1181 | 95.74  | 46.4066 |
| 18.1682 | 95.97  | 46.3871 |
| 18.2182 | 96.20  | 46.3674 |
| 18.2683 | 96.42  | 46.3477 |
| 18.3183 | 96.65  | 46.3278 |
| 18.3684 | 96.87  | 46.308  |
| 18.4184 | 97.09  | 46.288  |
| 18.4685 | 97.31  | 46.2681 |
| 18.5185 | 97.53  | 46.2479 |
| 18.5686 | 97.75  | 46.2278 |
| 18.6186 | 97.96  | 46.2075 |
| 18.6687 | 98.18  | 46.1873 |
| 18.7187 | 98.40  | 46.1669 |
| 18.7688 | 98.61  | 46.1466 |
| 18.8188 | 98.82  | 46.1261 |
| 18.8689 | 99.04  | 46.1056 |
| 18.9189 | 99.25  | 46.085  |
| 18.969  | 99.46  | 46.0644 |
| 19.019  | 99.67  | 46.0437 |
| 19.0691 | 99.87  | 46.0231 |
| 19.1191 | 100.08 | 46.0023 |
| 19.1692 | 100.29 | 45.9816 |
| 19.2192 | 100.49 | 45.9607 |
| 19.2693 | 100.69 | 45.9399 |
| 19.3193 | 100.90 | 45.9189 |
| 19.3694 | 101.10 | 45.8981 |
| 19.4194 | 101.30 | 45.877  |
| 19.4695 | 101.50 | 45.8561 |
| 19.5195 | 101.70 | 45.835  |
| 19.5696 | 101.90 | 45.814  |
| 19.6196 | 102.09 | 45.7929 |
| 19.6697 | 102.29 | 45.7719 |

|         |        |         |
|---------|--------|---------|
| 19.7197 | 102.48 | 45.7507 |
| 19.7698 | 102.68 | 45.7296 |
| 19.8198 | 102.96 | 45.7084 |
| 19.8699 | 103.25 | 45.6873 |
| 19.9199 | 103.63 | 45.666  |
| 19.97   | 104.02 | 45.6449 |
| 20.02   | 104.42 | 45.6236 |
| 20.0701 | 104.82 | 45.6024 |
| 20.1201 | 105.23 | 45.5811 |
| 20.1702 | 105.65 | 45.5599 |
| 20.2202 | 106.07 | 45.5386 |
| 20.2703 | 106.51 | 45.5173 |
| 20.3203 | 106.94 | 45.496  |
| 20.3704 | 107.39 | 45.4748 |
| 20.4204 | 107.85 | 45.4534 |
| 20.4705 | 108.32 | 45.4322 |
| 20.5205 | 108.79 | 45.4108 |
| 20.5706 | 109.28 | 45.3895 |
| 20.6206 | 109.77 | 45.3682 |
| 20.6707 | 110.28 | 45.3469 |
| 20.7207 | 110.79 | 45.3255 |
| 20.7708 | 111.32 | 45.3043 |
| 20.8208 | 111.86 | 45.2829 |
| 20.8709 | 112.41 | 45.2617 |
| 20.9209 | 112.95 | 45.2403 |
| 20.971  | 113.08 | 45.2191 |
| 21.021  | 113.17 | 45.1977 |
| 21.0711 | 112.83 | 45.1765 |
| 21.1211 | 112.47 | 45.1552 |
| 21.1712 | 112.12 | 45.134  |
| 21.2212 | 111.76 | 45.1128 |
| 21.2713 | 111.40 | 45.0916 |
| 21.3213 | 111.04 | 45.0704 |
| 21.3714 | 110.69 | 45.0493 |
| 21.4214 | 110.33 | 45.0281 |
| 21.4715 | 109.98 | 45.0071 |
| 21.5215 | 109.62 | 44.986  |
| 21.5716 | 109.27 | 44.965  |
| 21.6216 | 108.92 | 44.9439 |

**VALORES CALCULADOS PARA PARAGEM DE DOIS GRUPOS ELEVATÓRIOS**

| t      | Secção 2 e 3 | Secção 5 |
|--------|--------------|----------|
| 0      | 101.83       | 43.5385  |
| 0.0501 | 101.83       | 43.5385  |
| 0.1001 | 101.17       | 43.5385  |
| 0.1502 | 100.51       | 43.5385  |
| 0.2002 | 99.86        | 43.5385  |
| 0.2503 | 99.22        | 43.5385  |
| 0.3003 | 98.58        | 43.5385  |
| 0.3504 | 97.95        | 43.5385  |
| 0.4004 | 97.33        | 43.5385  |
| 0.4505 | 96.72        | 43.5385  |
| 0.5005 | 96.10        | 43.5385  |
| 0.5506 | 95.50        | 43.5385  |
| 0.6006 | 94.90        | 43.5385  |
| 0.6507 | 94.31        | 43.5385  |
| 0.7007 | 93.72        | 43.5385  |
| 0.7508 | 93.14        | 43.5385  |
| 0.8008 | 92.57        | 43.5385  |
| 0.8509 | 92.00        | 43.5385  |
| 0.9009 | 91.44        | 43.5385  |
| 0.951  | 90.88        | 43.5385  |
| 1.001  | 90.33        | 43.5385  |
| 1.0511 | 89.78        | 43.5385  |
| 1.1011 | 89.24        | 43.5385  |
| 1.1512 | 88.71        | 43.5385  |
| 1.2012 | 88.17        | 43.5385  |
| 1.2513 | 87.65        | 43.5385  |
| 1.3013 | 87.13        | 43.5385  |
| 1.3514 | 86.61        | 43.5385  |
| 1.4014 | 86.10        | 43.5385  |
| 1.4515 | 85.60        | 43.5385  |
| 1.5015 | 85.09        | 43.5385  |
| 1.5516 | 84.60        | 43.5385  |
| 1.6016 | 84.11        | 43.5385  |
| 1.6517 | 83.62        | 43.5385  |
| 1.7017 | 83.14        | 43.5385  |
| 1.7518 | 82.66        | 43.5385  |
| 1.8018 | 82.18        | 43.5385  |
| 1.8519 | 81.71        | 43.5385  |
| 1.9019 | 81.25        | 43.5385  |
| 1.952  | 80.79        | 43.5385  |
| 2.002  | 80.33        | 43.5385  |
| 2.0521 | 79.88        | 43.5385  |

|        |       |         |
|--------|-------|---------|
| 2.1021 | 79.43 | 43.5385 |
| 2.1522 | 78.98 | 43.5385 |
| 2.2022 | 78.54 | 43.5385 |
| 2.2523 | 78.10 | 43.5385 |
| 2.3023 | 77.67 | 43.5385 |
| 2.3524 | 77.24 | 43.5385 |
| 2.4024 | 76.82 | 43.5385 |
| 2.4525 | 76.39 | 43.5385 |
| 2.5025 | 75.98 | 43.5385 |
| 2.5526 | 75.56 | 43.5385 |
| 2.6026 | 75.15 | 43.5385 |
| 2.6527 | 74.74 | 43.5385 |
| 2.7027 | 74.34 | 43.5385 |
| 2.7528 | 73.94 | 43.5385 |
| 2.8028 | 73.54 | 43.5385 |
| 2.8529 | 73.15 | 43.5385 |
| 2.9029 | 72.76 | 43.5385 |
| 2.953  | 72.37 | 43.5385 |
| 3.003  | 71.99 | 43.5385 |
| 3.0531 | 71.61 | 43.5385 |
| 3.1031 | 71.23 | 43.5385 |
| 3.1532 | 70.85 | 43.5385 |
| 3.2032 | 70.48 | 43.5385 |
| 3.2533 | 70.11 | 43.5385 |
| 3.3033 | 69.75 | 43.5385 |
| 3.3534 | 69.39 | 43.5385 |
| 3.4034 | 69.03 | 43.5385 |
| 3.4535 | 68.67 | 43.5385 |
| 3.5035 | 68.32 | 43.5385 |
| 3.5536 | 67.97 | 43.5385 |
| 3.6036 | 67.62 | 43.5385 |
| 3.6537 | 67.27 | 43.5385 |
| 3.7037 | 66.93 | 43.5385 |
| 3.7538 | 66.59 | 43.5385 |
| 3.8038 | 66.25 | 43.5385 |
| 3.8539 | 65.92 | 43.5385 |
| 3.9039 | 65.59 | 43.5385 |
| 3.954  | 65.26 | 43.5385 |
| 4.004  | 64.93 | 42.9748 |
| 4.0541 | 64.61 | 42.417  |
| 4.1041 | 64.29 | 41.8637 |
| 4.1542 | 63.97 | 41.3162 |
| 4.2042 | 63.65 | 40.7731 |
| 4.2543 | 63.34 | 40.2357 |

|        |       |         |
|--------|-------|---------|
| 4.3043 | 63.03 | 39.7025 |
| 4.3544 | 62.72 | 39.1748 |
| 4.4044 | 62.41 | 38.6513 |
| 4.4545 | 62.11 | 38.1332 |
| 4.5045 | 61.80 | 37.6191 |
| 4.5546 | 61.50 | 37.1102 |
| 4.6046 | 61.21 | 36.6053 |
| 4.6547 | 60.91 | 36.1055 |
| 4.7047 | 60.62 | 35.6095 |
| 4.7548 | 60.33 | 35.1185 |
| 4.8048 | 60.04 | 34.6313 |
| 4.8549 | 59.75 | 34.1489 |
| 4.9049 | 59.47 | 33.6702 |
| 4.955  | 59.18 | 33.1962 |
| 5.005  | 58.90 | 32.7258 |
| 5.0551 | 58.63 | 32.2601 |
| 5.1051 | 58.35 | 31.7978 |
| 5.1552 | 58.07 | 31.34   |
| 5.2052 | 57.80 | 30.8856 |
| 5.2553 | 57.53 | 30.4356 |
| 5.3053 | 57.26 | 29.989  |
| 5.3554 | 57.00 | 29.5466 |
| 5.4054 | 56.73 | 29.1075 |
| 5.4555 | 56.47 | 28.6726 |
| 5.5055 | 56.21 | 28.2408 |
| 5.5556 | 55.95 | 27.8132 |
| 5.6056 | 55.69 | 27.3887 |
| 5.6557 | 55.44 | 26.9681 |
| 5.7057 | 55.18 | 26.5506 |
| 5.7558 | 54.93 | 26.137  |
| 5.8058 | 54.68 | 25.7263 |
| 5.8559 | 54.43 | 25.3195 |
| 5.9059 | 54.19 | 24.9156 |
| 5.956  | 53.94 | 24.5154 |
| 6.006  | 53.70 | 24.6386 |
| 6.0561 | 53.46 | 24.7606 |
| 6.1061 | 53.22 | 24.8813 |
| 6.1562 | 52.98 | 25.0009 |
| 6.2062 | 52.74 | 25.1193 |
| 6.2563 | 52.51 | 25.2365 |
| 6.3063 | 52.28 | 25.3526 |
| 6.3564 | 52.04 | 25.4675 |
| 6.4064 | 51.81 | 25.5814 |
| 6.4565 | 51.58 | 25.6941 |

|        |       |         |
|--------|-------|---------|
| 6.5065 | 51.36 | 25.8058 |
| 6.5566 | 51.13 | 25.9163 |
| 6.6066 | 50.91 | 26.0258 |
| 6.6567 | 50.69 | 26.1343 |
| 6.7067 | 50.46 | 26.2417 |
| 6.7568 | 50.24 | 26.3481 |
| 6.8068 | 50.03 | 26.4535 |
| 6.8569 | 49.81 | 26.5579 |
| 6.9069 | 49.59 | 26.6613 |
| 6.957  | 49.38 | 26.7637 |
| 7.007  | 49.17 | 26.8653 |
| 7.0571 | 48.96 | 26.9658 |
| 7.1071 | 48.75 | 27.0654 |
| 7.1572 | 48.54 | 27.1641 |
| 7.2072 | 48.33 | 27.2619 |
| 7.2573 | 48.13 | 27.3587 |
| 7.3073 | 47.92 | 27.4547 |
| 7.3574 | 47.72 | 27.5498 |
| 7.4074 | 47.52 | 27.6441 |
| 7.4575 | 47.32 | 27.7375 |
| 7.5075 | 47.12 | 27.83   |
| 7.5576 | 46.92 | 27.9217 |
| 7.6076 | 46.72 | 28.0126 |
| 7.6577 | 46.53 | 28.1026 |
| 7.7077 | 46.33 | 28.1919 |
| 7.7578 | 46.14 | 28.2803 |
| 7.8078 | 45.95 | 28.368  |
| 7.8579 | 45.76 | 28.4549 |
| 7.9079 | 45.57 | 28.541  |
| 7.958  | 45.38 | 28.6263 |
| 8.008  | 45.19 | 28.7109 |
| 8.0581 | 45.00 | 28.7948 |
| 8.1081 | 44.82 | 28.8779 |
| 8.1582 | 44.64 | 28.9603 |
| 8.2082 | 44.45 | 29.0419 |
| 8.2583 | 44.27 | 29.1229 |
| 8.3083 | 44.09 | 29.2032 |
| 8.3584 | 43.91 | 29.2827 |
| 8.4084 | 43.73 | 29.3616 |
| 8.4585 | 43.56 | 29.4398 |
| 8.5085 | 43.38 | 29.5173 |
| 8.5586 | 43.21 | 29.5941 |
| 8.6086 | 43.03 | 29.6704 |
| 8.6587 | 42.86 | 29.7459 |

|         |       |         |
|---------|-------|---------|
| 8.7087  | 42.69 | 29.8208 |
| 8.7588  | 42.52 | 29.8951 |
| 8.8088  | 42.35 | 29.9687 |
| 8.8589  | 42.18 | 30.0417 |
| 8.9089  | 42.01 | 30.1142 |
| 8.959   | 41.84 | 30.186  |
| 9.009   | 41.68 | 30.2572 |
| 9.0591  | 41.51 | 30.3278 |
| 9.1091  | 41.35 | 30.3978 |
| 9.1592  | 41.18 | 30.4672 |
| 9.2092  | 41.02 | 30.5361 |
| 9.2593  | 40.86 | 30.6043 |
| 9.3093  | 40.70 | 30.6721 |
| 9.3594  | 40.54 | 30.7392 |
| 9.4094  | 40.38 | 30.8058 |
| 9.4595  | 40.22 | 30.8719 |
| 9.5095  | 40.07 | 30.9374 |
| 9.5596  | 39.91 | 31.0024 |
| 9.6096  | 39.76 | 31.0669 |
| 9.6597  | 39.60 | 31.1308 |
| 9.7097  | 39.45 | 31.1942 |
| 9.7598  | 39.30 | 31.2571 |
| 9.8098  | 39.15 | 31.3195 |
| 9.8599  | 38.99 | 31.3814 |
| 9.9099  | 39.32 | 31.4428 |
| 9.96    | 39.64 | 31.5037 |
| 10.01   | 39.70 | 31.5641 |
| 10.0601 | 39.76 | 31.624  |
| 10.1101 | 39.81 | 31.6835 |
| 10.1602 | 39.85 | 31.7425 |
| 10.2102 | 39.89 | 31.801  |
| 10.2603 | 39.93 | 31.859  |
| 10.3103 | 39.96 | 31.9166 |
| 10.3604 | 39.99 | 31.9738 |
| 10.4104 | 40.01 | 32.0305 |
| 10.4605 | 40.03 | 32.0867 |
| 10.5105 | 40.04 | 32.1425 |
| 10.5606 | 40.05 | 32.1979 |
| 10.6106 | 40.06 | 32.2529 |
| 10.6607 | 40.06 | 32.3074 |
| 10.7107 | 40.05 | 32.3615 |
| 10.7608 | 40.04 | 32.4151 |
| 10.8108 | 40.03 | 32.4684 |
| 10.8609 | 40.01 | 32.5212 |

|         |       |         |
|---------|-------|---------|
| 10.9109 | 39.99 | 32.5737 |
| 10.961  | 39.96 | 32.6257 |
| 11.011  | 39.93 | 32.6774 |
| 11.0611 | 39.89 | 32.7286 |
| 11.1111 | 39.86 | 32.7795 |
| 11.1612 | 39.81 | 32.83   |
| 11.2112 | 39.76 | 32.88   |
| 11.2613 | 39.71 | 32.9298 |
| 11.3113 | 39.66 | 32.9791 |
| 11.3614 | 39.60 | 33.0281 |
| 11.4114 | 39.53 | 33.0767 |
| 11.4615 | 39.46 | 33.1249 |
| 11.5115 | 39.39 | 33.1728 |
| 11.5616 | 39.31 | 33.2203 |
| 11.6116 | 39.23 | 33.2674 |
| 11.6617 | 39.15 | 33.3143 |
| 11.7117 | 39.06 | 33.3607 |
| 11.7618 | 38.97 | 33.4069 |
| 11.8118 | 38.87 | 33.4526 |
| 11.8619 | 38.77 | 33.4981 |
| 11.9119 | 38.68 | 33.5432 |
| 11.962  | 39.18 | 33.588  |
| 12.012  | 39.81 | 33.6325 |
| 12.0621 | 40.44 | 33.6766 |
| 12.1121 | 41.06 | 33.7204 |
| 12.1622 | 41.68 | 33.7639 |
| 12.2122 | 42.29 | 33.8071 |
| 12.2623 | 42.90 | 33.85   |
| 12.3123 | 43.50 | 33.8925 |
| 12.3624 | 44.10 | 33.9347 |
| 12.4124 | 44.70 | 33.9766 |
| 12.4625 | 45.29 | 34.0182 |
| 12.5125 | 45.88 | 34.0595 |
| 12.5626 | 46.46 | 34.1005 |
| 12.6126 | 47.04 | 34.1411 |
| 12.6627 | 47.61 | 34.1815 |
| 12.7127 | 48.18 | 34.2215 |
| 12.7628 | 48.75 | 34.2613 |
| 12.8128 | 49.31 | 34.3007 |
| 12.8629 | 49.87 | 34.3399 |
| 12.9129 | 50.42 | 34.3787 |
| 12.963  | 50.97 | 34.4173 |
| 13.013  | 51.52 | 34.4555 |
| 13.0631 | 52.06 | 34.4935 |

|         |       |         |
|---------|-------|---------|
| 13.1131 | 52.59 | 34.5312 |
| 13.1632 | 53.13 | 34.5685 |
| 13.2132 | 53.66 | 34.6056 |
| 13.2633 | 54.18 | 34.6424 |
| 13.3133 | 54.70 | 34.679  |
| 13.3634 | 55.22 | 34.7152 |
| 13.4134 | 55.74 | 34.7512 |
| 13.4635 | 56.25 | 34.7868 |
| 13.5135 | 56.75 | 34.8222 |
| 13.5636 | 57.26 | 34.8574 |
| 13.6136 | 57.75 | 34.8922 |
| 13.6637 | 58.25 | 34.9268 |
| 13.7137 | 58.74 | 34.9611 |
| 13.7638 | 59.23 | 34.9952 |
| 13.8138 | 59.71 | 35.029  |
| 13.8639 | 60.19 | 35.0625 |
| 13.9139 | 60.67 | 34.843  |
| 13.964  | 61.14 | 34.6212 |
| 14.014  | 61.61 | 34.3966 |
| 14.0641 | 62.08 | 34.1696 |
| 14.1141 | 62.54 | 33.9399 |
| 14.1642 | 63.00 | 33.7078 |
| 14.2142 | 63.46 | 33.4731 |
| 14.2643 | 63.91 | 33.2361 |
| 14.3143 | 64.36 | 32.9965 |
| 14.3644 | 64.81 | 32.7546 |
| 14.4144 | 65.25 | 32.5102 |
| 14.4645 | 65.69 | 32.2635 |
| 14.5145 | 66.13 | 32.0143 |
| 14.5646 | 66.56 | 31.763  |
| 14.6146 | 66.99 | 31.5092 |
| 14.6647 | 67.42 | 31.2532 |
| 14.7147 | 67.84 | 30.9948 |
| 14.7648 | 68.26 | 30.7343 |
| 14.8148 | 68.68 | 30.4714 |
| 14.8649 | 69.09 | 30.2065 |
| 14.9149 | 69.51 | 29.9392 |
| 14.965  | 69.91 | 29.6698 |
| 15.015  | 70.32 | 29.3981 |
| 15.0651 | 70.72 | 29.1245 |
| 15.1151 | 71.12 | 28.8485 |
| 15.1652 | 71.52 | 28.5706 |
| 15.2152 | 71.91 | 28.2904 |
| 15.2653 | 72.30 | 28.0083 |

|         |       |         |
|---------|-------|---------|
| 15.3153 | 72.69 | 27.724  |
| 15.3654 | 73.07 | 27.4377 |
| 15.4154 | 73.45 | 27.1493 |
| 15.4655 | 73.83 | 26.859  |
| 15.5155 | 74.21 | 26.5667 |
| 15.5656 | 74.58 | 26.2724 |
| 15.6156 | 74.95 | 25.9763 |
| 15.6657 | 75.32 | 25.6783 |
| 15.7157 | 75.68 | 25.3788 |
| 15.7658 | 76.04 | 25.0783 |
| 15.8158 | 76.40 | 24.7843 |
| 15.8659 | 76.76 | 25.0658 |
| 15.9159 | 77.11 | 25.7175 |
| 15.966  | 77.46 | 26.3693 |
| 16.016  | 77.81 | 27.0194 |
| 16.0661 | 78.16 | 27.6697 |
| 16.1161 | 78.50 | 28.3183 |
| 16.1662 | 78.84 | 28.967  |
| 16.2162 | 79.18 | 29.614  |
| 16.2663 | 79.51 | 30.2612 |
| 16.3163 | 79.85 | 30.9066 |
| 16.3664 | 80.18 | 31.5522 |
| 16.4164 | 80.51 | 32.196  |
| 16.4665 | 80.83 | 32.84   |
| 16.5165 | 81.15 | 33.4822 |
| 16.5666 | 81.47 | 34.1246 |
| 16.6166 | 81.79 | 34.7652 |
| 16.6667 | 82.11 | 35.4059 |
| 16.7167 | 82.42 | 36.0449 |
| 16.7668 | 82.73 | 36.684  |
| 16.8168 | 83.04 | 37.3213 |
| 16.8669 | 83.35 | 37.9588 |
| 16.9169 | 83.65 | 38.5945 |
| 16.967  | 83.95 | 39.2304 |
| 17.017  | 84.25 | 39.8644 |
| 17.0671 | 84.55 | 40.4987 |
| 17.1171 | 84.84 | 41.1311 |
| 17.1672 | 85.14 | 41.7638 |
| 17.2172 | 85.43 | 42.3946 |
| 17.2673 | 85.71 | 43.0257 |
| 17.3173 | 86.00 | 43.6549 |
| 17.3674 | 86.28 | 44.2844 |
| 17.4174 | 86.57 | 44.9119 |
| 17.4675 | 86.85 | 45.5398 |

|         |       |         |
|---------|-------|---------|
| 17.5175 | 87.12 | 46.1657 |
| 17.5676 | 87.40 | 46.792  |
| 17.6176 | 87.67 | 47.4162 |
| 17.6677 | 87.94 | 48.0407 |
| 17.7177 | 88.21 | 48.6628 |
| 17.7678 | 88.48 | 49.2844 |
| 17.8178 | 88.74 | 49.896  |
| 17.8679 | 89.01 | 49.954  |
| 17.9179 | 89.27 | 49.8903 |
| 17.968  | 89.53 | 49.8271 |
| 18.018  | 89.78 | 49.764  |
| 18.0681 | 90.04 | 49.7013 |
| 18.1181 | 90.29 | 49.6387 |
| 18.1682 | 90.55 | 49.5766 |
| 18.2182 | 90.79 | 49.5145 |
| 18.2683 | 91.04 | 49.453  |
| 18.3183 | 91.29 | 49.3915 |
| 18.3684 | 91.53 | 49.3305 |
| 18.4184 | 91.77 | 49.2697 |
| 18.4685 | 92.01 | 49.2092 |
| 18.5185 | 92.25 | 49.1489 |
| 18.5686 | 92.49 | 49.0891 |
| 18.6186 | 92.72 | 49.0294 |
| 18.6687 | 92.96 | 48.9701 |
| 18.7187 | 93.19 | 48.911  |
| 18.7688 | 93.42 | 48.8524 |
| 18.8188 | 93.65 | 48.7939 |
| 18.8689 | 93.87 | 48.7358 |
| 18.9189 | 94.10 | 48.6779 |
| 18.969  | 94.32 | 48.6204 |
| 19.019  | 94.54 | 48.5631 |
| 19.0691 | 94.76 | 48.5062 |
| 19.1191 | 94.98 | 48.4494 |
| 19.1692 | 95.20 | 48.3931 |
| 19.2192 | 95.41 | 48.3369 |
| 19.2693 | 95.62 | 48.2812 |
| 19.3193 | 95.84 | 48.2256 |
| 19.3694 | 96.05 | 48.1704 |
| 19.4194 | 96.25 | 48.1153 |
| 19.4695 | 96.46 | 48.0607 |
| 19.5195 | 96.67 | 48.0062 |
| 19.5696 | 96.87 | 47.9521 |
| 19.6196 | 97.07 | 47.8982 |
| 19.6697 | 97.27 | 47.8447 |

|         |        |         |
|---------|--------|---------|
| 19.7197 | 97.47  | 47.7913 |
| 19.7698 | 97.67  | 47.7383 |
| 19.8198 | 98.11  | 47.6855 |
| 19.8699 | 98.54  | 47.6331 |
| 19.9199 | 99.22  | 47.5808 |
| 19.97   | 99.90  | 47.5289 |
| 20.02   | 100.58 | 47.4772 |
| 20.0701 | 101.26 | 47.4258 |
| 20.1201 | 101.95 | 47.3746 |
| 20.1702 | 102.64 | 47.3238 |
| 20.2202 | 103.33 | 47.2732 |
| 20.2703 | 104.02 | 47.2229 |
| 20.3203 | 104.72 | 47.1727 |
| 20.3704 | 105.41 | 47.123  |
| 20.4204 | 106.11 | 47.0734 |
| 20.4705 | 106.81 | 47.0242 |
| 20.5205 | 107.52 | 46.9751 |
| 20.5706 | 108.22 | 46.9264 |
| 20.6206 | 108.93 | 46.8778 |
| 20.6707 | 109.64 | 46.8296 |
| 20.7207 | 110.35 | 46.7815 |
| 20.7708 | 111.06 | 46.7339 |
| 20.8208 | 111.78 | 46.6863 |
| 20.8709 | 112.49 | 46.6391 |
| 20.9209 | 113.21 | 46.5921 |
| 20.971  | 113.93 | 46.5454 |
| 21.021  | 114.65 | 46.4989 |
| 21.0711 | 115.38 | 46.4528 |
| 21.1211 | 116.10 | 46.4068 |
| 21.1712 | 116.83 | 46.3612 |
| 21.2212 | 117.56 | 46.3157 |
| 21.2713 | 118.29 | 46.2706 |
| 21.3213 | 119.02 | 46.2257 |
| 21.3714 | 119.76 | 46.1811 |
| 21.4214 | 120.49 | 46.1367 |
| 21.4715 | 121.23 | 46.0926 |
| 21.5215 | 121.97 | 46.0487 |
| 21.5716 | 122.71 | 46.0052 |
| 21.6216 | 123.45 | 45.9618 |