INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO
MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL

Avaliação do Choque Hidráulico e Dispositivos de Proteção em Estações Elevatórias de Águas Residuais

MARCO ANTÓNIO PEREIRA PINTO
novembro de 2016

POLITÉCNICO
DO PORTO

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO
MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL

Avaliação do Choque Hidráulico e Dispositivos de Proteção em Estações Elevatórias de Águas Residuais

MARCO ANTÓNIO PEREIRA PINTO

Novembro de 2016

POLITÉCNICO
DO PORTO

AVALIAÇÃO DO CHOQUE HIDRÁULICO E DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO EM ESTAÇÕES ELEVATÓRIAS DE ÁGUAS RESIDUAIS

MARCO ANTÓNIO PEREIRA PINTO

Relatório de Estágio submetido para satisfação parcial dos requisitos do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL – RAMO DE INFRAESTRUTURAS

Orientador: António Francisco Soto Maior Pestana Silva

Supervisora: Teresa Maria Bastos (Águas do Norte, SA)

NOVEMBRO DE 2016

ÍNDICE GERAL

Índice Geral iii

Resumo v

Abstract vii

Agradecimentos ix

Índice de Texto xi

Índice de Figuras xv

Índice de Tabelas xix

Símbolos e Acrónimos xxi

1 Introdução 1

2 Entidade de Acolhimento 5

3 Estações Elevatórias: Breves Notas Técnicas 7

4 Choque Hidráulico 17

5 Caso de Estudo: Estação Elevatória de Canelas 53

6 Modelação de Dispositivo em *Matlab*: Chaminé de Equilíbrio 65

7 Considerações Finais 71

Referências Bibliográficas 73

Anexos 77

RESUMO

A ocorrência de regimes transitórios, causados pelas variações de caudal e de pressões num intervalo de tempo, designa-se por choque hidráulico ou golpe de ariete. O fenómeno pode estar relacionado com o fecho rápido de uma válvula ou a paragem/arranque quase instantâneo das bombas a montante da conduta elevatória.

O cálculo do choque hidráulico e respetiva análise no dimensionamento de sistemas sob pressão, revela-se muito importante uma vez que este fenómeno pode colocar em causa o bom funcionamento e integridade dos sistemas hidráulicos. Ao considerar o choque hidráulico no dimensionamento de uma conduta elevatória, previne-se a ocorrência de subpressões ou sobrepressões a que esta pode estar sujeita.

Um dos métodos mais utilizados e abordado no presente relatório é o método das características. Entre outras vantagens, este método permite definir condições de fronteira no sistema em análise. Para o efeito, utiliza-se no presente documento um programa baseado no método das características e desenvolvido em "*Matlab"* pelo Professor Pacheco Figueiredo, que permite avaliar o fenómeno do choque hidráulico bem como a influência de um dispositivo de proteção instalado (RAC) ou ocorrência de fugas e perdas num sistema.

O caso de estudo deste relatório de estágio expõe uma estação elevatória de águas residuais, estação elevatória de Canelas, localizada em Vila Nova de Gaia e integra o subsistema de Gaia Litoral que foi concessionado à Águas do Norte S.A..

Palavras-chave: regimes transitórios, choque hidráulico, método das características, condições fronteira, escoamento em pressão, proteção ao choque hidráulico, estações elevatórias, águas residuais.

ABSTRACT

The occurrence of transient regimes, caused by the pressure and flow variations during the interval of time, can be designated by water hammer. This phenomenon can be related with the rapid closure of a valve or with the almost immediate stop and start of the pumps upstream the pumping system.

The calculus of the water hammer and respective analysis on the pressure sizing system has been gaining wide interest since this phenomenon may damage the proper functioning and integrity of the hydraulic systems. When considering the water hammer on sizing of the pumping system, we can prevent the occurrence of under or overpressure that it may be exposed to.

One of the methods more used and addressed on the present report is the characteristics method. Among other advantages, this method allows us to define the boundary conditions of the system under analysis. For this purpose, we use on the present report a program based on the characteristics method and developed in "Matlab" by Professor Pacheco Figueiredo that allows us to evaluate the water hammer phenomenon as well as the influence of one protection device installed (air vassel).

The study case of this internship exposes the pumping station of the waste water, pumping station of Canelas, localized at Vila Nova de Gaia and instate the sub-system of Gaia-Litoral that was concessioned to the Águas do Norte, SA.

Keywords: transient regimes, water hammer, characteristics method, boundary conditions, pressure flow, water hammer protection, pumping station, wastewater.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Eng.º António Pestana, pelo acompanhamento, pela disponibilidade total demonstrada ao longo de todos estes meses de trabalho. Pela sua insistência para que questionasse, para que investigasse e para que se fizesse sempre o melhor. Por todos os conselhos que me deu no decorrer desta caminhada e pela sabedoria que partilhou comigo.

À Eng.ª Teresa Bastos e à Eng.ª Catarina Tuna, minhas supervisoras, pelas dicas, pela partilha de conhecimentos, pelo acompanhamento, disponibilidade e mobilização de recursos para me ajudar. A toda a equipa das Águas do Norte com que tem tive o prazer de trabalhar no decorrer do estágio, pela colaboração e bom ambiente de trabalho.

Ao Professor Pacheco Figueiredo, da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, pela sua colaboração e disponibilidade quando o procurei.

Aos meus amigos, os que sabem que colaboraram comigo de uma ou de outra forma, por ouvirem os meus desabafos e testemunhos desta caminhada e de todo o percurso académico.

À minha namorada, por ser um pilar na minha vida, pelos seus bons conselhos, por estar sempre lá no sítio certo e na hora certa para me dar a força e a confiança necessária para continuar.

Aos meus pais e irmã, é por eles que cá estou. Por todo o apoio e carinho, pelo esforço que fizeram para tornar esta etapa possível, por toda a paciência nos momentos de maior pressão, pela compreensão quando não pude estar presente, por acreditarem em mim e por serem pessoas incríveis.

ÍNDICE DE TEXTO

1 Introdução 1

1.1 Considerações iniciais 1

1.2 Objetivos 2

1.3 Organização do relatório 3

2 Entidade de Acolhimento 5

2.1 Descrição e enquadramento 5

2.2 Missão, Visão e Estratégia 6

2.2.1 Missão 6

2.2.2 Visão 6

2.2.3 Estratégia 6

3 Estações Elevatórias: Breves Notas Técnicas 7

3.1 Componentes funcionais 7

3.1.1 Obra de entrada 8

3.1.2 Poço de bombagem 10

3.1.3 Câmara de manobras 10

3.1.3.1 Válvulas de seccionamento 10

3.1.3.2 Válvulas de retenção 12

3.2 Conceitos hidráulicos fundamentais no dimensionamento do grupo elevatório 12

3.2.1 Teorema de Bernoulli 12

3.2.2 Perdas de Carga 14

3.2.3 Curva de NPSH e cavitação 15

4 Choque Hidráulico 17

4.1 Breve descrição do fenómeno 17
4.2 Equações fundamentais do movimento 17
4.2.1 Princípio do equilíbrio dinâmico 18
4.2.1.1 Forças envolvidas 19
4.2.2 Princípio de conservação da massa 21
4.3 Método expedito 25
4.3.1 Metodologia simplificada de Joukowsky-Allievi-Michaud 27
4.4 Método numérico – Método das Características 29
4.4.1 Condição de fronteira no reservatório de nível constante 34
4.4.2 Condição de fronteira no grupo elevatório 35
4.4.3 Condição de fronteira na Chaminé de Equilíbrio 37
4.4.4 Condição de fronteira no RAC 39
4.5 Dispositivos de proteção e/ou minimização do choque hidráulico 41
4.5.1 Reservatório unidirecional 41
4.5.2 Conduta de aspiração paralela 42
4.5.3 Volante de inércia 44
4.5.4 Chaminé de equilíbrio 44
4.5.5 Reservatório de ar comprimido 45
4.5.6 Reservatório hidropneumático com alimentação automática de ar 48
4.5.6.1 Descrição do funcionamento do RHAAA 49
5 Caso de Estudo: Estação Elevatória de Canelas 53
5.1 Enquadramento: Subsistema de Gaia Litoral 53
5.1.1 ETAR de Gaia Litoral 53
5.1.1.1 Intercetores 54
5.1.1.2 Estações elevatórias 54
5.1.1.3 Condutas elevatórias 55
5.2 Estação elevatória de Canelas 55

5.2.1 Descrição da estação elevatória 55

5.2.1.1 Obra de entrada 56

5.2.1.2 Poço de bombagem 56

5.2.1.3 Câmara de manobras 57

5.2.1.4 Conduta elevatória 57

5.2.1.5 Dispositivo de proteção contra o choque hidráulico 57

5.2.1.6 Instalações elétricas e sistema de ar comprimido 58

5.2.2 Características do grupo eletrobomba 60

5.2.3 Modelação do choque hidráulico sem dispositivo de proteção em "*Matlab"* 61

5.2.4 Estudo de nova solução para proteção ao choque hidráulico 64

6 Modelação de Dispositivo em *Matlab*: Chaminé de Equilíbrio 65

6.1 Inserção da chaminé de equilíbrio no programa de cálculo 66

6.2 Aplicação do programa com chaminé de equilíbrio ao caso de estudo de Canelas 67

7 Considerações Finais 71

7.1 Conclusões 71

7.2 Desenvolvimentos Futuros 72

Anexos 77

Anexo I – Planta da Estação Elevatória de Canelas .....

Anexo II – Ficha Técnica do Grupo Eletrobomba .....

Anexo III – Folha inicial *"input"* .....

Anexo IV – Resultados da Simulação: folha *"output"* .....

Anexo V – Código da Rotina em "*Matlab"* da Modelação da Chaminé de Equilíbrio .....

Anexo VI – Resultados da Simulação com chaminé de Equilíbrio: Folha *"output"* .....

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Estrutura organizacional da empresa (www.adnorte.pt) 6

Figura 3.1 - Exemplo de estação elevatória (http://www.moleiro.com.br/produtos.asp)..... 8

Figura 3.2 - Válvula mural (adaptado de www.soltechltda.com)..... 9

Figura 3.3 - Gradagem mecânica (adaptado de http://wefbuyersguide.wef.org)..... 9

Figura 3.4 - Válvula de cunha (adaptado de www.fucoli-somepal.pt)..... 11

Figura 3.5 - Válvula de borboleta (adaptado de www.fucoli-somepal.pt)..... 12

Figura 3.6 - Válvula de retenção (Marques e Sousa, 2011)..... 12

Figura 3.7 - Desenho para aplicação do teorema de Bernoulli 13

Figura 4.1 - Trecho elementar de conduta para aplicação da equação do princípio do equilíbrio dinâmico (adaptado de Wylie e Streeter, 1978)..... 18

Figura 4.2 - Trecho da conduta utilizado para a obtenção da equação o princípio da conservação da massa (adaptado de Wylie e Streeter, 1978)..... 22

Figura 4.3 - Envolvente de manobra lenta (adaptado de Vivas, 2014) 28

Figura 4.4 - Envolvente de manobra rápida (adaptado de Vivas, 2014) 28

Figura 4.5 - Envolvente de manobra instantânea (adaptado de Vivas, 2014) 28

Figura 4.6 - Linhas características (adaptado de Lopes, 2016) 31

Figura 4.7 - Mudança de inclinação da conduta (adaptado de Lopes, 2016) 33

Figura 4.8 - Fronteira a jusante em carga (a) e em descarga para a atmosfera (b) (adaptado de Silva, 2014) 34

Figura 4.9 - Curva caraterística da bomba (adaptado de Silva, 2014)..... 36

Figura 4.10 - Representação de Chaminé de Equilíbrio 37

Figura 4.11 - Ligação do RAC à conduta elevatória (adaptado de Lopes, 2016) 40

Figura 4.12 - Reservatório unidirecional - RUD (adaptado de Mendes, 2011) 42

Figura 4.13 - Conduta de aspiração paralela - CAP (adaptado de Lopes, 2016) 43

Figura 4.14 - Volante de inércia (adaptado de Valente, 2008)..... 44

Figura 4.15 - Chaminé de equilíbrio (adaptado de http://www.leb.esalq.usp.br) 45

Figura 4.16 - Reservatório de ar comprimido..... 46

Figura 4.17 - Representação esquemática de um RAC (adaptado de Mendes, 2011)..... 46

Figura 4.18 - Reservatório hidropneumático para águas residuais (adaptado de Mendes, 2011) 47

Figura 4.19 - Exemplo de RHAAA e respetivos constituintes (adaptado do catálogo técnico da Charlatte, 2015) 48

Figura 4.20 - Sistema RHAAA - válvula de libertação de ar (adaptado do catálogo técnico da Charlatte, 2015) 49

Figura 4.21 - Sistema RHAAA - funcionamento tipo chaminé de equilíbrio (adaptado do catálogo técnico da Charlatte, 2015)..... 49

Figura 4.22 - Sistema RHAAA - fecho da válvula (adaptado do catálogo técnico da Charlatte, 2015)..... 50

Figura 4.23 - Sistema RHAAA - ar comprimido (adaptado do catálogo técnico da Charlatte, 2015)..... 50

Figura 4.24 - Sistema RHAAA - funcionamento tipo RUD (adaptado do catálogo técnico da Charlatte, 2015) 51

Figura 4.25 - Sistema RHAAA - descida do nível da água (adaptado do catálogo técnico da Charlatte, 2015) 51

Figura 4.26 - Sistema RHAAA – oscilações (adaptado de Catálogo Técnico da Charlatte, 2015)..... 52

Figura 5.1 - ETAR de Gaia Litoral (www.adnorte.pt) 53

Figura 5.2 - Estações elevatórias do subsistema de Gaia Litoral..... 54

Figura 5.3 - Localização da EE de Canelas..... 55

Figura 5.4 - Obra de entrada 56

Figura 5.5 - Câmara de manobras 57

Figura 5.6 - Perfil Longitudinal da Conduta Elevatória de Canelas..... 58

Figura 5.7 - Compressor com reservatório de ar comprimido 59

Figura 5.8 - Quadro elétrico..... 59

Figura 5.9 - Bomba submersível Faggiolati instalada na estação elevatória..... 60

Figura 5.10 - Traçado da linha de carga em regime permanente "H_0" 62

Figura 5.11 - Comportamento da envolvente da linha de carga após a simulação sem dispositivos de proteção ao choque hidráulico 63

Figura 6.1 - Inserção de novos dados na folha *"input"* 66

Figura 6.2 - Variação do nível da água na chaminé de equilíbrio para vários diâmetros 67

Figura 6.3 - Comportamento das envolventes da linha de carga com chaminé de equilíbrio..... 68

Figura 6.4 - Nível da água no interior da chaminé de equilíbrio 69

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 4.1 - Coeficiente de inércia do grupo eletrobomba 26

Tabela 4.2 - Coeficiente de inclinação da conduta..... 27

Tabela 5.1 - Dados “input” da EE de Canelas 61

Tabela 5.2 - Ponto de funcionamento da estação elevatória de Canelas 63

Tabela 5.3 - Resultados da simulação ao choque hidráulico sem dispositivo de proteção 64

Tabela 6.1 - Dados *"input"* a inserir no programa..... 68

Tabela 6.2 - Resultados da simulação ao choque hidráulico com chaminé de equilíbrio 69

SÍMBOLOS E ACRÓNIMOS

a – celeridade

C_1 – parâmetro que traduz a influência da forma de fixação da conduta

C_2 – coeficiente experimental que depende da inclinação da conduta

D – diâmetro da conduta

E – módulo de elasticidade do material constituinte da conduta

e – espessura da conduta

g – aceleração da gravidade

H – carga hidráulica

H_g – altura geométrica

H_{gu} – desnível entre o plano da água no RUD e a superfície livre na extremidade de jusante

H_{man} – altura manométrica

H_0 – carga em regime permanente

I_0 – momento de inércia das massas girantes relativamente ao eixo de rotação

j – perda de carga unitária

k – rugosidade equivalente

K_1 – coeficiente experimental que representa o efeito da inércia do grupo eletrobomba

L – comprimento da conduta

M_m – momento motor

M_r – momento resistente

M_0 – momento atuante sobre as massas girantes da bomba

N – velocidade de rotação da bomba em rpm (rotações por minuto)

P – pressão relativa

PD – parâmetro que traduz a inércia das massas girantes da bomba

Q – caudal

Q_b – caudal na bomba

Re – número de Reynolds

S – área da secção da conduta

t – tempo

T_r – tempo de anulação do escoamento (Rosich)

U – velocidade média numa secção da conduta

U_0 – velocidade inicial do escoamento

V – Volume

z – cota topográfica

α_b – aceleração angular das massas girantes da bomba

β – coeficiente de combinação linear das equações diferenciais

ΔH – variação da carga hidráulica

ΔH_C – perda de carga contínua

ΔH_{Loc} – perda de carga localizada

Ɛ – módulo de elasticidade volumétrico

γ – peso volúmico do fluído

λ – coeficiente de resistência

η – rendimento da bomba

ρ – massa volúmica do fluído

τ_0 – tensão tangencial

μ – fase da onda de choque

ν – coeficiente de Poisson

CAP – conduta de aspiração paralela

CCB – curva caraterística da bomba

CH – chaminé de equilíbrio

EE – estação elevatória

ETAR – estação de tratamento de águas residuais

FFD – ferro fundido dúctil

NPSH – *net positive suction head*, ou carga absoluta útil na aspiração

PVC – policloreto de polivinila

RAC – reservatório de ar comprimido

RHAAA – reservatório hidropneumático de alimentação automática de ar

RUD – reservatório unidirecional

VR – válvula de retenção

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Os sistemas de drenagem urbana, que desempenham funções fundamentais nos domínios da saúde e do bem-estar das populações por eles servidas, são elementos chave na preservação do meio ambiente. A criação destas infraestruturas implicou elevados investimentos no passado, e a sua conservação/modernização implicará sempre grandes investimentos no futuro. Infelizmente a importância destes sistemas não costuma ser devidamente avaliada pelo utilizador comum. Este erro de avaliação resulta do facto de serem infraestruturas quase totalmente enterradas que operam a jusante do utilizador.

Dado o elevado valor patrimonial destas infraestruturas e os avultados investimentos em jogo, torna-se indispensável a utilização racional dos recursos, o que implica o estabelecimento correto de prioridades de intervenção nos sistemas. Desta forma tem de se ponderar atuar onde, quando e como for mais adequado, tendo em vista o desempenho global dos sistemas numa ótica de desenvolvimento sustentado (Almeida e Cardoso, 2010).

De modo a prevenir os variados tipos de problemas que estão associados às estações elevatórias, é necessária também uma abordagem sobre as causas técnicas que estão na origem desses problemas. O fenómeno do choque hidráulico, ou golpe de ariete, é um dos temas que requer maior atenção a nível das estações elevatórias por parte dos projetistas e dos técnicos de operação e manutenção. Este fenómeno provoca um sério risco de ocorrência de acidentes em instalações elevatórias e deve fazer-se uma avaliação associada aos regimes variáveis, de modo a prevenir deficiências no funcionamento dos circuitos e evitar um possível colapso das condutas.

O termo choque hidráulico é aplicado nos casos em que num regime variável (provocado por alterações nas condições de funcionamento de uma conduta elevatória) resultem variações de pressão consideráveis quando comparadas com o regime permanente, e a mobilização das forças elásticas da conduta e do líquido (Mendes, 2011).

Segundo Almeida (1979), citado por Mendes (2011), há uma hierarquização de procedimento associados ao projeto de sistemas elevatórios e, em particular neste caso, o estudo dos regimes transitórios. De acordo com o autor, a fase de projeto deve envolver a seguinte sequência de processos: análise preliminar do choque hidráulico; seleção dos dispositivos de proteção contra o choque hidráulico; análise do comportamento dos dispositivos selecionados; e as disposições construtivas e ensaios.

Nos dias que correm existem muitos programas de cálculo a nível de engenharia civil que são bastante utilizados mas que também têm as suas limitações e os seus custos. A comunidade científica trabalha constantemente no desenvolvimento de novos métodos e novos estudos para modelos computacionais com o objetivo de melhorar e solucionar os diversos problemas que vão surgindo. É cada vez mais usual nas instituições de ensino existirem programas de cálculo desenvolvidos por alunos e professores para melhorar os estudos e esta interação revela-se benéfica, uma vez que vão surgindo métodos mais recentes, e com maior ou menor dificuldade é possível modelar esses programas (Martins, 2009).

1.2 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como principal objetivo o estudo do choque hidráulico numa das estações elevatórias de águas residuais do Subsistema de Gaia Litoral, localizado no concelho de Vila Nova de Gaia, bem como o estudo dos dispositivos de proteção/minimização ao choque hidráulico e a sua modelação computacional. Este documento descreve em parte a realização do Estágio Curricular na empresa Águas do Norte S.A., para a conclusão do Mestrado em Engenharia Civil – ramo de Infraestruturas, do Instituto Superior de Engenharia do Porto.

A oportunidade do desenvolvimento do Estágio Curricular torna-se muito importante para a transição entre o percurso académico e percurso profissional pois permite a obtenção de competências e experiência inicial para abordar o mercado de trabalho com outra visão.

Para a realização destes objetivos recorreu-se a um programa desenvolvido pelo Professor Pacheco Figueiredo (Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto) no software *"Matlab".* Efetuou-se uma pesquisa bibliográfica sobre o tema, para que se tivesse uma visão mais alargada sobre aquilo que se pode fazer e quais os métodos a seguir para um diagnóstico das infraestruturas e equipamentos o mais completo possível, de modo a obter melhores resultados.

Foram feitas visitas contínuas à estação elevatória em estudo para uma melhor perceção do funcionamento dos sistemas, de possíveis anomalias, e para analisar a capacidade e o estado de conservação dos equipamentos. Estas visitas foram também importantes para obter os dados necessários para os posteriores cálculos referentes ao choque hidráulico e dispositivos de proteção.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO

O presente relatório divide-se em 7 capítulos, incluindo o presente capítulo, no qual se faz uma pequena abordagem inicial do tema, bem como a descrição dos objetivos a que o autor se propôs no decorrer do estágio curricular.

No Capítulo 2 faz-se uma breve apresentação da entidade de acolhimento bem como um enquadramento da empresa onde se desenvolveu o estágio curricular, e a sua área de atuação.

O Capítulo 3 consiste em breves noções técnicas que se consideram relevantes para compreender o modo de funcionamento das estações elevatórias de águas residuais. Neste capítulo é referida a constituição habitual de uma estação elevatória e descrevem-se alguns fundamentos hidráulicos importantes para um melhor entendimento dos capítulos seguintes.

No Capítulo 4 está concentrada a grande parte dos conceitos teóricos relativos ao choque hidráulico e a sua devida explicação, sendo o capítulo fundamental para o decorrer do tema. O capítulo comtempla a apresentação de vários dispositivos de proteção ao choque hidráulico, o seu funcionamento e vantagens e desvantagens para cada dispositivo. É feita uma análise às equações fundamentais que estão na origem do fenómeno do choque hidráulico e explica-se o método das características, entre os vários métodos que são enumerados para o cálculo do choque hidráulico. Depois da explicação do método, este capítulo explicita as equações fronteira associadas a alguns dispositivos que podem ser utilizados nos sistemas em estudo.

O Capítulo 5 diz respeito ao caso de estudo prático que foi acompanhado e desenvolvido no decorrer do estágio curricular. Neste capítulo apresentam-se as diversas características do sistema e os resultados provenientes da aplicação de um programa de cálculo baseado no método das características para o cálculo do choque hidráulico.

No Capítulo 6 explica-se os passos que se seguiram para a modelação de uma chaminé de equilíbrio, a forma como se integrou essa modelação num programa de cálculo em "*Matlab",* já existente, a justificação para alguns pressupostos adotados e também a aplicação da modelação ao caso de estudo de Canelas.

Por fim, no Capítulo 7 estão reunidas as conclusões retiradas do presente relatório referente ao estágio curricular e também algumas notas para possíveis trabalhos futuros relacionados com este tema.

2 ENTIDADE DE ACOLHIMENTO

2.1 DESCRIÇÃO E ENQUADRAMENTO

A Águas do Norte, S.A. foi constituída pelo Decreto-Lei n.º 93/2015, de 29 de maio, mediante a agregação das empresas Águas do Douro e Paiva, S.A., Águas de Trás-os-Montes e Alto Douro, S.A., Simdouro – Saneamento do Grande Porto, S.A. e Águas do Noroeste, S.A., integradas no Grupo Águas de Portugal. Em sequência, foi-lhe atribuída pelo Estado Português em regime de exclusivo, a concessão da exploração e da gestão do sistema multimunicipal de abastecimento de água e de saneamento do Norte de Portugal, pelo prazo de trinta anos.

Neste contexto, a Águas do Norte é a entidade gestora responsável pela captação, tratamento e abastecimento de água para consumo público; pela recolha, tratamento e rejeição de efluentes domésticos, urbanos e industriais e de efluentes provenientes de fossas séticas.

A Águas do Norte assume também a exploração e gestão do sistema de águas da região do Noroeste, que resulta da celebração de uma Parceria entre o Estado (Administração Central) e 8 Municípios (Administração Local). Esta parceria concretiza um processo de verticalização que reuniu, numa única entidade gestora, em regime de exclusivo, os serviços de abastecimento de água e de saneamento de águas residuais em "alta" (prestados aos Municípios) e em "baixa" (prestados aos utilizadores finais, os munícipes), de forma regular, contínua e eficiente.

A exploração e gestão dos referidos sistemas incluem o projeto, a construção, a extensão, a conservação, a reparação, a renovação, a manutenção e a melhoria das obras e das infraestruturas e a aquisição dos equipamentos e das instalações necessários ao desenvolvimento das atividades.

A estrutura organizacional para suportar as orientações estratégicas definidas pela empresa tem por base o organograma funcional que se apresenta de seguida na Figura 2.1. O estágio desenvolvido enquadrou-se na secção de Engenharia e Gestão de Ativos.

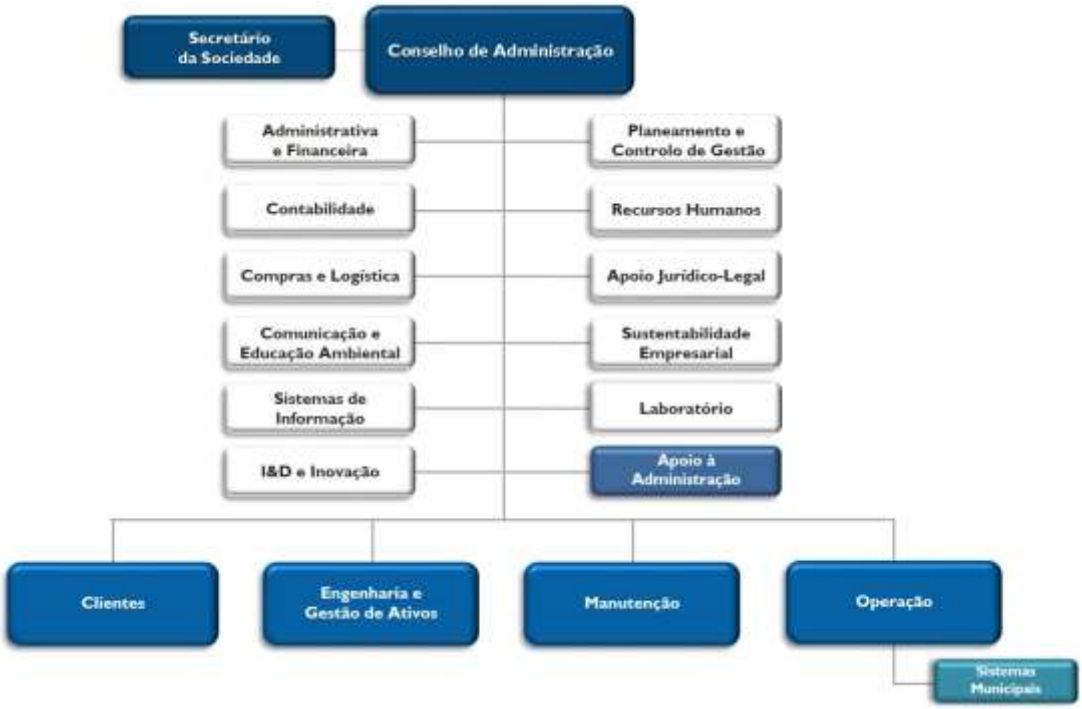


Figura 2.1 - Estrutura organizacional da empresa (www.adnorte.pt)

2.2 MISSÃO, VISÃO E ESTRATÉGIA

2.2.1 Missão

Conceber, construir, explorar e gerir o sistema multimunicipal de abastecimento de água e de saneamento do Norte de Portugal e o sistema de águas da região do Noroeste, num quadro de eficiência e sustentabilidade económica, social e ambiental, contribuindo para a melhoria da qualidade de vida dos cidadãos e para o desenvolvimento socioeconómico da região.

2.2.2 Visão

Ser uma empresa de referência nacional no setor da água em termos de qualidade do serviço público prestado e um parceiro ativo para o desenvolvimento da região onde se insere.

2.2.3 Estratégia

A empresa deve adotar uma estratégia de ecoeficiência económica, social e ambiental, uma empresa "amiga" próxima do cliente, que deve cumprir as necessidades e expetativas do Estado e dos Municípios e uma empresa que aposta na melhoria do serviço público prestado (adnorte, 2016).

3 ESTAÇÕES ELEVATÓRIAS: BREVES NOTAS TÉCNICAS

3.1 COMPONENTES FUNCIONAIS

Numa estação elevatória podem ser identificadas as seguintes componentes funcionais (Fernandes, 2008; Azevedo et al, 2015).

A. Obra de entrada, que tem como objetivo principal proceder à remoção de materiais sólidos de maiores dimensões existentes nas águas residuais. Inclui uma válvula mural e dispositivos destinados a remover das águas residuais afluentes os sólidos de maiores dimensões.

B. Poço de bombagem, destinado ao armazenamento das águas residuais antes de serem bombadas. Inclui o grupo de bombagem, habitualmente constituído por eletrobombas instaladas no interior do poço de bombagem.

C. Câmara de manobras onde se encontram instalados os órgãos de manobra e segurança bem como dipositivos de controlo. Inclui entre outros equipamentos, válvulas de retenção, de seccionamento, tubagens e acessórios (por exemplo, uniões de flange e juntas de desmontagem).

D. Sistemas mecânicos de elevação de peças pesadas, como diferenciais ou monocarris, de forma a auxiliar as operações de montagem e desmontagem dos grupos instalados;

E. Outros dispositivos (por exemplo, quadro elétrico de comando, compressor, posto de transformação, etc.).

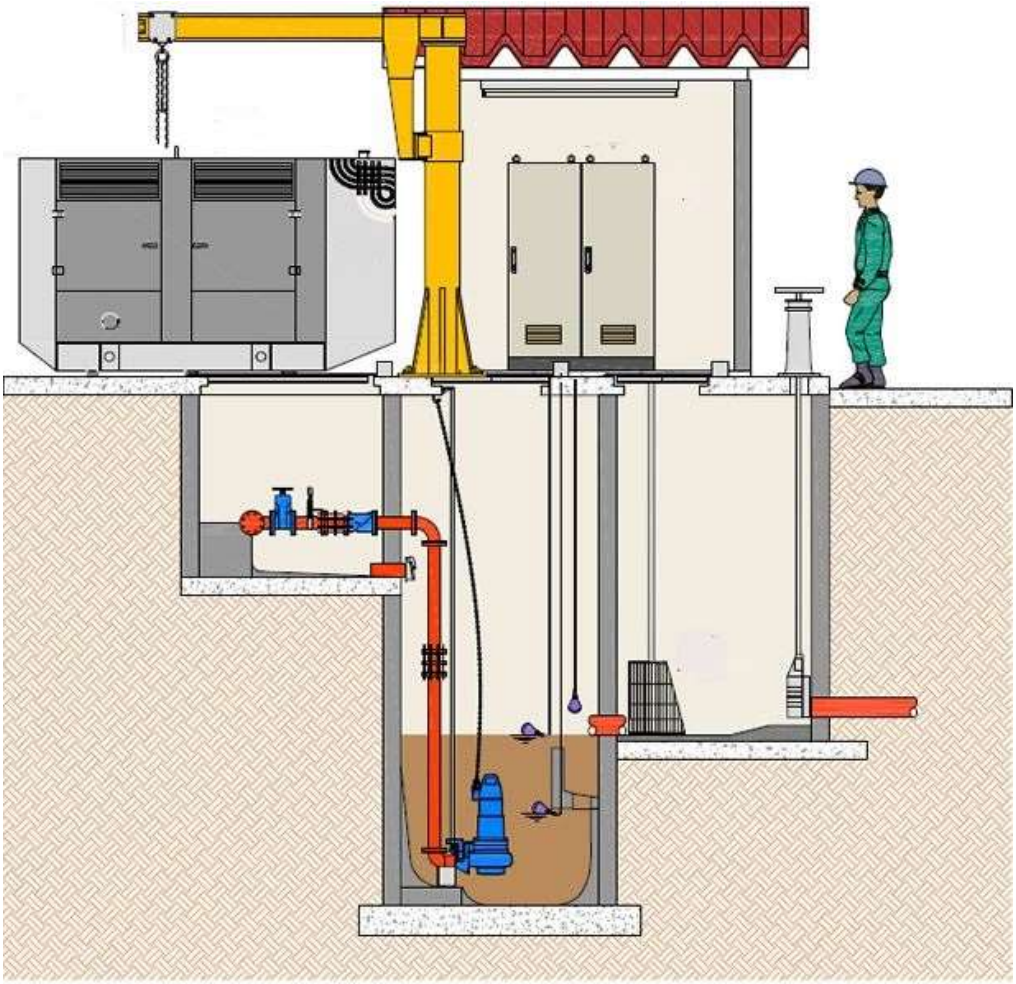


Figura 3.1 - Exemplo de estação elevatória
(http://www.moleiro.com.br/produtos.asp)

3.1.1 Obra de entrada

A obra de entrada é constituída pelo canal por onde são encaminhadas as águas residuais até ao poço de bombagem, bem como pelo respetivo equipamento. Normalmente este canal está equipado com uma válvula mural e um sistema de gradagem.

A válvula mural, Figura 3.2, que deverá ser instalada próximo da secção de montante do canal, tem como principal objetivo controlar o caudal de águas residuais que entram na estação. É também importante a presença deste dispositivo para que sempre que necessário (nomeadamente em caso de operações de manutenção ou de reparação) se possa impedir a afluência de águas residuais à estação elevatória (Azevedo et al, 2015).

Figura 3.2 - Válvula mural (adaptado de www.soltechltda.com)

O sistema de gradagem desempenha aquela que é considerada a primeira operação de uma estação elevatória: remover, na medida do possível, os sólidos arrastados pelo caudal afluente. Este equipamento é constituído por grades, geralmente providas de aberturas de tamanho uniforme, por onde passam as águas residuais. Estas grades devem ser providas de um dispositivo de limpeza que periodicamente promova a remoção dos sólidos retidos e a sua recolha em local apropriado (Azevedo et al, 2015). A Figura 3.3 mostra um exemplo de uma grade mecânica.

Figura 3.3 - Gradagem mecânica (adaptado de http://wefbuyersguide.wef.org)

3.1.2 Poço de bombagem

O poço de bombagem deve ter uma geometria que se define tendo em consideração alguns aspetos, entre eles o tipo e a quantidade de grupos elevatórios bem como a topografia da área de implantação (Fernandes, 2008).

De acordo com Marques e Sousa (2011), na determinação do volume do poço de bombagem deve-se ter em consideração aspetos como: não ser demasiado pequeno de modo a evitar que encha rapidamente; não ser demasiado grande de modo a que ocorram períodos de retenção muito longos, o que pode levar à criação de condições sépticas da água residual acumulada e consequentes maus odores; evitar formação de volumes parados que podem levar à criação de sedimentações indesejadas; controlar a turbulência que pode afetar a altura de aspiração e o rendimento das bombas, etc.

3.1.3 Câmara de manobras

É comum existir nas estações elevatórias um espaço denominado câmara de operação, ou câmara de manobras, onde ficam instalados os órgãos de manobra e segurança, nomeadamente válvulas de controlo, geradores, etc. (Marques e Sousa, 2011).

As válvulas são elementos fulcrais na operação das estações elevatórias devido às diversas funções que podem desempenhar. Elas são utilizadas para regular o caudal e a pressão, proteger condutas e bombas de sobrepressões, atenuar o fenómeno do choque hidráulico e a inversão do escoamento nas bombas, etc.

As válvulas podem provocar problemas graves nas instalações hidráulicas, pelo que o seu dimensionamento e sua localização devem ser criteriosamente definidos. Manobras de fecho, ou de abertura, demasiado rápidos bem como a seleção incorreta do tipo de válvula utilizado, podem induzir regimes hidráulicos transitórios severos (Pereira, 2010).

Os tipos de válvulas mais utilizados como órgãos de manobra e de segurança são (Marques e Sousa, 2011):

- Válvulas de seccionamento;
- Válvulas de retenção.

3.1.3.1 Válvulas de seccionamento

As válvulas de seccionamento podem ser de dois tipos: válvulas de cunha e válvulas de borboleta (Marques e Sousa, 2011). A sua função é permitir o isolamento de determinados trechos do sistema hidráulico de modo a que sejam possíveis intervenções para a resolução de avarias (Grilo, 2007).

As válvulas de cunha, Figura 3.4, têm como obturador uma placa circular ou retangular que se move perpendicularmente à direção do escoamento. São normalmente comandadas por chave ou volante, montado diretamente sobre o fuso (Marques e Sousa, 2011). Quando uma válvula de cunha está totalmente aberta, a passagem do escoamento é inferior à área da secção transversal da conduta, devido à forma da sede da válvula e das ranhuras. Estas válvulas têm elevada capacidade de vazão, e quando totalmente abertas levam a reduzidas perdas de carga. Normalmente operam totalmente abertas ou totalmente fechadas. Explica-se assim o facto deste tipo de válvulas estar associado ao seccionamento (Pereira, 2010).

A manobra de abertura destas válvulas pode tornar-se muito difícil sempre que exista uma grande diferença de pressão entre as duas faces da placa obturadora. Esta situação é evitada com a instalação de um "*by-pass"* à válvula munido de uma torneira para controlar a sua abertura (Marques e Sousa, 2011).

Figura 3.4 - Válvula de cunha (adaptado de www.fucoli-somepal.pt)

As válvulas de borboleta, Figura 3.5, são muito utilizadas nos sistemas adutores em pressão sob cargas hidráulicas relativamente pouco elevadas. Este tipo de válvula é adotado para órgãos de fecho de emergência, funcionando como válvula de segurança. Também são utilizadas como órgãos reguladores de caudal em condutas de pequeno diâmetro. As válvulas de borboleta são suscetíveis à cavitação e provocam vibrações em caso de turbulência (Pereira, 2010).

São adequadas para operar totalmente abertas ou totalmente fechadas, bem como para estrangular o escoamento em aberturas intermédias. Para determinadas formas do disco, a capacidade de vazão de uma válvula de borboleta aproxima-se da de uma válvula de cunha, na posição totalmente aberta.

Em relação às válvulas de cunha, as válvulas de borboleta apresentam algumas vantagens tais como: peso reduzido, ocupam menos espaço, não precisam de "*by-pass"* para compensação da diferença de pressões e são mais manobráveis (Marques e Sousa, 2011; Pereira, 2010).

Figura 3.5 - Válvula de borboleta (adaptado de www.fucoli-somepal.pt)

3.1.3.2 Válvulas de retenção

As válvulas de retenção, Figura 3.6, têm como principal função impedir que o escoamento se processe em sentido contrário ao pretendido. São normalmente colocadas imediatamente a jusante das bombas, impedindo assim o esvaziamento das condutas após paragem das bombas (Marques e Sousa, 2011). Também se utiliza este tipo de válvulas para evitar a inversão do caudal, quando o grupo elevatório se encontra a uma cota superior à aspiração, e na conduta de saída de reservatórios unidirecionais (RUD) de proteção contra o choque hidráulico (Veigas, 2007).

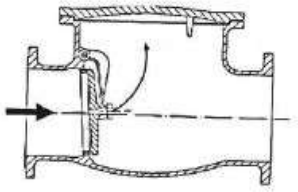


Figura 3.6 - Válvula de retenção (Marques e Sousa, 2011)

3.2 CONCEITOS HIDRÁULICOS FUNDAMENTAIS NO DIMENSIONAMENTO DO GRUPO ELEVATÓRIO

Um grupo elevatório é constituído por dois componentes fundamentais, a saber: o motor, que transforma a energia que recebe do exterior em energia mecânica, e a bomba, que comunica ao fluido a energia mecânica que recebe do motor.

3.2.1 Teorema de Bernoulli

O Teorema de Bernoulli, por traduzir o princípio da conservação da energia mecânica, permite a determinação da energia mecânica que a bomba deverá fornecer ao escoamento. Sendo γ o peso volúmico do fluido escoado e g a aceleração da gravidade, a energia mecânica total por unidade de peso do fluido escoado – a carga – numa secção transversal de uma conduta pressurizada é dada pela soma de três tipos de energia: a potencial de posição (dada pela cota de referência, z, da secção – usualmente a cota do ponto médio da secção), a potencial de pressão (que depende da pressão absoluta média, P, na

secção) e a cinética (função da velocidade média na secção, U) de acordo com a seguinte equação (Fernandes, 2008).

$$H = z + \frac{P}{\gamma} + \frac{U^2}{2g} \qquad 3.1$$

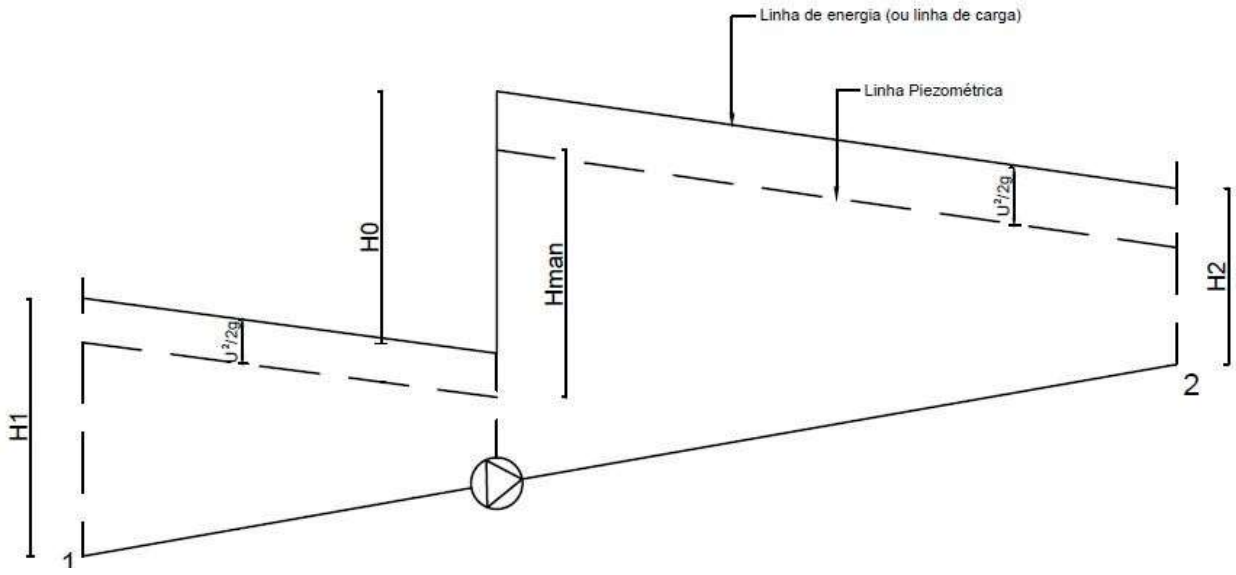


Figura 3.7 - Desenho para aplicação do teorema de Bernoulli

Aplicando o Teorema de Bernoulli entre as secções 1 e 2 vem:

$$H_2 = H_1 + H_0 - \Delta H \qquad 3.2$$

sendo ΔH a energia mecânica do fluído que é dissipada quando ele se desloca entre 1 e 2.

Desenvolvendo vem:

$$H_0 = H_2 - H_1 + \Delta H \;\leftrightarrow\; H_0 = (Z_2 - Z_1) + \frac{P_2 - P_1}{\gamma} + \frac{U_2^2 - U_1^2}{2g} + \Delta H \qquad 3.3$$

Se as velocidades a montante e a jusante da bomba forem idênticas, fica:

$$H_0 = H_g + \frac{P_2 - P_1}{\gamma} + \Delta H \qquad 3.4$$

Analisando o que se passa na bomba, se a velocidade U_1=U_2, então teremos necessariamente que H_0=H_{man} e então:

$$H_0 = H_{man} = H_g + \frac{P_2 - P_1}{\gamma} + \Delta H \qquad 3.5$$

A seleção das bombas para uma determinada instalação é efetuada com base no ponto de funcionamento desejado, que depende do caudal a elevar, Q, e respetiva altura de elevação, H_0. Quando a velocidade do escoamento a montante da bomba for igual à velocidade do escoamento a jusante, então a altura de elevação será coincidente com a altura de elevação piezométrica H_{man}.

O caudal a elevar corresponde ao somatório de todos os caudais que afluem ao local de implantação da estação elevatória. Tendo em conta que o caudal é dado pelo produto da velocidade do escoamento pela secção da conduta, S, temos que $Q = U \times S$ pelo que, para condutas circulares de diâmetro, D, virá:

$$Q = U \times \frac{\pi D^2}{4} \tag{3.6}$$

3.2.2 Perdas de Carga

As perdas de carga, ΔH, devem ser avaliadas em toda a extensão das condutas. Elas podem ser de dois tipos:

- Perdas de carga contínuas, ΔH_C, verificadas ao longo do percurso do escoamento;
- Perdas de carga localizadas, ΔH_{Loc}, provocadas pelas singularidades existentes na conduta (Azevedo et al, 2015).

A perda de carga total numa instalação hidráulica será dada pela expressão:

$$\sum \Delta H = \sum \Delta H_C + \sum \Delta H_{Loc} \tag{3.7}$$

Uma perda de carga contínua quantifica a energia mecânica dissipada pelo escoamento ao percorrer uma determinada distância. Sendo L a distância percorrida pelo escoamento e j uma grandeza adimensional denominada perda de carga unitária, a perda de carga contínua é quantificada recorrendo à expressão seguinte (Azevedo et al, 2015):

$$\Delta H_C = j \times L \tag{3.8}$$

Para o cálculo da perda de carga unitária, aplica-se uma expressão conhecida como fórmula de Darcy-Weisbach, que apenas é válida para escoamentos pressurizados em regime uniforme e em condutas de secção circular. Esta fórmula traduz a perda de carga unitária em função da aceleração da gravidade, g, da velocidade do escoamento, do diâmetro da conduta, D, e de um parâmetro adimensional, λ, denominado coeficiente de resistência:

$$j = \frac{\lambda}{D} \times \frac{U^2}{2g} \qquad 3.9$$

Para a determinação do parâmetro λ em regimes turbulentos (são estes os regimes que ocorrem nas condutas elevatórias) a melhor expressão atualmente disponível é a de Colebrook-White (Fernandes, 2008):

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \times \log\left(\frac{k/D}{3{,}7} + \frac{2{,}51}{R_e \times \sqrt{\lambda}}\right) \qquad 3.10$$

Na fórmula anterior figuram dois parâmetros ainda não apresentados: a rugosidade equivalente k (tem as dimensões de um comprimento e é uma característica do material da conduta) e o número índice de Reynolds $R_e = UD/\nu$, sendo ν o coeficiente de viscosidade cinemática do líquido (Fernandes, 2008). Existem numerosas explicitações, todas aproximadas e em ordem a λ, desta fórmula.

Uma perda de carga localizada é uma dissipação de energia mecânica do fluido que ocorre numa extensão do escoamento muito curta, de tal forma que tal dissipação se pode considerar associada a uma única secção transversal. A quantificação de uma perda de carga localizada pode ser efetuada recorrendo à seguinte expressão geral que, em termos teóricos, apenas é válida para escoamentos uniformes (k_{Loc} é um parâmetro adimensional específico de cada singularidade):

$$\Delta H_{Loc} = k_{Loc} \times \frac{U^2}{2g} \qquad 3.11$$

As perdas de carga localizadas têm usualmente valores muito inferiores aos das perdas de carga contínuas, sendo por isso desprezadas muitas vezes no pré-dimensionamento de uma conduta elevatória (Fernandes, 2008).

3.2.3 Curva de NPSH e cavitação

Para compreender melhor o fenómeno NPSH, carga absoluta útil na aspiração, convém primeiro referenciar outro fenómeno: a cavitação. Entende-se por cavitação o fenómeno de formação de bolhas de vapor no interior da massa fluida em movimento – processo que ocorre num trecho do escoamento onde a pressão do fluido desce até à pressão de vaporização - e subsequente desaparecimento das mesmas em zonas de pressões mais elevadas (Vivas, 2014). Este fenómeno da cavitação é prejudicial para o funcionamento das bombas e reflete-se na redução do seu período de vida útil (Marques e Sousa, 2011).

Os fatores que influenciam diretamente o NPSH são: a diferença entre a altura piezométrica absoluta no eixo da secção de entrada da bomba e a altura piezométrica absoluta no ponto de pressão absoluta mínima, o local de instalação, a temperatura de bombeamento, peso específico do fluido escoado, bem

como o tipo de entrada, diâmetro, comprimento e acessórios na conduta de aspiração, que vão interferir nas perdas de carga correspondentes (Vivas, 2014).

Para o cálculo do NPSH aplica-se o Teorema de Bernoulli entre a superfície livre do líquido no reservatório jusante, A, e a secção de entrada na bomba, B, como traduz a seguinte expressão (Fernandes, 2008):

$$\left(z + \frac{P}{\gamma} + \frac{U^2}{2g}\right)_A - \left(z + \frac{P}{\gamma} + \frac{U^2}{2g}\right)_B = \Delta H \qquad 3.12$$

Em fase de dimensionamento deve ser garantido que o $NPSH_{req}$, definido pelo fabricante, seja inferior ao $NPSH_{disp}$, garantido pelo sistema hidráulico. O $NPSH_{req}$ é uma característica da bomba que pode ser determinada por testes de laboratório ou cálculo hidráulico, e deve ser fornecido pelo fabricante do equipamento (Azevedo et al, 2015).

$$NPSH_{disp} > NPSH_{req}$$

A pressão à entrada da bomba tem que ser tal que subtraída do valor do NPSH requerido pela bomba, não dê um valor inferior à pressão mínima que, dentro da bomba, provoca cavitação (Fernandes, 2008), ou seja:

$$\left(\frac{P}{\gamma}\right)_B \geq P_{min} + NPSH_{req} \qquad 3.13$$

$$\Delta z + \left(\frac{P}{\gamma}\right)_A - \frac{U^2}{2 * g} - \Delta H - P_{B,min} = NPSH_{disp} \qquad 3.14$$

Segundo Marques e Sousa (2011), pode-se prevenir a ocorrência do fenómeno de cavitação através da adoção de medidas como:

- Baixar a cota de instalação da bomba;
- Aumentar o diâmetro da conduta de aspiração para diminuir as perdas de carga;
- Elevar a cota de superfície livre na aspiração;
- Escolher uma bomba com menor $NPSH_{req}$.

4 CHOQUE HIDRÁULICO

4.1 BREVE DESCRIÇÃO DO FENÓMENO

A ocorrência de um movimento variável numa conduta sob pressão dá origem a um fenómeno de grande importância que se designa por choque hidráulico ou golpe de ariete (Marques e Sousa, 2011). Este fenómeno traduz-se pela propagação da onda, ao longo de uma conduta pressurizada, em que há variações de pressão e de caudal.

Num sistema elevatório o fenómeno de choque hidráulico poderá ocorrer devido à paragem súbita da eletrobomba já que o arranque do grupo é feito de forma gradual. Esta paragem súbita poderá ser causada por avaria mecânica ou, o que é muito mais frequente, devido a uma interrupção instantânea do fornecimento de energia elétrica que alimenta o motor da bomba. Em qualquer dos casos a consequência é a redução da velocidade de rotação dos impulsores da bomba, que implica uma redução do caudal impulsionado (Silva, 2014; Costa, 2011).

A consideração do estudo do choque hidráulico no dimensionamento de uma conduta previne a ocorrência de pressões extremas, ou seja, sub ou sobrepressões inesperadas capazes de comprometer o funcionamento do sistema durante o seu período de exploração.

Geralmente a elaboração de projetos de sistemas elevatórios envolve duas fases distintas, a fase de estudo prévio e a fase de projeto de execução. A análise do choque hidráulico é um procedimento fundamental, não apenas em projetos de novos sistemas elevatórios mas também na remodelação de instalações existentes, caso impliquem alterações das condições de funcionamento (Mendes, 2011).

4.2 EQUAÇÕES FUNDAMENTAIS DO MOVIMENTO

Serão apresentados os passos fundamentais da dedução do modelo matemático efetuados por Pestana (2016), em documento que facultou ao autor do presente relatório de estágio.

A aplicação dos princípios de equilíbrio dinâmico e conservação da massa num escoamento sob pressão são a base da fundamentação teórica e matemática do choque hidráulico.

Para que sejam aplicados os princípios de equilíbrio dinâmico e de conservação da massa, tem de se ter em conta algumas hipóteses que simplificam essa aplicação, sendo elas:

- Escoamento unidimensional, com distribuição de velocidades e pressão uniformes em toda a secção transversal da conduta;
- As ondas elásticas de pressão são consideradas planas;
- A perda de carga no regime transitório, é calculada para cada instante como se fosse um regime permanente;
- O comportamento elástico das paredes da conduta obedece à Lei de Hooke, definido pelo módulo de elasticidade, E, e pelo coeficiente de Poisson, v.

4.2.1 Princípio do equilíbrio dinâmico

Em qualquer instante e em qualquer região da massa fluida terá de se verificar o equilíbrio de todas as forças que sobre essa região atuam. Terá de existir equilíbrio entre a resultante das forças exteriores e a taxa de variação da quantidade de movimento da massa que ocupa referida região. Apenas será utilizada a projeção, segundo o eixo da conduta, do equilíbrio dos vetores envolvidos.

$$\sum \vec{F}_{exterior} + \sum \vec{F}_{inércia} = 0 \qquad 4.1$$

É considerado para a sua dedução, um trecho elementar de um tubo de corrente delimitado por duas secções, afastadas de dx, como se pode observar na seguinte figura.

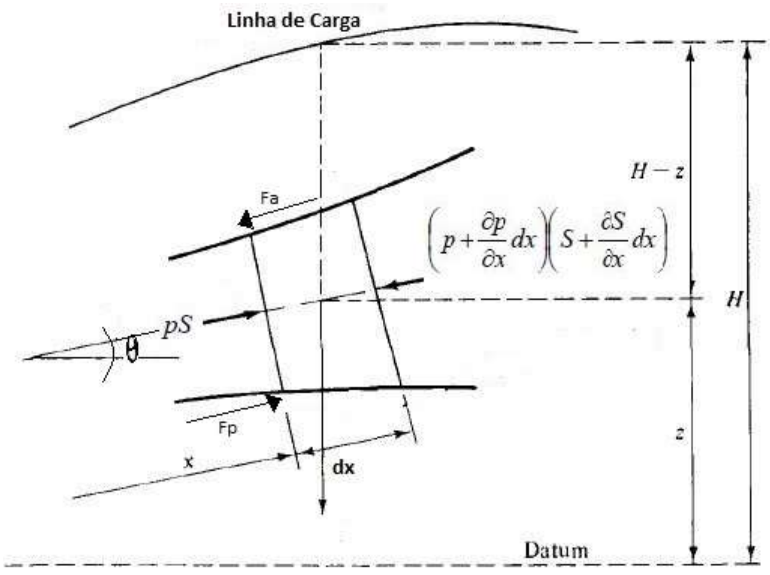


Figura 4.1 - Trecho elementar de conduta para aplicação da equação do princípio do equilíbrio dinâmico (adaptado de Wylie e Streeter, 1978)

Considere-se um trecho transversal do fluido, delimitado pela parede do tubo e por dois planos perpendiculares ao eixo da conduta, tal como se representa esquematicamente na Figura 4.1. O afastamento dos dois planos – dx – é muito pequeno. Seja θ o ângulo de inclinação do eixo da conduta, positivo quando a cota do eixo cresce com a coordenada linear x. Analise-se agora o equilíbrio dinâmico da massa que, num dado instante, ocupa o interior da região do espaço assim definida.

4.2.1.1 Forças envolvidas

i. Ação do fluído envolvente

A ação do fluido envolvente atuará sobre as duas superfícies fluidas que delimitam a fatia fluida. Esta ação, que é devida à pressão que reina no seio do fluido que se escoa, será determinada em função da pressão p referida ao eixo da conduta. Tal como está representado na Figura 4.1, esta ação tem resultante F_f dada por:

$$\begin{aligned} F_f &= p\,S - \left(p\,S + \frac{\partial}{\partial x}\,(p\,S)\,dx \right) \\ &= -\frac{\partial}{\partial x}(p\,S)dx \\ &= -\left(S\,\frac{\partial p}{\partial x} + p\,\frac{\partial S}{\partial x} \right) dx \end{aligned} \qquad 4.2$$

ii. Impulsão da parede sobre o trecho de fluído

A projeção, segundo o eixo da tubagem, da impulsão exercida pelo fluido sobre a parede do tubo, resulta da actuação de um diagrama de pressões rectangular sobre uma coroa circular de área $\frac{\partial S}{\partial x}\,dx$. Esta projeção é $-\left(p + \frac{1}{2}\frac{\partial p}{\partial x}dx\right)$. Desprezando os termos em dx^2 e reparando que a acção do exterior sobre o fluido é simétrica da que foi calculada vem:

$$Fp = p\,\frac{\partial S}{\partial x}\,dx \qquad 4.3$$

iii. Força de atrito entre a fatia fluida e a parede sólida

A quantificação das forças de atrito com a parede do tubo obriga à quantificação da perda de energia que o fluido experimenta ao percorrer a conduta. Para essa quantificação será necessário recorrer a fórmulas de resistência.

Segundo Novais Barbosa (1986), citado por Pestana (2016), entende-se por fórmulas de resistência as equações que permitem determinar as perdas de energia em função das características do escoamento, que se pressupõe uniforme.

Seja J a energia do fluido, por unidade do seu peso e por unidade do seu percurso, que é perdida por acção das forças que se opõem ao movimento deste fluido. No caso dos escoamentos sob pressão em regime uniforme, j, que é adimensional e frequentemente denominado perda de carga linear, é dado por uma fórmula de resistência denominada fórmula de Darcy-Weisbach (Novais-Barbosa, 1986):

$$j = \frac{\lambda U^2}{4gR} \tag{4.4}$$

em que λ é o coeficiente de resistência, adimensional e depende do número de Reynolds do escoamento como foi explicado anteriormente.

Tendo em consideração que a força de atrito se opõe ao deslocamento do fluido, terá de ter sinal oposto ao da velocidade. Assim sendo, a utilização da expressão 4.4 permite concluir que a projecção, sobre o eixo da conduta, da resultante das forças de atrito é:

$$F_a = -\rho \frac{\lambda \pi R |U| U}{4} dx \tag{4.5}$$

iv. Peso do trecho de fluído

Esta força é vertical com sentido descendente, pelo que a sua projeção sobre o eixo da conduta é $g \rho S dx * sen(\theta)$. Quando θ é positivo, a força projetada será dada por F_G, tem sentido oposto ao eixo dos xx, ou seja:

$$F_G = -g \rho S dx * sen(\theta) \tag{4.6}$$

v. Taxa de variação temporal da quantidade de movimento do trecho de fluido

Dá-se a designação de quantidade de movimento ao produto de uma massa por uma velocidade. Para valores de dx suficientemente pequenos, é aceitável escrever $H = \rho S U dx$. A taxa de variação pretendida pode assim escrever-se como:

$$\frac{dH}{dt} = U \frac{d}{dt}(\rho S dx) + \rho S dx \frac{dU}{dt} \tag{4.7}$$

O produto $\rho S dx$ representa a massa existente no trecho de fluido. Desprezando a taxa de variação temporal da massa do trecho face à taxa de variação temporal da velocidade U obtém-se a seguinte expressão para a taxa de variação da quantidade de movimento da fatia de fluido:

$$F_{qm} = \rho S dx \frac{dU}{dt} \tag{4.8}$$

O somatório das quatro forças quantificadas pelas igualdades 4.2, 4.3, 4.5 e 4.6 será igual à força de inércia quantificada por 4.8. Simplificando e igualando a zero a expressão resultante, obtém-se:

$$\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\lambda |U| U}{4R} + g * sen(\theta) + \frac{dU}{dt} = 0 \qquad 4.9$$

Como U, que é a velocidade média na secção inicial do trecho de fluido, depende de x e do tempo, e como o fluido se encontra em movimento – o mesmo acontecendo, portanto, ao trecho de fluido que tem vindo a ser considerado – ter-se-á $\frac{dU}{dt} = U\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial t}$, pelo que a igualdade 4.9 se pode escrever com a forma:

$$\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\lambda |U| U}{4R} + g * sen(\theta) + U\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial t} = 0 \qquad 4.10$$

Desprezando a taxa de variação, relativa a x, de ρ (g tem vindo a ser considerada constante), ter-se-á que $\frac{\partial p}{\partial x} = \rho\, g\, \left(\frac{\partial U}{\partial x} - sen\,(\theta)\right)$, o aspeto final da equação de equilíbrio dinâmico escrita em função da cota piezométrica H e considerando o caudal Q em vez da velocidade (equação 3.6), será (Wylie & Streeter, 1978):

$$\frac{1}{S}\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{Q}{S^2}\frac{\partial Q}{\partial x} + g\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\lambda Q|Q|}{4RS^2} = 0 \qquad 4.11$$

4.2.2 Princípio de conservação da massa

A dedução que se segue traduz o princípio da conservação da massa e é baseada na dedução apresentada por Wilye e Streeter (1978).

Considerando uma conduta deformável de eixo retilíneo, admite-se que as secções extremas desta conduta sofrem alterações de área, mantendo-se no entanto circulares (Figura 4.2). Seja x a coordenada que permite localizar, relativamente a uma reta exterior à tubagem mas paralela ao seu eixo, a posição da secção de montante e seja dx o comprimento do trecho de conduta. Designou-se a área da seção de montante por S e por U a velocidade média que o atravessa. Admite-se ainda que a secção montante está animada da velocidade u e que o seu movimento se dá na direção de x. Face às considerações, conclui-se que S, U e u dependem da coordenada linear x e do tempo t.

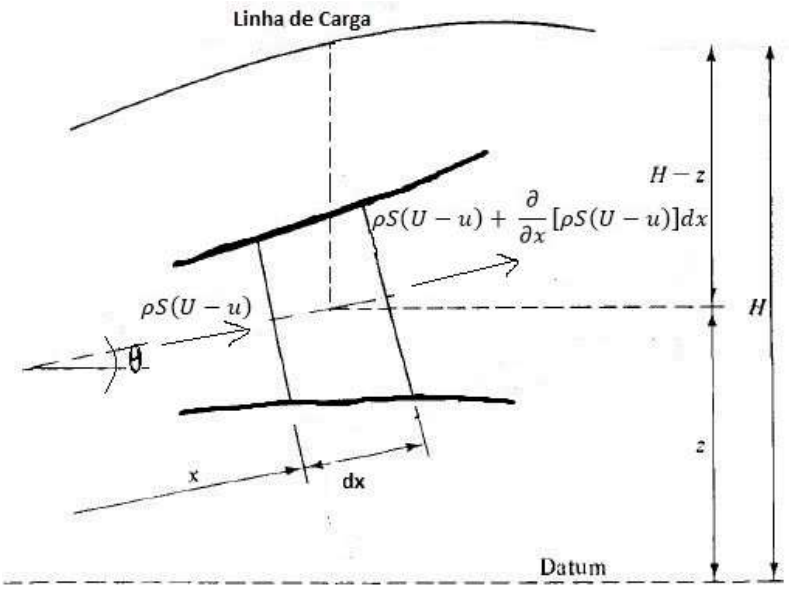


Figura 4.2 - Trecho da conduta utilizado para a obtenção da equação o princípio da conservação da massa (adaptado de Wylie e Streeter, 1978)

O princípio de conservação da massa, ou princípio da continuidade, define que a variação da quantidade de massa no interior do trecho elementar é igual à diferença entre a quantidade de massa que sai e a quantidade que entra no mesmo. Este princípio terá de ser satisfeito seja o intervalo de tempo grande ou pequeno, o que implica que as respetivas taxas de variação temporal (derivada total em ordem ao tempo) das massas satisfaçam a referida relação.

O caudal que atravessa a seção de montante é $Q = (U-u) * S$, e por se estar a considerar um fluido compressível, a massa volúmica pode variar no tempo t e no espaço x. Sendo ρ a massa volúmica do fluido na seção de montante, o princípio da conservação da massa, aplicado às taxas de variação temporal das massas, é dado pela expressão:

$$\frac{d}{dt}(\rho S\, dx) = \rho S(U-u) - \left(\rho S(U-u) + \frac{\partial}{\partial x}[\rho S(U-u)]dx\right) \qquad 4.12$$

Fixando o tempo, tanto a massa volúmica como a área da secção transversal do trecho variam apenas em função de x. A taxa de acumulação temporal poderá ser escrita como:

$$\frac{d}{dt}(\rho S\, dx) = dx\frac{d}{dt}(\rho S) + \rho S\frac{d}{dt}\, dx \qquad 4.13$$

Note-se que dx – o comprimento do trecho da conduta – apenas poderá variar no tempo e que esta variação se deverá à diferença entre as velocidades de deslocamento das duas secções que delimitam o trecho da conduta. Como a velocidade do movimento axial da tubagem na secção de montante é $u = \frac{dx}{dt}$, ter-se-á:

$$dx\frac{d}{dt}(\rho S) = dx\left[\frac{\partial}{\partial x}(\rho S)u + \frac{\partial}{\partial t}(\rho S)\right]$$
$$\rho S\frac{d}{dt}\,dx = \rho S\frac{\partial u}{\partial x}dx \qquad 4.14$$

Desta forma, a equação 4.12 poderá escrever-se:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho\, S\, U) - \frac{\partial}{\partial x}(\rho\, S\, u) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho\, S)\, u + \frac{\partial}{\partial t}(\rho\, S) + \rho\, S\,\frac{\partial u}{\partial x} = 0 \qquad 4.15$$

Como $\frac{\partial}{\partial x}(\rho\, S\, u) = \frac{\partial}{\partial x}(\rho\, S)\, u + \rho\, S\,\frac{\partial u}{\partial x}$ a equação 4.12 simplifica-se para:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho\, S\, U) + \frac{\partial}{\partial t}(\rho\, S) = 0 \qquad 4.16$$

Tendo em consideração que $\frac{\partial}{\partial x}(\rho\, S\, U) = U\,\frac{\partial}{\partial x}(\rho\, S) + \rho\, S\,\frac{\partial U}{\partial x}$ a equação 4.16 pode ser reescrita com a forma:

$$U\frac{\partial}{\partial x}(\rho\, S) + \frac{\partial}{\partial t}(\rho\, S) + \rho\, S\,\frac{\partial U}{\partial x} = 0 \qquad 4.17$$

A variável U é a velocidade média do fluido na secção de montante, pelo que se compreende que as duas primeiras parcelas expressas em 4.17 representam uma taxa de variação temporal – a derivada total em ordem ao tempo – calculada exclusivamente em função do movimento do fluido. Pode escrever-se então:

$$\frac{1}{\rho\, S}\,\frac{d\rho}{dt}\,(\rho\, S) + \frac{\partial U}{\partial x} = 0 \qquad 4.18$$

Desenvolvendo a primeira parcela:

$$\frac{1d\rho}{\rho dt} + \frac{dS}{Sdt} + \frac{\partial U}{\partial x} = 0 \qquad 4.19$$

Admitindo que o processo é isotérmico, a variação da massa volúmica do fluido apenas poderá dever-se à variação da pressão que sobre ele é exercida.

O módulo de elasticidade volumétrico, que será designado por Ɛ, é a propriedade física do fluido que relaciona as variações de pressão que sobre ele atua, com as variações de volume por elas provocadas. Sendo V o volume inicialmente ocupado por uma determinada massa fluida e dV a variação de volume que essa massa fluida sofreu quando foi submetida à variação infinitesimal de pressão dp, define-se:

$$\varepsilon = -V\frac{dp}{dV} \qquad 4.20$$

Sendo Ɛ uma constante, para a água Ɛ = 19.6x10^8 N/m^2, a equação 4.20 estabelece ser linear a relação entre o volume ocupado pelo fluido e a pressão a que esse fluido está submetido. Como $\frac{dp}{dV}$ é a derivada total da pressão em ordem ao volume, então o declive da reta $p = f(V)$ é $-\frac{\varepsilon}{V}$.

Ter-se-á portanto, $dp = -\frac{\varepsilon}{V} dV$. Sendo dt um intervalo de tempo infinitesimal, tem-se que $dV = \frac{\mathrm{dV}}{dt} dt$ e, de modo análogo $dp = \frac{\mathrm{dp}}{dt} dt$. A relação 4.20 pode ser escrita da forma:

$$\frac{dp}{dt} = -\frac{\varepsilon}{V}\frac{dV}{dt} \qquad 4.21$$

Está subjacente à definição de Ɛ a invariância, no tempo, da massa fluida. Por isso, pode ser escrito $\frac{d}{dt}(\rho V) = 0$. Aplicando a regra de derivação do produto de duas funções obtém-se:

$$\rho\,\frac{dV}{dt} = -V\frac{d\rho}{dt} \qquad 4.22$$

De 4.21 e 4.22 resulta a expressão:

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{\rho}{\varepsilon}\frac{dp}{dt} \qquad 4.23$$

Então, utilizando a expressão 4.23 e 4.19 fica-se com:

$$\frac{1dp}{\varepsilon dt} + \frac{dS}{Sdt} + \frac{\partial U}{\partial x} = 0 \qquad 4.24$$

A equação 4.24 pode ser escrita em função da cota piezométrica. Seja z a cota topográfica do eixo da conduta na secção de montante e H a correspondente cota piezométrica, estas duas grandezas relacionam-se através da equação $p = \rho g(H - z)$. Desprezando as taxas de variação temporal de ρ e de g face às correspondentes variações temporais de H e de z, ter-se-á $\frac{dp}{dt} = \rho g\left(\frac{\partial H}{\partial x}\frac{\partial x}{\partial t} + \frac{\partial H}{\partial t} - \frac{\partial z}{\partial x}\frac{\partial x}{\partial t} - \frac{\partial z}{\partial t}\right)$. As partículas movem-se, segundo o eixo da conduta com velocidade U, pelo que $\frac{\partial x}{\partial t} = U$. Admite-se também que o tubo não sofre movimentos transversais, logo $\frac{\partial z}{\partial t} = 0$. Por outro lado, $\frac{\partial z}{\partial x} = \sin\theta$, sendo θ o ângulo de inclinação, medido na secção de montante, do eixo da conduta. Nestas condições pode-se escrever que:

$$\frac{dp}{dt} = \rho\, g\left(\frac{\partial H}{\partial x}U + \frac{\partial H}{\partial t} - U\sin\theta\right) \qquad 4.25$$

Utilizando 4.25 em conjunto com 4.24 vem:

$$\frac{1}{\varepsilon}\left(\frac{\partial H}{\partial x}U + \frac{\partial H}{\partial t} - U\sin\theta\right)\rho\, g + \frac{dS}{Sdt} + \frac{\partial U}{\partial x} = 0 \qquad 4.26$$

Note-se que a derivada total de $\frac{dS}{dt}$, se existir, será função da pressão p e de propriedades físicas do material da conduta. Estas propriedades físicas relevantes do material da conduta e do fluido, bem como a geometria da conduta são relacionados através do parâmetro que se segue, a, denominado por celeridade, e é dada pela expressão:

$$a = \sqrt{\frac{1}{\rho(\frac{1}{\varepsilon} + \frac{dS}{Sdp})}} \qquad 4.27$$

A equação 4.26 simplifica-se, ficando:

$$a^2 \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{dp}{dt} = 0 \qquad 4.28$$

Depois das simplificações matemáticas, bem como algumas das hipóteses simplificadoras referidas anteriormente, e até a introdução de novas variáveis como a celeridade, a, é possível chegar à equação de conservação da massa para um escoamento transitório sob pressão, considerando Q variável em vez de U:

$$\frac{\partial H}{dt} + \frac{Q}{S}\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{a^2}{gS}\frac{\partial Q}{\partial x} - \frac{Q}{S}\sin(\theta) = 0 \qquad 4.29$$

Estes sistemas de equações diferenciais parciais são do tipo hiperbólico quase linear e não apresentam soluções analíticas, salvo casos particulares. Assim, é necessário resolver o sistema (4.11) e (4.29) através de um processo numérico.

4.3 MÉTODO EXPEDITO

Nas condutas elevatórias o choque hidráulico é afetado pelo comportamento do sistema e pela definição da lei de paragem do escoamento. A lei de paragem do escoamento é diretamente função da lei de paragem dos grupos elevatórios e da inércia da massa fluída.

Os métodos expeditos consideram ajustes à definição da envolvente das depressões em relação ao desenvolvimento da linha de carga em regime permanente (Lopes, 2016).

Para a aplicação destes métodos definem-se parâmetros fundamentais para a análise dos escoamentos transitórios. Um desses parâmetros a ser definido é a celeridade, a, que representa a velocidade de propagação das perturbações induzidas (Vivas, 2014) e é dada pela expressão:

$$a = \sqrt{\frac{1}{\rho(\frac{1}{\varepsilon} + \frac{DC_1}{Ee})}} \qquad 4.30$$

em que ρ é a massa volúmica do líquido, ε é o módulo de elasticidade volumétrica do líquido, D é o diâmetro interno da conduta, C_1 é o parâmetro que traduz a influência da forma de fixação da conduta na propagação das ondas de choque, e é a espessura da conduta e E é o módulo de elasticidade do material da conduta (Wylie e Streeter, 1978).

Depois de definida a celeridade, e para uma dada extensão da conduta, L, o tempo necessário para que a onda de pressão possa percorrer a conduta nos dois sentidos é dada pela expressão:

$$\mu = \frac{2L}{a} \tag{4.31}$$

Este parâmetro é designado de tempo de reflexão ou fase.

Para se definir a envolvente através da aplicação de métodos expeditos tem de se definir o tempo de paragem do escoamento, que quando comparado com tempo de fase pode definir o tipo de manobra. O tempo de paragem pode ser estimado a partir das fórmulas aproximadas de Rosich, e segundo este o tempo de paragem é dado por:

$$T_R = C_2 + \frac{K_1 L U_0}{g H_{man}} \tag{4.32}$$

onde U_0 é a velocidade inicial do escoamento, H_{man} a altura manométrica, K_1 o coeficiente experimental que representa o efeito da inércia do grupo eletrobomba (retirado da Tabela 4.1) e C_2 é o coeficiente experimental que depende da inclinação da conduta (retirado da Tabela 4.2).

Tabela 4.1 - Coeficiente de inércia do grupo eletrobomba

$L\ (m)$	K_1
< 500	2.0
500	1.75
$500\ a\ 1500$	1.5
1500	1.25
> 1500	1.0

Tabela 4.2 - Coeficiente de inclinação da conduta

H_{man} / L (%)	C_2
≤ 20	1.0
25	0.8
30	0.6
35	0.4
> 40	0

4.3.1 Metodologia simplificada de Joukowsky-Allievi-Michaud

Com os parâmetros anteriores definidos, é possível calcular a variação máxima atingida com as oscilações da linha piezométrica provocadas pelo choque hidráulico, ΔH_{CH}. Para evitar recorrer à resolução numérica das equações 4.11 e 4.29, é prática corrente considerar-se que as pressões extremas verificadas numa conduta uniforme, de diâmetro e características constantes ao longo do seu comprimento, sujeita a um regime variável, podem ser calculadas utilizando a metodologia simplificada de Joukowsky-Allievi-Michaud (Marques e Sousa, 2011).

$$\Delta H_{CH} = \begin{cases} \dfrac{a * \Delta U_0}{g} \text{ , se } T_R \leq \mu \\ ou \\ \dfrac{a * \Delta U_0}{g} * \dfrac{\mu}{T_R} \text{ , se } T_R > \mu \end{cases} \qquad 4.33$$

Ao fazer a comparação de T_R com μ podemos definir a manobra, como já foi referido. De acordo com Fernandes (2008) ter-se-á:

- $T_R > \mu$, estamos perante uma manobra lenta e a envolvente de pressões vai variar de forma linear, desde um mínimo de zero a jusante, até um máximo a montante (Figura 4.3);
- $T_R < \mu$, estamos perante uma manobra rápida, em que a variação linear da envolvente encontra o seu máximo algures a meio da conduta (a uma distância $T * \frac{a}{2}$ do ponto mais a jusante) e a partir daí o diagrama é constante nas sobrepressões e paralelo à linha de energia nas subpressões (Figura 4.4);
- $T_R = 0$, a manobra é instantânea e o diagrama da envolvente de pressões é constante nas sobrepressões e paralelo à linha de energia nas subpressões (Figura 4.5).

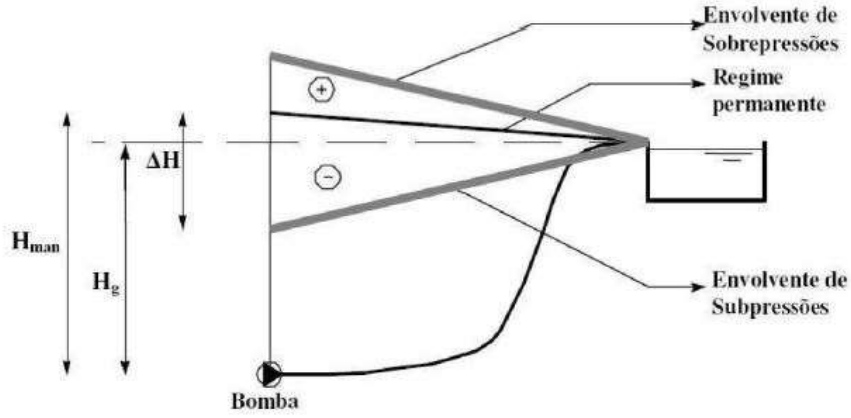


Figura 4.3 - Envolvente de manobra lenta (adaptado de Vivas, 2014)

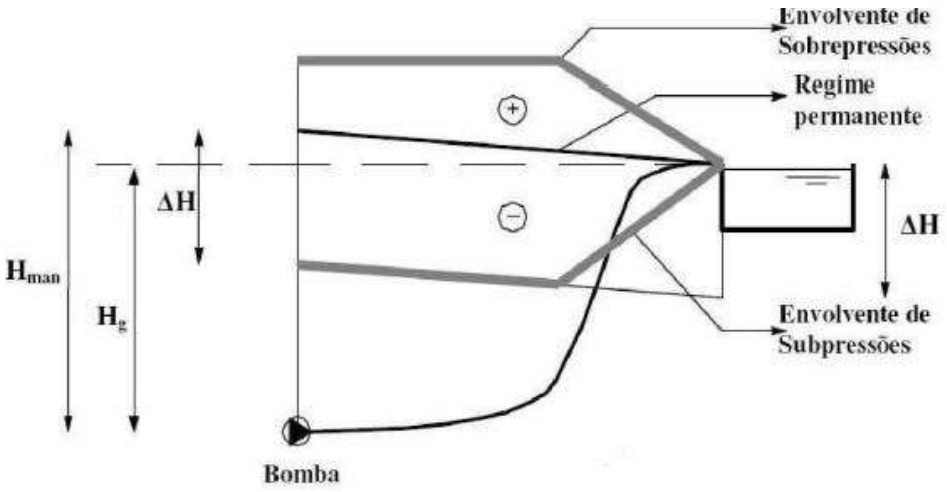


Figura 4.4 - Envolvente de manobra rápida (adaptado de Vivas, 2014)

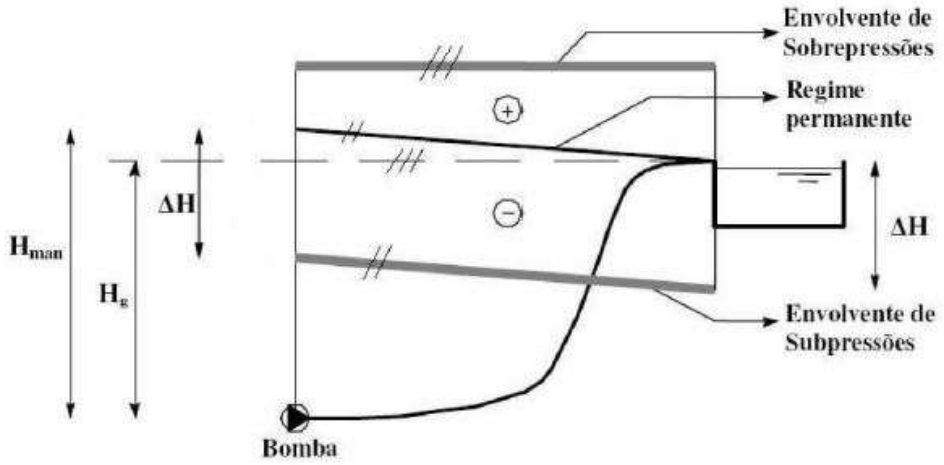


Figura 4.5 - Envolvente de manobra instantânea (adaptado de Vivas, 2014)

Convém salientar que a prática generalizada de utilização desta metodologia de estudo do choque hidráulico tem conduzido a que um número muito significativo de utilizadores se tenha esquecido os pressupostos utilizados por Joukowsky-Allievi-Michaud na dedução das suas fórmulas, que são (Marques e Sousa, 2011):

- A conduta é uniforme e é alimentada por um reservatório de nível constante;
- A perda de carga por atrito é desprezável;
- A manobra é instantânea ou é realizada de modo a que a variação de velocidade seja linear.

Em suma, se por um lado este método facilita a resolução do problema do choque hidráulico, por outro lado convém ter presente que em algumas situações correntes o método se afasta da realidade, principalmente no que se refere à perda de carga por atrito ser nula e portanto deve-se ter as maiores cautelas na aplicação da metodologia e não aplicá-la de forma generalizada.

4.4 MÉTODO NUMÉRICO – MÉTODO DAS CARACTERÍSTICAS

Ao longo do tempo foram desenvolvidos métodos numéricos, mais ou menos precisos para o cálculo do choque hidráulico, com mais ou menos simplificações inerentes. Com o desenvolvimento do cálculo computacional surgiram métodos bem mais complexos, a saber:

- Método das diferenças finitas;
- Método dos elementos finitos;
- Método dos elementos de contorno;
- Método espectral;
- Método das características.

No método das características é adotada uma lei de propagação de ondas que relaciona o tempo com a abcissa x, que é definida ao longo do comprimento da conduta, através da celeridade a.

As equações de derivadas parciais, as equações fundamentais de equilíbrio dinâmico e de conservação da massa, são transformadas em equações diferenciais integráveis pelo método das diferenças finitas. Convém salientar que se vai admitir que estamos perante condutas rígidas, que possuem módulos de elasticidade elevados (Wylie & Streeter, 1978), e por isso são desprezados os termos convectivos. Perante o facto mencionado, obtém-se uma versão simplificada, composto pelas seguintes equações:

$$L_1 = 0 \leftrightarrow \frac{\partial Q}{\partial t} + gS\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\lambda |Q| Q}{2DS} = 0 \quad 4.34$$

$$L_2 = 0 \leftrightarrow gS\frac{\partial H}{\partial t} + a^2\frac{\partial Q}{\partial x} - gQsin\,\theta = 0 \quad 4.35$$

onde L_1 e L_2 são as equações diferenciais.

Ao considerar L_1 e L_2 iguais a zero, a combinação linear das equações também será nula, ou seja:

$$L = L_1 + \beta L_2 = 0 \quad 4.36$$

sendo β o coeficiente de combinação linear das equações diferenciais.

Então, tem-se que:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \beta a^2\frac{\partial Q}{\partial x} + \beta gS\left(\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{1}{\beta}\frac{\partial H}{\partial x}\right) + F|Q|Q - \beta gQ\,sin\,\theta = 0 \quad 4.37$$

em que F é dado por:

$$F = \frac{\lambda}{2DS} \quad 4.38$$

Convém escolher dois valores de β que produzam o efeito desejado, de modo a encontrar as referidas equações diferenciais ordinárias.

Para tal consideram-se os diferenciais totais das varáveis dependentes Q e H:

$$\partial Q = \frac{\partial Q}{\partial t}dt + \frac{\partial Q}{\partial x}dx \quad 4.39$$

$$\partial H = \frac{\partial H}{\partial t}dt + \frac{\partial H}{\partial x}dx \quad 4.40$$

Para se obterem as equações diferenciais ordinárias, pode-se integrar em ordem ao tempo ou em ordem ao espaço. De acordo com Lopes, 2016, os dois resultam em equações equivalentes mas quando se integra em ordem ao espaço, as equações características C^+ e C^- apresentam formas que se adequam melhor à integração. Então, no presente trabalho apenas se demonstra a integração em ordem ao espaço. Para tal divide-se as equações 4.39 e 4.40 por dx, ficando:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{\partial Q}{\partial t}\frac{dt}{dx} + \frac{\partial Q}{\partial x} \quad 4.41$$

$$\frac{\partial H}{\partial x} = \frac{\partial H}{\partial t}\frac{dt}{dx} + \frac{\partial H}{\partial x} \quad 4.42$$

onde:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{1}{\beta} = \beta a^2 \rightarrow \frac{dt}{dx} = \frac{1}{\beta a^2} = \beta \qquad 4.43$$

e:

$$\frac{1}{\beta} = \beta a^2 \rightarrow \beta \pm \frac{1}{a} \qquad 4.44$$

Conhecendo o valor de β, obtêm-se o conjunto de equações que relacionam x e t:

$$\frac{dx}{dt} = +a \ \cap \ \beta = +\frac{1}{a} \qquad 4.45$$

$$\frac{dx}{dt} = -a \ \cap \ \beta = -\frac{1}{a} \qquad 4.46$$

substituindo na equação 4.37 as equações 4.45 e 4.46, obtêm-se dois novos conjuntos de equações, a saber:

- Equações C^+ em que $\beta = +\frac{1}{a}$

$$\frac{dH}{dx} + \frac{a}{gS}\frac{dQ}{dx} + \frac{F|Q|Q}{gS} - \frac{Q}{aS}\sin\theta = 0 \qquad 4.47$$

$$\frac{dx}{dt} = +a \qquad 4.48$$

- Equações C^- em que $\beta = -\frac{1}{a}$

$$\frac{dH}{dx} - \frac{a}{gS}\frac{dQ}{dx} + \frac{F|Q|Q}{gS} + \frac{Q}{aS}\sin\theta = 0 \qquad 4.49$$

$$\frac{dx}{dt} = -a \qquad 4.50$$

A Figura 4.6 representa as retas (as linhas características) ao longo das quais deverão ser feitas as integrações das equações C^+ e C^-.

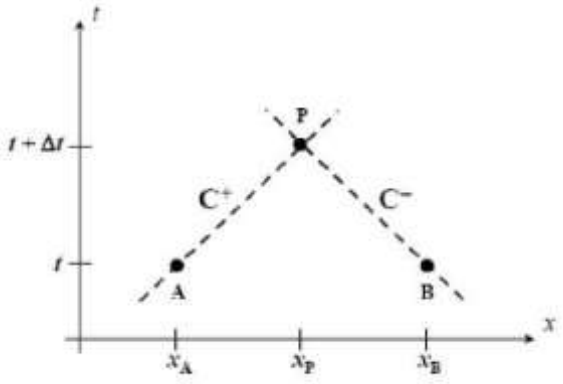


Figura 4.6 - Linhas características (adaptado de Lopes, 2016)

Considerando a celeridade constante na conduta e a integração da equação 4.48 e 4.50, chega-se respetivamente a:

$$x_P - x_A = a(t_p - t_A) \quad 4.51$$

$$x_P - x_B = a(t_p - t_B) \quad 4.52$$

Depois de se simplificarem as equações 4.47 e 4.49, integram-se as mesmas entre A e P e entre B e P, respetivamente, e desta forma obtém-se as seguintes equações:

$$C^+: H_P - H_A + \frac{a}{gS}(Q_P - Q_A) + I^+ = 0 \quad 4.53$$

$$C^-: H_P - H_B + \frac{a}{gS}(Q_P - Q_B) + I^- = 0 \quad 4.54$$

onde H_P, H_A, H_B, Q_A, Q_P e Q_B a carga H e o caudal Q dos pontos, A, B e C.

Por sua vez I^+ e I^- correspondem à integração das perdas de carga e do efeito relativo à inclinação da conduta. Podem ser escritas por métodos aproximados, depois de integradas, da seguinte forma:

$$I^+ = (1-K)(R*T)|Q_A|Q_A + K(R - T_{ant})|Q_P|Q_P \quad 4.55$$

$$I^- = -(1-K)(R*T)|Q_B|Q_B + K(R_P - T_{post})|Q_P|Q_P \quad 4.56$$

em que K representa o fator de ponderação da integração numérica, e onde R e T (onde "ant" significa anterior e "post" posterior) para uma dada secção da conduta são dados respetivamente por:

$$R = \frac{\lambda}{2gDS^2}\Delta x \quad 4.57$$

$$T = \frac{\sin\theta}{aS|Q|}\Delta x \quad 4.58$$

Pode-se ainda reescrever as equações características para que, conhecendo os valores de Q e H nas secções A e B, permitam formar um sistema com Q_P e H_P como incógnitas, ou seja:

$$C^+ = H_P + [A + K(R - T_{ant})|Q_P|]Q_P - C_A = 0 \quad 4.59$$

$$C^- = H_P - [A + K(R_P + T_{post})|Q_P|]Q_P - C_B = 0 \quad 4.60$$

considerando as simplificações:

$$A = \frac{a}{gS} \tag{4.61}$$

$$C_A = H_A + [A - (1 - K)(R - T_{ant})|Q_A|]Q_A \tag{4.62}$$

$$C_B = H_B - \left[A - (1 - K)(R - T_{post})|Q_B|\right]Q_B \tag{4.63}$$

Antes de dar sequência ao método é necessário proceder ao desdobramento do parâmetro relativo à inclinação da conduta, principalmente no que diz respeito ao nó i, como se pode verificar na Figura 4.7. Quando há uma mudança da inclinação nesse ponto, o parâmetro T toma valores diferentes à esquerda e à direita.

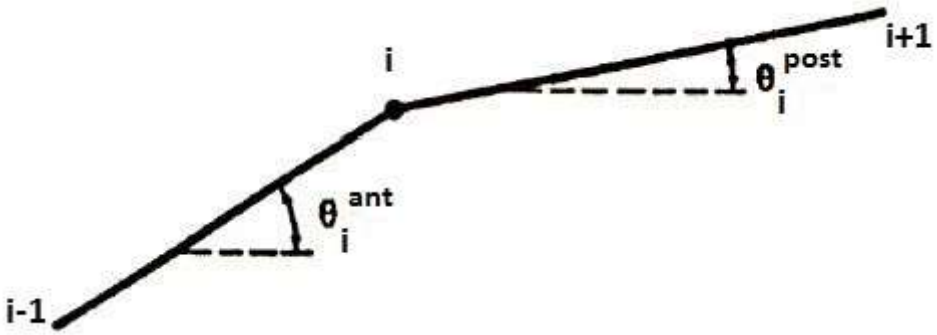


Figura 4.7 - Mudança de inclinação da conduta (adaptado de Lopes, 2016)

Considerando a mudança referida anteriormente retoma-se o cálculo com a soma e subtração ordenada das equações características 4.59 e 4.60, que resolvendo em ordem a H_P e Q_P, respetivamente, resulta em:

$$H_P = \frac{K\left(T_{ant} + T_{post}\right)|Q_P|Q_P + C_A + C_B}{2} \tag{4.64}$$

$$Q_P = \frac{C_A - C_B}{A_1} \tag{4.65}$$

em que A_1 é dado por:

$$A_1 = A + \sqrt{A^2 + 2K\left(R + \frac{T_{ant}}{2} - \frac{T_{post}}{2}\right)|C_A - C_B|} \tag{4.66}$$

Segundo Silva (2014), é usual utilizar $K = 0.5$ para uma igual valorização da perda de carga e da inclinação da conduta quando se realiza o processo de integração.

Resta apenas definir as condições fronteira mencionadas anteriormente que são constituídas por valores conhecidos das incógnitas, ou por relações entre elas, em secções específicas da conduta. Seguidamente

serão apresentadas algumas destas condições de fronteira, para as quais sempre será admitido que as pressões são pressões relativas (Pestana, 2016).

4.4.1 Condição de fronteira no reservatório de nível constante

A conduta elevatória descarrega para a atmosfera ou para o interior de um reservatório de nível constante (Figura 4.8), portanto será constante a carga na secção de saída da conduta elevatória. Esta condição é traduzida por:

$$H = H_0 = constante$$

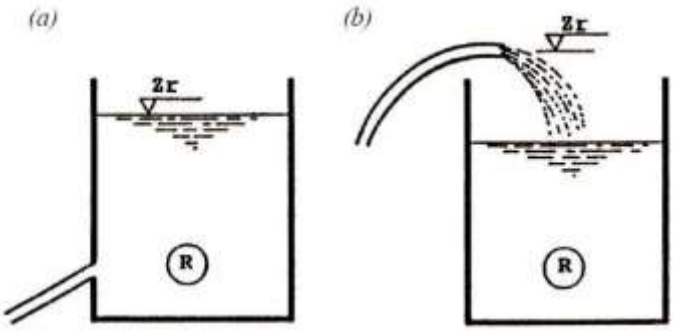


Figura 4.8 - Fronteira a jusante em carga (a) e em descarga para a atmosfera (b) (adaptado de Silva, 2014)

Substituindo a equação caraterística C^-, equação 4.60, por uma condição fronteira adequada, obtém-se a carga a montante da extremidade da conduta, que é expressa recorrendo à expressão:

$$H_P = Z_R + K_L|Q_P|Q_P \qquad 4.67$$

onde K_L é o coeficiente de perda de carga localizada na extremidade da conduta. Ao introduzir a igualdade de H_P, equação 4.67, na equação caraterística C^+, equação 4.59, obtém-se a expressão:

$$(K_L + KR - KT_{ant})|Q_P|Q_P + AQ_P - C_A + Z_R = 0 \qquad 4.68$$

que, ao simplificar se pode escrever em ordem a Q_P:

$$Q_P = \frac{2(C_A - Z_R)}{A_2} \qquad 4.69$$

sendo A_2 dado por:

$$A_2 = A + \sqrt{A^2 + 4(K_L + KR - KT_{ant})|Z_R - C_A|} \qquad 4.70$$

Consegue-se obter H_P por substituição do caudal assim determinado em 4.59 e 4.67.

4.4.2 Condição de fronteira no grupo elevatório

Na condição de fronteira na bomba há uma relação entre a carga hidráulica, H, e o caudal, Q, que se designa por curva caraterística da bomba. Neste elemento são geradas perturbações no escoamento que podem ser (Silva, 2014):

- Passivas: se as perturbações não forem devidas à bomba que está em funcionamento, por exemplo manobra de válvulas. Neste caso assume-se que a velocidade de rotação da bomba e a relação entre a altura e o caudal de elevação, se mantêm iguais aos considerados em regime permanente.
- Ativas: quando as perturbações são devidas à paragem ou arranque da bomba ou à variação da sua velocidade de rotação, possível através da atuação de um variador de velocidade intercalado entre a bomba e o motor.

Para o caso abordado neste relatório, a bomba é responsável pela perturbação do escoamento, logo tem um comportamento ativo. Neste caso a bomba representa uma condição fronteira dinâmica que se rege por duas equações:

- Equação diferencial que relaciona a cinemática do movimento de rotação das massas girantes e o momento atuante sobre as mesmas;
- Equação das curvas características da bomba.

Na equação diferencial da cinemática do movimento de rotação das massas girantes e o seu momento atuante, admite-se que as massas girantes são rígidas e a equação diferencial escreve-se:

$$M_0 = M_m - M_r = \propto_b I_0 \qquad 4.71$$

onde M_0 é o momento atuante sobre as massas girantes da bomba, M_m o momento motor, M_r o momento resistente, α_b a aceleração angular das massas girantes da bomba e I_0 o momento de inércia das massas girantes relativamente ao eixo de rotação (Lopes, 2016).

Após algumas simplificações e considerações, obtém-se uma equação diferencial de massas girantes integrada entre os instantes t_i e t_{i+1} recorrendo a uma técnica de diferenças finitas que resulta na seguinte expressão, conhecida como a lei de paragem da bomba:

$$N_{i+1} = N_i - \frac{900\gamma}{\pi^2 I_0} * \left[\frac{Q_b H_{man}}{N_\eta}\right]_{t_i} * \Delta t \qquad 4.72$$

em que N_{i+1}é a velocidade de rotação da bomba no instante $i+1$, N_i a velocidade de rotação da bomba no instante i, Q_bo caudal na bomba e N a velocidade de rotação da bomba, em rotações por minuto.

É importante conhecer o valor do momento de inércia, I_0, que normalmente é relacionado com o parâmetro PD^2. Este parâmetro pode ser estimado, mas é preferível utilizar o valor correspondente a cada caso consultando o fabricante.

$$PD^2 = 4gI_0 \tag{4.73}$$

No que diz respeito à curva caraterística da bomba, esta relaciona a sua velocidade de rotação, N, a altura de elevação,H_{man} , e o caudal elevado, Q_b, para uma determinada bomba, considerando o conhecimento das leis de comportamento de uma bomba num regime transitório. A relação entre as variáveis é dada pela expressão:

$$H_{man} = AN^2 + BNQ_b - CQ_b^2 \tag{4.74}$$

em que A, B e C são coeficientes que dependem das características da bomba e podem ser obtidos a partir de três pares de valores (H_{man}e Q_b) da curva correspondente à velocidade de rotação em regime permanente.

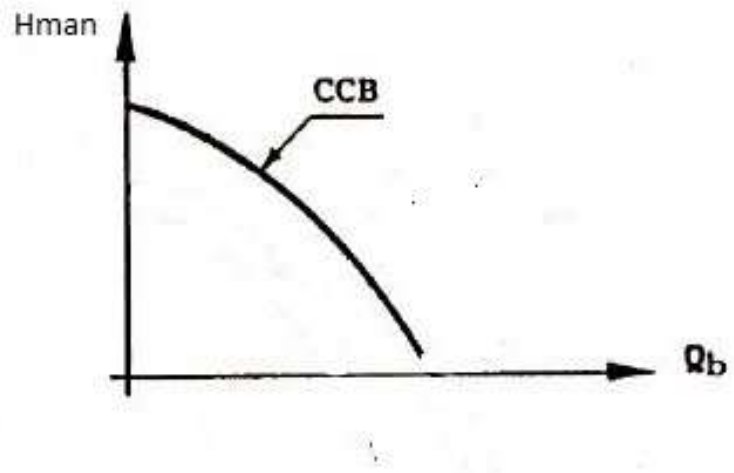


Figura 4.9 - Curva caraterística da bomba (adaptado de Silva, 2014)

Como normalmente a instalação da VR é a jusante da bomba, assume-se que Q_b não pode ser negativo e portanto as várias curvas características para diferentes regimes de rotação cruzam a reta $Q_b = 0$, para valores de H_{man} superiores ao funcionamento em vazio (Silva, 2014).

Para o caso das condições fronteira no grupo eletrobomba será substituída a equação caraterística C^+, equação 4.59, pela equação da curva caraterística da bomba, ou seja:

$$H_P = DN^2 + BNQ_P - CQ_P^2 \tag{4.75}$$

A letra D, substitui a letra A que já foi usada anteriormente na equação 4.74. Inserindo H_P na equação caraterística C^-, equação 4.60, e após simplificações de escrita e a consideração de $K = 0$, pra uma integração numérica explícita, resulta:

$$-CQ_P^2 + (BN - A)Q_P + DN^2 - C_B = 0 \qquad 4.76$$

em que a raiz positiva é dada por:

$$Q_P = \frac{(BN - A)}{2C}\frac{1}{2C}\sqrt{(BN - A)^2 + 4C(DN^2 - C_B)} \qquad 4.77$$

A solução apresentada só é válida se $C_B \leq DN^2$. Caso contrário e como geralmente $A >> BN$ deve-se assumir $Q_b = 0$, para evitar uma solução negativa, que será impossível uma vez que foi considerada uma válvula de retenção a jusante da bomba para evitar o contra fluxo (Lopes, 2016).

4.4.3 Condição de fronteira na Chaminé de Equilíbrio

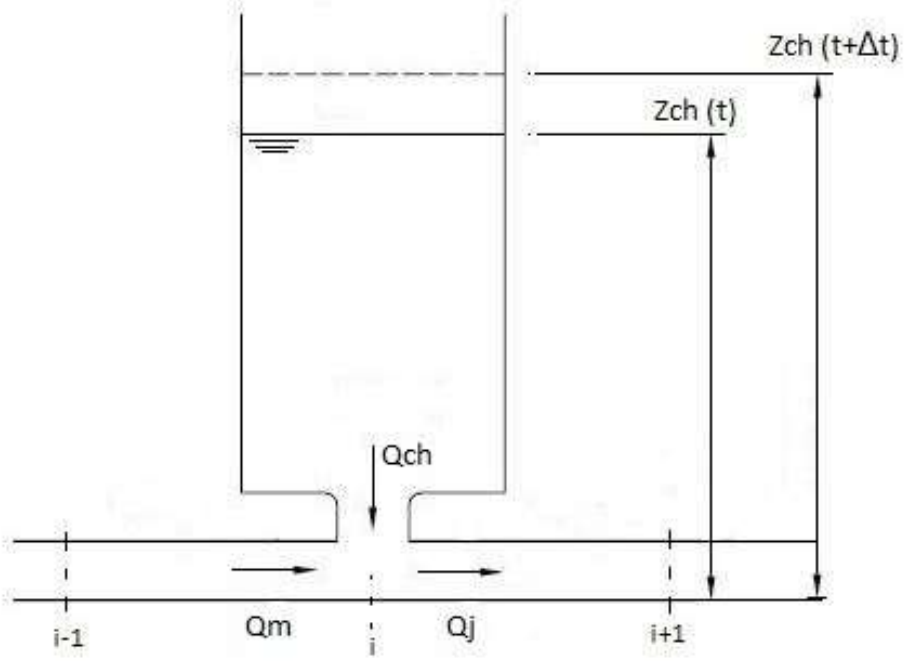


Figura 4.10 - Representação de Chaminé de Equilíbrio

Atendendo a figura representativa da chaminé de equilíbrio, Figura 4.10, considera-se que:

- Q_m – Caudal de montante no ponto i;
- Q_j – Caudal de jusante no ponto i;
- Q_{ch} – Caudal à saída/entrada da chaminé de equilíbrio;
- Z_{ch} – Nível de água dentro da chaminé de equilíbrio;

Fazendo um balanço de caudais junto à chaminé de equilíbrio, obtemos a equação da continuidade dada pela expressão:

$$Q_j = Q_m + Q_{ch} \tag{4.78}$$

De seguida, apresenta-se a equação que traduz a variação da cota da superfície livre da água pressupondo linear, no intervalo Δt, a variação do caudal Q_{ch}:

$$\Delta Z = -\frac{Q_{ch}(t) + Q_{ch}(t+\Delta t)}{2 * S_{ch}} * \Delta t \tag{4.79}$$

em que S_{ch} é a área da chaminé de equilíbrio.

A equação que representa o nível da água na chaminé de equilíbrio é:

$$Z_{ch}(t+\Delta t) = Z_{ch}(t) + \Delta Z(t+\Delta t) \tag{4.80}$$

Neste caso apresentado não se estão a considerar as perdas de carga na ligação entre a conduta e a chaminé de equilíbrio. Convém salientar que, no caso da chaminé de equilíbrio, o valor da cota piezométrica no nó i será sempre igual à cota da superfície livre, ou seja:

$$H_i = Z_{ch} \tag{4.81}$$

Por fim, recorrendo às equações características C^+ e C^-, obtêm-se as duas equações seguintes:

$$H_i(t+\Delta t) = H_{i-1}(t) - A[Q_m(t+\Delta t) - Q_{i-1}(t)] - R(Q_{i-1}(t)|Q_{i-1}(t)|) \tag{4.82}$$

A equação 4.82 é a equação C^+ aplicada ao troço montante do nó de ligação entre a conduta e a chaminé de equilíbrio.

$$H_i(t+\Delta t) = H_{i+1}(t) + A\left[Q_j(t+\Delta t) - Q_{i+1}(t)\right] + R(Q_{i+1}(t)|Q_{i+1}(t)|) \tag{4.83}$$

Por sua vez, a equação 4.83 é a equação C^- aplicada ao troço a jusante do nó de ligação entre a conduta e a chaminé de equilíbrio.

As variáveis A e R utilizadas em 4.82 e 4.83 já foram explicadas anteriormente e descritas no processo do cálculo numérico do método das características.

Os valores de cota piezométrica e de caudal em todos os pontos da conduta são conhecidos em regime permanente, ou seja no instante $t = 0$. Como já são conhecidos os valores nos nós i−1 e i+1 no instante $t = 0$, aplica-se o método das características para calcular o valor de Q e H no nó interior i, no instante seguinte.

As equações designadas de equações da compatibilidade, ou equações características, podem então ser escritas como:

$$C^+: H_i(t + \Delta t) = CP - A[Q_m(t + \Delta t)] \quad 4.84$$

$$C^-: H_i(t + \Delta t) = CM + A\left[Q_j(t + \Delta t)\right] \quad 4.85$$

Em que CP e CM são dados por:

$$CP = H_{i-1}(t) + A[Q_{i-1}(t)] - R(Q_{i-1}(t)|Q_{i-1}(t)|) \quad 4.86$$

$$CM = H_{i+1}(t) - A[Q_{i+1}(t)] + R(Q_{i+1}(t)|Q_{i+1}(t)|) \quad 4.87$$

4.4.4 Condição de fronteira no RAC

Quando se considera a presença de um RAC no processo de cálculo do método das características, tem de se introduzir novas incógnitas e outras tantas equações no método, sendo as incógnitas as seguintes (Lopes, 2016):

- Q_{RAC} – Caudal à saída/entrada do RAC;
- Q_m – Caudal a montante;
- Q_j – Caudal a jusante;
- H_i – Carga na ligação entre o RAC e a conduta;
- $P_{RAC,abs}$ – Pressão absoluta do ar no RAC;
- V_{RAC} – Volume de ar no RAC;
- Z_{RAC} – Nível de água no interior do RAC.

Para a resolução das equações recorre-se a um processo iterativo.

Após uma análise de Figura 4.11, que representa a ligação do RAC à conduta, obtém-se uma expressão que traduz a lei da continuidade no RAC, a saber:

$$Q_j = Q_m + Q_{RAC} \quad 4.88$$

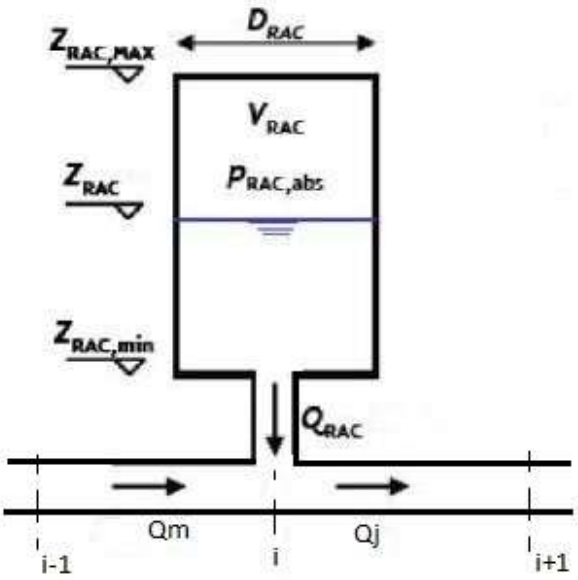


Figura 4.11 - Ligação do RAC à conduta elevatória (adaptado de Lopes, 2016)

O volume de ar no RAC é uma das primeiras equações a ser definida e dá-se pela expressão:

$$V_{RAC}(t+\Delta t) = V_{RAC}(t) - \frac{Q_{RAC}(t) + Q_{RAC}(t+\Delta t)}{2}\Delta t \qquad 4.89$$

O volume de ar deverá ser condicionado, com margem de segurança, ao volume total do reservatório sob pena de provocar a entrada de ar na conduta.

De seguida, define-se a expressão que dá a relação entre o volume de ar e água no reservatório e a cota da superfície livre da água no RAC, que é válida para qualquer instante:

$$Z_{RAC} = Z_{RAC,MÁX} - \frac{4V_{RAC}}{\pi(D_{RAC})^2} \qquad 4.90$$

em que D_{RAC} é o diâmetro do RAC e $Z_{RAC,MÁX}$ é cota máxima da superfície livre de água no RAC.

Outra expressão para o procedimento de cálculo é a expressão politrópica de estado do ar confinado no reservatório, considerando a incompressibilidade da água, ou seja:

$$PV^{\alpha} = constante \leftrightarrow P_{RAC,abs}(t+\Delta t) = P_{RAC}(t) * \left(\frac{V_{RAC}(t)}{V_{RAC}(t+\Delta t)}\right)^{\alpha} \qquad 4.91$$

sendo $P_{RAC}(t)$e $V_{RAC}(t)$ os valores iniciais da altura pressão e o volume de ar. O expoente α é o fator politrópico em que o seu valor depende do processo termodinâmico do ar.

A carga no RAC tem associada outra equação relevante no cálculo, a saber:

$$H_i = \frac{P_{RAC,abs} - P_{atm}}{\gamma} + Z_{RAC} \quad 4.92$$

Tal como para a chaminé de equilíbrio, no RAC duas das equações utilizadas neste processo são as equações características C^+ e C^-, sendo elas iguais nos dois equipamentos. Assim sendo, tem-se que:

$$C^+: H_i(t + \Delta t) = CP - A[Q_m(t + \Delta t)] \quad 4.93$$

$$C^-: H_i(t + \Delta t) = CM + A\left[Q_j(t + \Delta t)\right] \quad 4.94$$

Em que CP e CM são as equações 4.86 e 4.87 explicadas para a chaminé de equilíbrio.

As equações são resolvidas pela ordem com que foram apresentadas. O processo como já foi referido é iterativo, ou seja, é repetido sucessivamente até que as várias variáveis apresentem variações inferiores ao limite estabelecido, designado por erro. Conclui-se então o processo iterativo para um determinado instante, passando-se ao instante seguinte (Lopes, 2016).

4.5 DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO E/OU MINIMIZAÇÃO DO CHOQUE HIDRÁULICO

Quando se fala em pressões extremas, podem ser as sobrepressões e as subpressões ou depressões. Para cada uma destas situações há diversos dispositivos de proteção que devem ser adotados para um melhor funcionamento do sistema, para proteção da sua integridade e possível colapso em alguns casos.

Abordam-se de seguida as soluções mais frequentemente adotadas para a prevenção do choque hidráulico em sistemas elevatórios de águas residuais bem como a explicação do funcionamento de cada uma destas soluções.

4.5.1 Reservatório unidirecional

Os reservatórios unidirecionais (RUD) são dispositivos que têm como função evitar a ocorrência local de pressões negativas, através da cedência de água à conduta elevatória. Podem ser construídos em alvenaria ou betão, no entanto também existem dispositivos de corpo pré-fabricado (Costa, 2011).

Um RUD, ver Figura 4.12, é constituído por um reservatório de tamanho inferior ao de uma chaminé de equilíbrio e a sua ligação à conduta elevatória é feita através de uma tubagem que deve conter uma válvula de retenção que impede que o escoamento se processe em sentido contrário, daí ser unidirecional.

Figura 4.12 - Reservatório unidirecional - RUD (adaptado de Mendes, 2011)

Quando se dá a paragem do grupo eletrobomba do sistema elevatório, a alimentação da conduta elevatória é feita pelo RUD mas apenas quando a linha piezométrica cruza o nível do líquido no interior do reservatório. Quando ocorre esse cruzamento, a válvula de retenção abre e o líquido presente no RUD escoa para a conduta compensando, durante um certo período de tempo, a redução do caudal fornecido pela bomba. O RUD deve ser instalado nas secções adjacentes á bomba, de modo a evitar também o fenómeno de rotura da veia líquida nos pontos altos da conduta elevatória (Almeida, 1982).

Os reservatórios unidirecionais apresentam também alguns inconvenientes, tais como: a dificuldade na proteção de secções afastadas do RUD; a exigência de acessórios complementares, como as válvulas de seccionamento e retenção; e também o facto de se ter de esperar algum tempo para tornar a arrancar a bomba de forma a garantir o enchimento completo do reservatório (Valente, 2008).

4.5.2 Conduta de aspiração paralela

Conduta de Aspiração Paralela (CAP), também designado por “by-pass” atua na proteção de depressões resultantes do fenómeno de choque hidráulico (Lopes, 2016).

Este dispositivo permite a criação de um circuito alternativo (Figura 4.13) entre o reservatório a montante e a conduta elevatória, possibilitando a alimentação da conduta com um caudal suplementar quando há uma interrupção do fornecimento de caudal pela bomba, protegendo dessa forma o grupo elevatório (Costa, 2011).

O circuito alternativo do "by-pass" garante, como já foi referido, a alimentação da conduta elevatória principal enquanto a cota piezométrica instantânea na secção a jusante da conduta paralela for inferior à cota piezométrica da secção a montante da mesma.

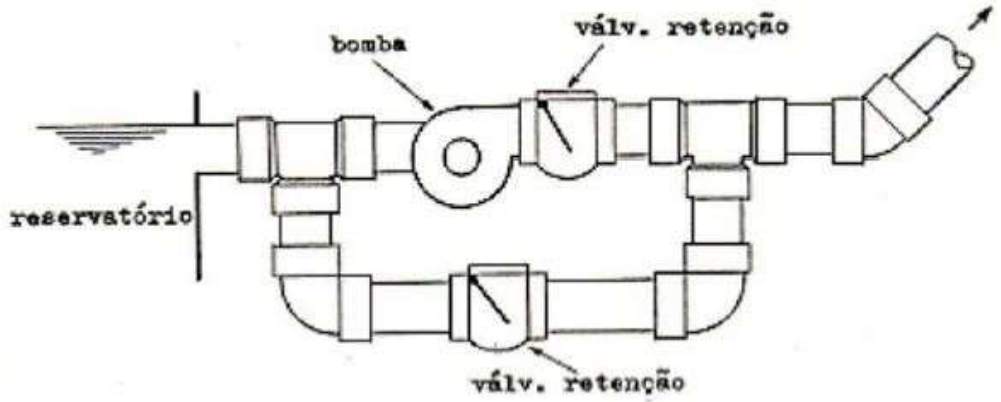


Figura 4.13 - Conduta de aspiração paralela - CAP (adaptado de Lopes, 2016)

Desta forma consegue-se prolongar o tempo de anulação de caudal e, por sua vez, diminuir a amplitude da depressão máxima verificada na secção jusante da conduta de "by-pass" (Mendes, 2011). O mecanismo descrito é tanto mais eficiente, quanto menor a perda de carga introduzida pela conduta de aspiração paralela. A presença de uma válvula de retenção neste sistema impede o retorno do líquido para o interior do reservatório a montante.

Contudo, para que o funcionamento da conduta de aspiração paralela seja adequado, é necessário que o reservatório a montante tenha dimensões consideráveis e que o nível de água em superfície livre no seu interior tenha uma cota superior à do eixo da conduta na secção do grupo eletrobomba (Lopes, 2016), o que é uma limitação significativa.

Outro inconveniente deste sistema de proteção ao choque hidráulico é o facto de não permitir a proteção direta de um sistema elevatório contra efeitos de sobrepressões e de não ser eficaz em instalações de bombagem de grandes desníveis entre o reservatório de aspiração e o de entrega, principalmente nos pontos altos e intermédios das respetivas condutas (Mendes, 2011).

4.5.3 Volante de inércia

De acordo com Marques e Sousa (2011) o volante de inércia tem como objetivo o aumento da inércia do grupo bomba-motor e, por sua vez, o aumento do tempo necessário para a anulação/variação do escoamento, levando a valores menos desfavoráveis das pressões extremas, em particular nas depressões subsequentes a uma paragem do grupo.

Este dispositivo tem duas fases distintas no seu funcionamento: a primeira em que a energia fornecida pelas massas girantes é acumulada e permite prolongar o tempo de paragem da bomba; e, na segunda, o regime variável está isento de qualquer dispositivo atenuador ativo, para além dos efeitos da perda de carga (Lopes, 2016).

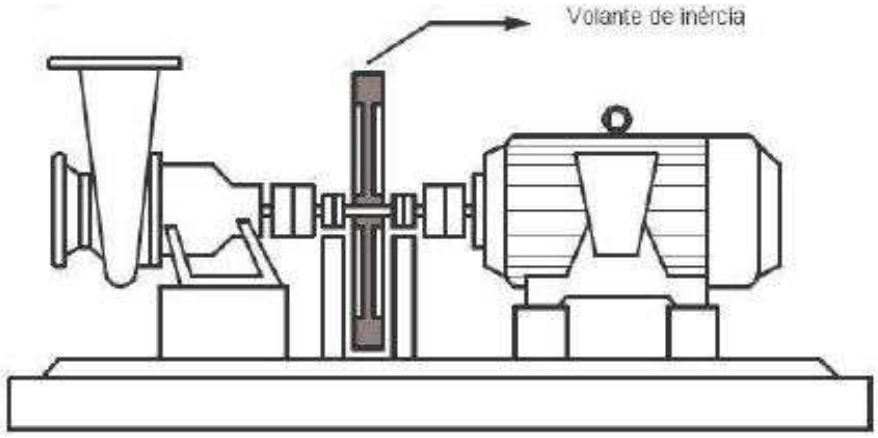


Figura 4.14 - Volante de inércia (adaptado de Valente, 2008)

Outra desvantagem são as grandes dimensões exigidas e consequentes inconvenientes de natureza mecânica e elétrica quando o objetivo é a minimização/proteção do choque hidráulico associado a uma elevada energia cinética (Valente, 2008).

4.5.4 Chaminé de equilíbrio

As chaminés de equilíbrio são reservatórios com superfície livre, constituídas por um cilindro vertical (Figura 4.15) em que a altura de água dentro desse mesmo cilindro coincide, em regime permanente, com a cota piezométrica da secção da conduta onde o reservatório está ligado (Costa, 2011).

De acordo com Marques e Sousa (2011) a instalação das chaminés de equilíbrio facilitam a oscilação da massa de água quando ocorre um regime variável, atenuando tanto as sobrepressões como as depressões.

Figura 4.15 - Chaminé de equilíbrio

(adaptado de http://www.leb.esalq.usp.br)

A instalação adequada deste equipamento está associada tanto à identificação do perfil topográfico do sistema elevatório bem como às condições económicas inerentes, tentando-se sempre evitar a construção de uma chaminé muito alta.

Este dispositivo é mais utilizado em centrais hidroelétricas, não sendo tão vulgar a sua utilização em sistemas de abastecimento e tratamento de águas uma vez que necessitam de obras de construção civil mais desenvolvidas, traduzindo-se em custos mais elevados comparativamente com outras soluções. Provocam ainda um grande impacto visual, dado o desenvolvimento em altura que apresentam (Valente, 2008).

4.5.5 Reservatório de ar comprimido

Segundo Marques e Sousa (2011), o reservatório de ar comprimido (RAC), Figura 4.16 e Figura 4.17, é o dispositivo mais utilizado na proteção ao choque hidráulico. Consiste num reservatório fechado, parcialmente cheio de gás comprimido (normalmente ar), encontrando-se esse submetido à pressão manométrica do ponto da conduta em que o dispositivo está instalado.

Figura 4.16 - Reservatório de ar comprimido

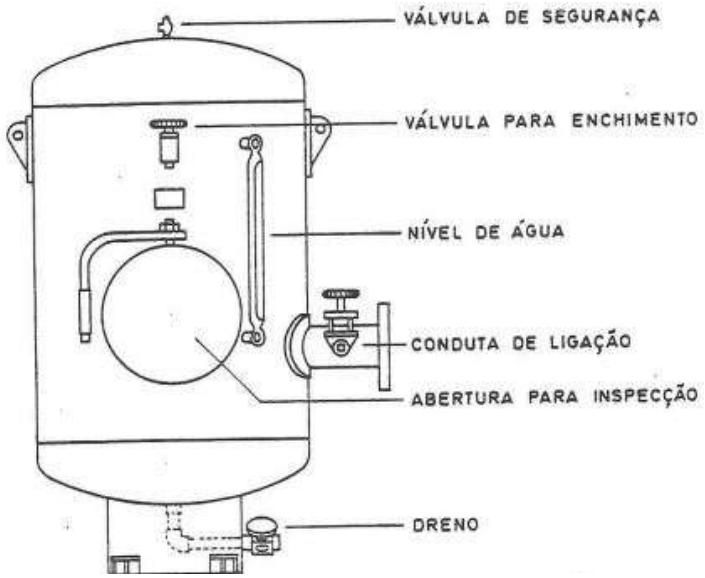


Figura 4.17 - Representação esquemática de um RAC (adaptado de Mendes, 2011)

Através do efeito de compressão/descompressão do ar, há uma diminuição do tempo de variação de caudal que tem como consequência uma atenuação das variações de pressão. No regime permanente, a massa de água armazenada no reservatório está em equilíbrio hidrostático sob ação da pressão do ar existente no RAC e da pressão da conduta, na secção da ligação. Em regime variável esta pressão, por norma, vai baixar e a água armazenada deixa de estar em equilíbrio hidrostático, passando a estar em equilíbrio dinâmico. Assim, ao baixar a pressão a jusante dos grupos eletrobomba, o RAC passa a alimentar a conduta elevatória com um caudal que diminui progressivamente. Se a pressão a jusante dos grupos aumentar, acontece o contrário e o RAC absorve o caudal na conduta (Valente, 2008). As oscilações da água no RAC fazem com que haja variação da pressão presente no reservatório: quando o RAC alimenta a conduta o volume de ar aumenta e a pressão diminui, e vice-versa.

Diz-se que o reservatório de ar comprimido é um dispositivo reversível, pois apresenta capacidade de atenuar os efeitos do choque hidráulico tanto a alimentar a conduta como a receber o caudal. Assim sendo, este dispositivo atenua as subpressões mas também as sobrepressões.

O funcionamento do RAC é parecido com o das chaminés de equilíbrio, exceto na amplitude de oscilações, que no RAC são amortecidas pelo ar/gás comprimido que funciona dessa forma como uma mola ou amortecedor (Marques e Sousa, 2011).

Normalmente utiliza-se uma válvula de retenção entre o grupo eletrobomba e o RAC para a proteção deste último de uma pancada violenta e súbita da coluna líquida. Desta forma a pancada vai ocorrer na válvula de retenção podendo condicionar o seu funcionamento.

Quando há um funcionamento deficiente de um dispositivo destes, pode ser bastante perigoso para todo o seu espaço envolvente dadas as bruscas variações pressões a que este está sujeito. É portanto necessária uma cuidadosa manutenção do equipamento (Costa, 2011). Outro inconveniente prende-se ao facto de ser necessário um compressor de ar em permanência e respetivos dispositivos de controlo da pressão, implicando assim um investimento inicial mais elevado.

Os reservatórios de ar comprimido podem também ser chamados de reservatórios hidropneumáticos, sendo que neste caso há uma separação física entre a água e o ar comprimido (Figura 4.18).

Figura 4.18 - Reservatório hidropneumático para águas residuais (adaptado de Mendes, 2011)

Neste tipo de reservatórios não há qualquer contacto entre a água e o ar no seu interior, prevenindo-se assim a dissolução do ar no líquido, não havendo desta forma a necessidade de ter um compressor para controlar a massa de ar no interior do reservatório.

Além de não precisar de um compressor em permanência, por outro lado estes reservatórios têm ainda a vantagem em termos de exploração uma vez que a membrana que separa o líquido do ar é substituível no local, dispensando assim, em caso de avaria, o seu transporte para a fábrica e todos os inconvenientes associados (Mendes, 2011).

4.5.6 Reservatório hidropneumático com alimentação automática de ar

O reservatório hidropneumático com admissão automática de ar, consiste num reservatório fechado que tem uma válvula especial que impede que a pressão do ar no seu inteiro atinja valores inferiores à pressão atmosférica. Este tipo de dispositivo conjuga um comportamento análogo ao de uma chaminé de equilíbrio (quando a pressão do ar é igual à pressão atmosférica) com o de um RAC (quando a pressão do ar interior é superior à pressão atmosférica).

A Figura 4.19 é um exemplo de um RHAAA desenvolvido pela Charlatte.

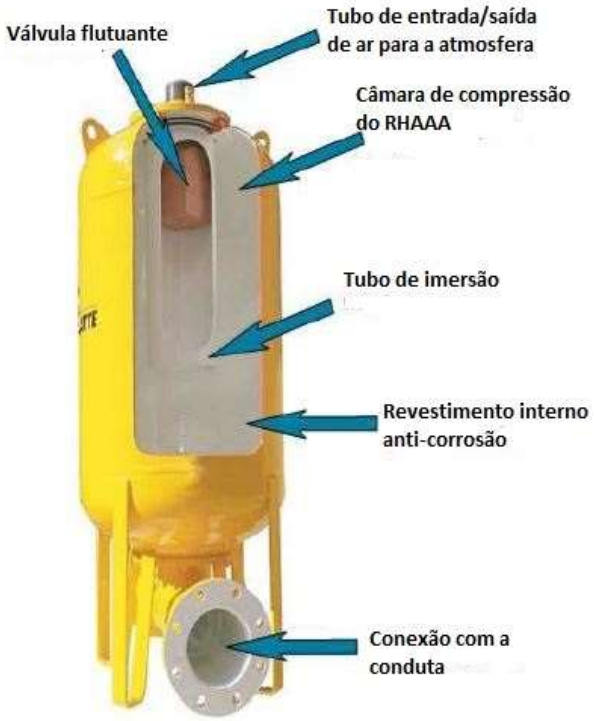


Figura 4.19 - Exemplo de RHAAA e respetivos constituintes
(adaptado do catálogo técnico da Charlatte, 2015)

Os RHAAA conjugam as vantagens do reservatório de ar comprimido e do reservatório unidirecional e beneficiam da dispensa de compressores de ar, uma vez que a admissão de ar é conseguida de forma automática pela válvula de alimentação de ar instalada. De seguida mostra-se uma sequência de figuras onde se pretende explicar o funcionamento dos RHAAA (Charlatte, 2015).

4.5.6.1 Descrição do funcionamento do RHAAA

Comportamento no arranque do grupo de bombagem:

Quando o grupo elevatório arranca, a conduta elevatória começa a alimentar o reservatório, e com a entrada do fluido, o ar contido no interior do RHAAA é expulso uma vez que a válvula está aberta, como se pode ver na Figura 4.20.

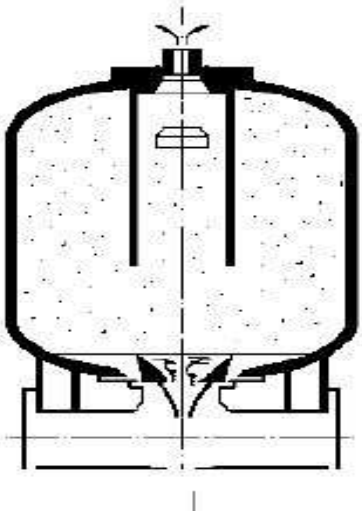


Figura 4.20 - Sistema RHAAA - válvula de libertação de ar (adaptado do catálogo técnico da Charlatte, 2015)

A Figura 4.21 permite-nos observar que a conduta elevatória continua a encher e a água continua a entrar no reservatório, continuando dessa forma a expulsão do ar do interior do reservatório enquanto a válvula estiver aberta. O nível do fluido vai subindo, sob funcionamento da bomba, até alcançar o fundo do tubo central de ventilação.

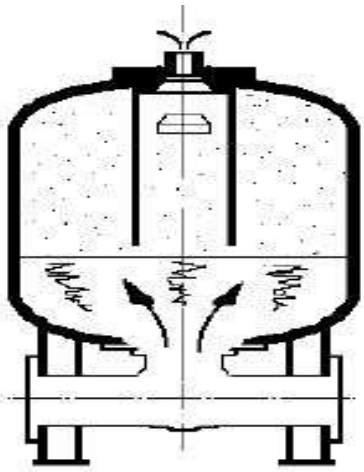


Figura 4.21 - Sistema RHAAA - funcionamento tipo chaminé de equilíbrio (adaptado do catálogo técnico da Charlatte, 2015)

O nível do fluido começa agora a subir pelo tubo central, como se pode ver na Figura 4.22, enquanto a válvula ainda está aberta. O ar que está contido no interior do reservatório começa a ficar comprimido. Com a continuação da subida do fluido pelo tubo central, a válvula/flutuador é empurrada até provocar o seu fecho.

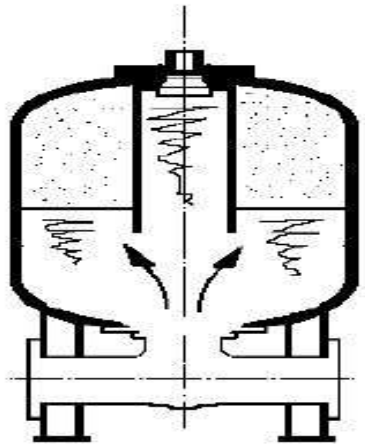


Figura 4.22 - Sistema RHAAA - fecho da válvula
(adaptado do catálogo técnico da Charlatte, 2015)

À medida que a pressão aumenta, o ar é comprimido até o sistema atingir uma condição de equilíbrio. Nesta fase não há qualquer troca entre o reservatório e o exterior uma vez que a válvula está fechada, tal como demonstra a Figura 4.23.

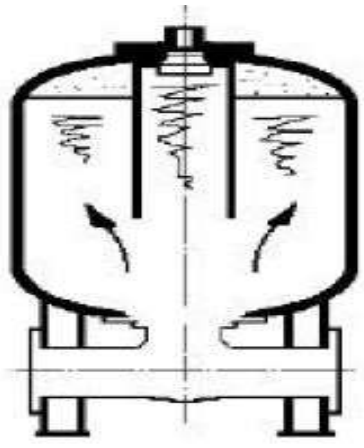


Figura 4.23 - Sistema RHAAA - ar comprimido
(adaptado do catálogo técnico da Charlatte, 2015)

Comportamento após a paragem do grupo de bombagem:

Logo após a paragem da bomba, a pressão começa a baixar e a energia elástica do gás descarrega o líquido do interior do reservatório para a conduta, como se pode ver na Figura 4.24. Essa energia provoca uma atenuação da queda de pressão na conduta. Quando o nível do fluído desce abaixo do fundo do tubo de ventilação, a válvula abre novamente.

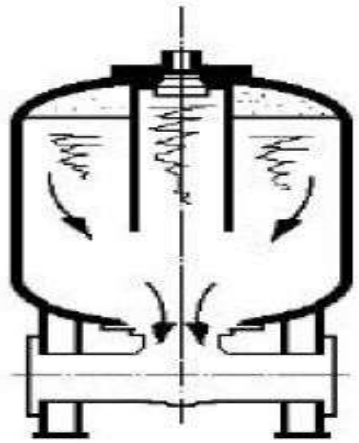


Figura 4.24 - Sistema RHAAA - funcionamento tipo RUD (adaptado do catálogo técnico da Charlatte, 2015)

Quando a válvula abre, volta a haver um contacto com o exterior, pelo que a alimentação da conduta é feita à pressão atmosférica. O nível de água continua a descer até atingir um nível mínimo, altura que coincide com a chegada do caudal à secção de interseção entre o reservatório e a conduta, Figura 4.25.

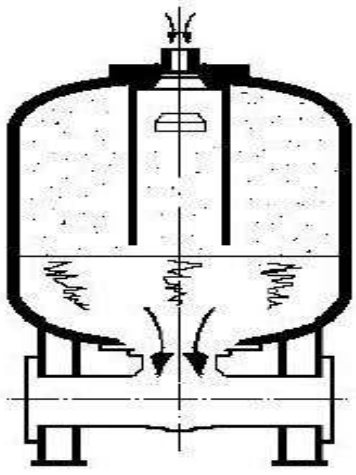


Figura 4.25 - Sistema RHAAA - descida do nível da água (adaptado do catálogo técnico da Charlatte, 2015)

O processo de oscilação continua mas cada vez com menos intensidade devido às perdas de carga na tubagem. Depois de vários ciclos, as condições estáticas são atingidas acima ou abaixo do fundo do tubo de ventilação, dependendo das dimensões do RHAAA (Figura 4.26).

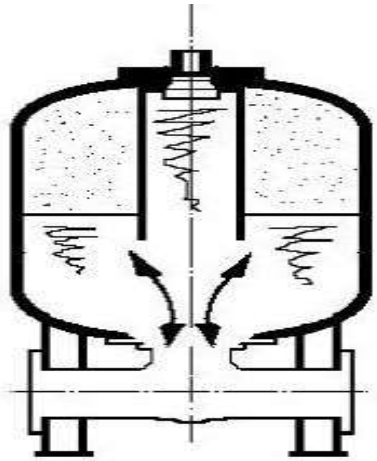


Figura 4.26 - Sistema RHAAA – oscilações (adaptado de Catálogo Técnico da Charlatte, 2015)

A almofada de ar no interior do reservatório será novamente comprimida depois do arranque do grupo eletrobomba e a energia elástica está agora preparada para fazer face a uma nova paragem do grupo de bombagem.

Após a análise do comportamento do RHAAA descrito na sequência anterior, pode-se dizer que este funciona como um reservatório de ar comprimido na fase de sobrepressão e como um reservatório unidirecional, ou chaminé de equilíbrio, na fase de depressão. Este dispositivo torna-se mais eficaz e tem maior utilidade em sistemas elevatórios que envolvem pequenas alturas de elevação, para os quais normalmente se exigem elevados volumes para um RAC (Mendes, 2011).

5 CASO DE ESTUDO: ESTAÇÃO ELEVATÓRIA DE CANELAS

5.1 ENQUADRAMENTO: SUBSISTEMA DE GAIA LITORAL

Depois da agregação das empresas referidas no capítulo 2 numa só empresa, Águas do Norte, S.A., esta ficou com uma grande área abrangente e respetivas infraestruturas e equipamentos. O trabalho elaborado incide apenas sobre o Subsistema de Gaia Litoral, localizado no concelho de Vila Nova de Gaia, e no subcapítulo seguinte serão enumeradas as infraestruturas pertencentes a este Subsistema.

O Subsistema de Gaia Litoral descarrega o seu efluente tratado no Oceano Atlântico. Este subsistema serve parte do concelho de Vila Nova de Gaia.

5.1.1 ETAR de Gaia Litoral

A ETAR de Gaia Litoral foi dimensionada para tratar a um equivalente populacional de 300 000 habitantes, ao qual corresponderá um caudal médio de 66 700 m^3/dia, no ano de horizonte de projeto (AdNorte, 2016).

Figura 5.1 - ETAR de Gaia Litoral (www.adnorte.pt)

5.1.1.1 Intercetores

O Subsistema de Litoral inclui aproximadamente, 77,7 km de intercetores, que estão já em exploração, com diâmetros compreendidos entre 200 e 1 100 mm. O material predominante é o ferro fundido dúctil e PVC (AdNorte, 2016).

5.1.1.2 Estações elevatórias

O Subsistema de Gaia Litoral é constituído por 12 estações elevatórias. As estações elevatórias referentes ao subsistema estão identificadas na Figura 5.2.

Figura 5.2 - Estações elevatórias do subsistema de Gaia Litoral

5.1.1.3 Condutas elevatórias

O subsistema de Gaia Litoral é constituído por aproximadamente 17,3 km de condutas elevatórias, com diâmetros compreendidos entre 200 e 900 mm. O material predominante é o ferro fundido dúctil (AdNorte, 2016).

5.2 ESTAÇÃO ELEVATÓRIA DE CANELAS

5.2.1 Descrição da estação elevatória

A estação elevatória de Canelas localizada na freguesia de Gulpilhares, está inserida no subsistema de Gaia Litoral. Esta instalação eleva o caudal proveniente do intercetor de Canelas, encaminhado-o para a estação elevatória de Valadares.

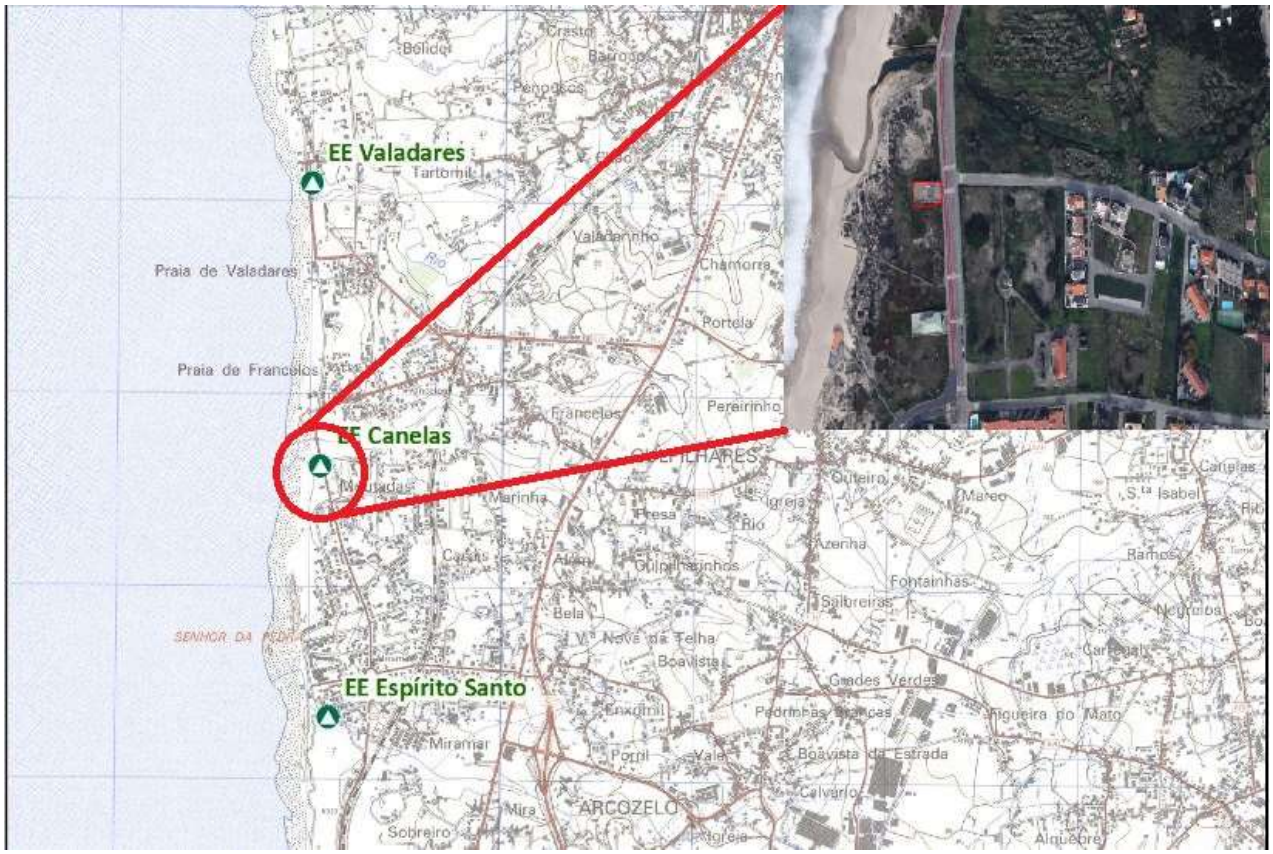


Figura 5.3 - Localização da EE de Canelas

5.2.1.1 Obra de entrada

A obra de entrada da estação elevatória de Canelas está equipada com uma válvula mural com acionamento pneumático instalada na extremidade da tubagem de chegada.

Existem na obra de entrada dois canais onde estão instaladas uma grade mecânica e uma grade manual para a retenção de detritos. A montante das grades estão instaladas comportas manuais. A grade mecânica é do tipo rotativo, ou seja, com dentes de limpeza e movimento de rotação em torno do eixo transversal ao canal.

Figura 5.4 - Obra de entrada

Os resíduos recolhidos pelas grades são depositados num contentor que é retirado da obra de entrada através de um diferencial, sendo depois encaminhado por viaturas próprias para o destino final.

5.2.1.2 Poço de bombagem

O poço de bombagem da estação elevatória de Canelas possui 3 grupos eletrobomba submersíveis, de bombas centrífugas de eixo vertical, funcionando um deles como reserva dos restantes.

O funcionamento das bombas é comandado por bóias de nível e/ou por sondas MSP90.

O poço de bombagem é servido por um diferencial com capacidade de 1000 kg para elevação dos equipamentos presentes no poço (grupos eletrobomba, tubagens e acessórios).

5.2.1.3 Câmara de manobras

A câmara de manobras da estação elevatória é constituída por 3 tubagens de compressão individual DN200mm, por 3 válvulas de retenção com batente e 3 válvulas de borboleta atuadas pneumaticamente, cada uma associada a uma bomba.

A tubagem de compressão coletiva, DN300mm, pode ser seccionada através de uma válvula de cunha manual. As tubagens e acessórios no interior da estação elevatória são em ferro fundido, protegido no interior e exterior contra a corrosão, com ligações flangeadas.

Figura 5.5 - Câmara de manobras

5.2.1.4 Conduta elevatória

A conduta elevatória de Canelas tem um comprimento de 841m, diâmetro de 350mm e é em FFD. O perfil longitudinal da conduta está representado na Figura 5.6

5.2.1.5 Dispositivo de proteção contra o choque hidráulico

Para proteção deste sistema elevatório foi preconizado um reservatório unidirecional (RUD) para alimentação da conduta com água, evitando a ocorrência de pressões negativas.

O RUD foi implantado a uma distância da estação elevatória de 637m, por ser um local adequado dadas as depressões ao longo da conduta.

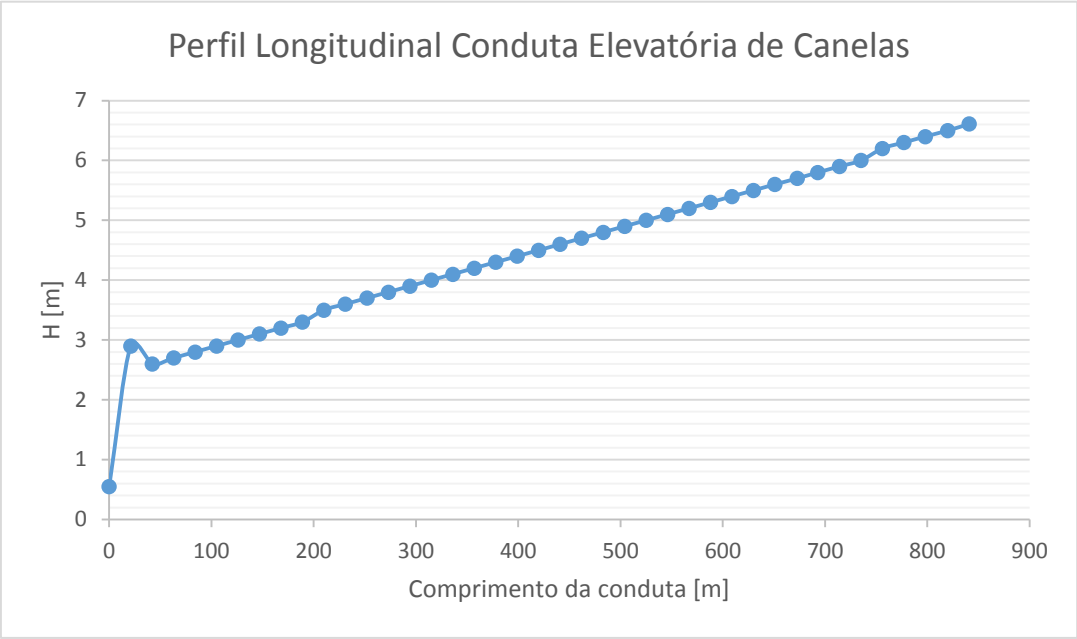


Figura 5.6 - Perfil Longitudinal da Conduta Elevatória de Canelas

O volume do RUD foi calculado através da expressão 5.1 que por sua vez foi retirada da memória descritiva referente ao projeto da estação elevatória (Almeida, 1982 citado por AdNorte, 2016):

$$V = \frac{L * {Q_0}^2}{2 * g * S * Hgu} = \frac{204 * 0.160^2}{2 * 9.8 * 0.0962 * 0.46} = 5.90\ m^3 \qquad 5.1$$

em que:

V – Volume útil do RUD (m^3)

L – Comprimento da conduta elevatória a jusante do RUD (m)

Q_0 – Caudal correspondente ao regime permanente (m^3/s)

S – Secção interna da conduta elevatória (m^2)

H_{gu}– Desnível entre o plano da água no RUD e a superfície livre na extremidade de jusante (m)

Tendo em conta o valor final do volume obtido através da expressão anterior, a estação elevatória tem atualmente um RUD instalado com um volume de 7,7m^3 para efeitos de proteção do choque hidráulico.

5.2.1.6 Instalações elétricas e sistema de ar comprimido

Existe na estação elevatória um compressor com uma potência de 5,5 kW acoplado a um reservatório de ar comprimido de 475 l para acionamento das válvulas de seccionamento e válvula mural.

A estação elevatória tem um quadro elétrico que contém toda a aparelhagem e equipamento de proteção, comando e corte dos dispositivos que serve. Este quadro está montado no edifício de exploração e é através dele que é comandada toda a estação. O quadro elétrico está protegido contra a humidade.

Figura 5.7 - Compressor com reservatório de ar comprimido

Figura 5.8 - Quadro elétrico

Em anexo neste documento segue a planta da estação elevatória de Canelas, onde é possível observar com melhor perceção a localização dos espaços e equipamentos presentes na estação elevatória.

5.2.2 Características do grupo eletrobomba

A estação elevatória de Canelas possui no poço de bombagem 3 bombas, estando 2 delas em funcionamento e uma de reserva. As bombas em questão são da marca *FAGGIOLATI* e modelo G413R6V2-P80AA2 da série 7D, como se pode ver na Figura 5.9.

A ficha técnica correspondente às bombas instaladas na estação elevatória de Canelas está em anexo no presente relatório.

Consultando as fichas fornecidas pelo fabricante, foi possível retirar vários dados. As bombas da estação elevatória de Canelas têm uma frequência de 50Hz e não estão dotadas de qualquer dispositivo variador de frequência. Da ficha do fabricante é também possível retirar o valor da velocidade de rotação de cada grupo elevatório que é de 1436 rpm (rotações por minuto).

Também é possível retirar das fichas da bomba o valor do momento de inércia correspondente à bomba, e observar a curva caraterística da bomba e curva de rendimento.

Figura 5.9 - Bomba submersível Faggiolati instalada na estação elevatória

5.2.3 Modelação do choque hidráulico sem dispositivo de proteção em "*Matlab*"

Para analisar os efeitos do choque hidráulico nos sistemas elevatórios alvos de estudo, recorreu-se ao programa desenvolvido em "*Matlab*" pelo Professor Pacheco Figueiredo, que gentilmente o cedeu para a realização deste trabalho.

Após a inserção dos dados relativos ao sistema elevatório na folha de *"input"*, o programa aplicando o método das características gera as envolventes de pressões, apresentando os resultados em tabela, numa folha de *"output"* ou graficamente.

No caso da EE de Canelas, o valor dos dados de *"input"* são os apresentados na Tabela 5.1:

Tabela 5.1 - Dados "input" da EE de Canelas

Comprimento da conduta (m)	841
Diâmetro da conduta (mm)	350
Rugosidade (mm)	0.15
Cota montante (m)	0.55
Cota jusante (m)	6.61
Fator de majoração da perda de carga contínua	1.2
Viscosidade cinemática (m^2/s)	1.31E-06
Celeridade (m/s)	1149
Nº de Trechos para divisão da conduta	40

O valor da celeridade foi calculado recorrendo à equação 4.30:

$$a = \sqrt{\frac{1}{1000 * (\frac{1}{2.05 * 10^9} + \frac{0.35 * 1}{170 * 10^9 * 0.00765})}} = 1149.4\ m/s$$

em que:

- ρ = 1000 kg/m^3
- ε = 2.05*10^9 Pa
- C_1 = 1
- E = 170*10^9 Pa
- D = 350 mm
- e = 7.65 mm

A fase da onda de choque, tempo necessário para que a onda percorra a conduta nos dois sentidos, é determinada pela equação 4.31:

$$\mu = \frac{2 * 841}{1149.4} = 1.46\ s$$

Outros dos dados pedidos pelo programa e que têm de ser inseridos na folha de "*input*" são as características do grupo eletrobomba, a saber: curva caraterística da bomba, curva de rendimento da bomba e o valor da inércia do grupo elevatório, PD^2.

O parâmetro PD^2 pode ser calculado através da expressão 4.73, em que I_0 é obtido recorrendo aos dados fornecidos pelo fabricante das bombas. Segundo o fabricante, o valor do momento de inércia, I_0, das bombas instaladas na estação elevatória de Canelas é de 0.1488 Kg.m^2.

Recorrendo então, á expressão 4.73:

$$PD^2 = 4 * 9.81 * 0.1488 \cong 6\ Nm^2$$

Quando estão em funcionamento as 2 bombas, o valor de PD^2 é de 12 Nm^2.

Antes da simulação, pode-se ver na Figura 5.10 o traçado em regime permanente.

Para a simulação deste sistema, sem dispositivo de proteção ao choque hidráulico, decidiu-se por um tempo de simulação de 16 segundos e este valor será multiplicado pelo tempo de fase calculado anteriormente.

Os resultados desta simulação, admitindo todos os critérios adotados até esta fase, poderão ser analisados na Figura 5.11, que mostra o comportamento da linha de carga ao longo da simulação.

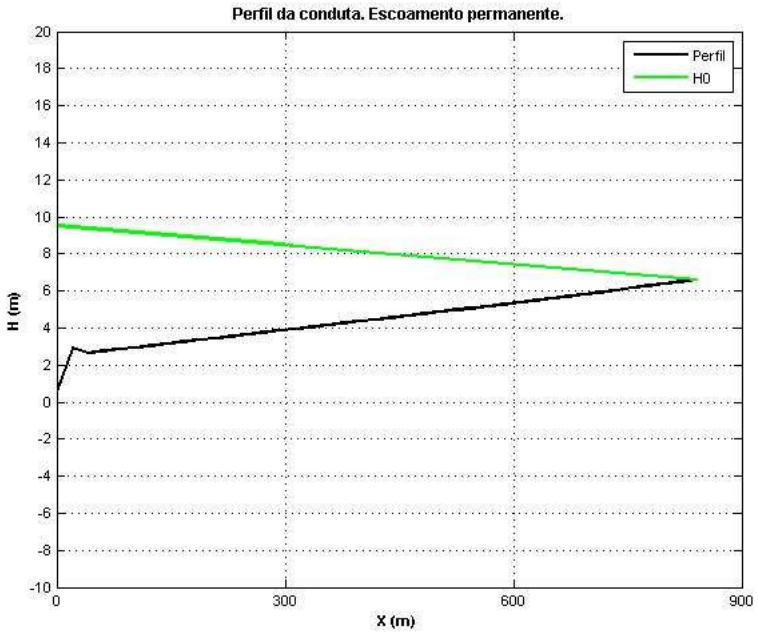


Figura 5.10 - Traçado da linha de carga em regime permanente "H_0"

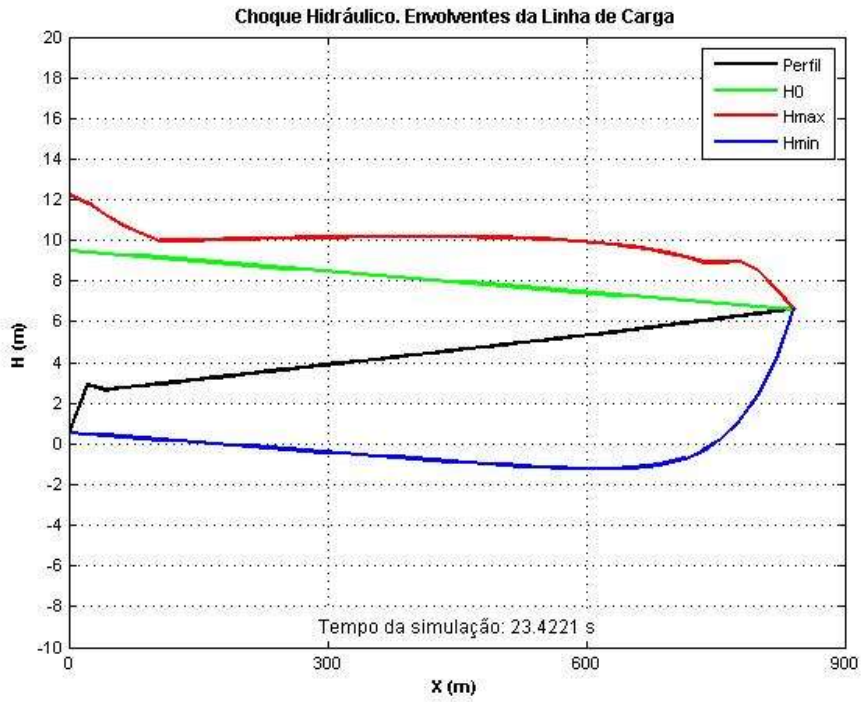


Figura 5.11 - Comportamento da envolvente da linha de carga após a simulação sem dispositivos de proteção ao choque hidráulico

Os resultados gerados na folha *"output"* contêm os valores, por exemplo, da altura manométrica, caudal elevado, perfil longitudinal da conduta e valores de subpressões e sobrepressões na conduta.

Na Tabela 5.2, estão os resultados do regime permanente, correspondentes à Figura 5.10.

Tabela 5.2 - Ponto de funcionamento da estação elevatória de Canelas

Caudal elevado (l/s)	100.9
Altura manométrica do grupo elevatório (m)	8.95
Velocidade média na conduta (m/s)	1.049
Perda de carga unitária (m/km)	2.866

O valor do caudal elevado corresponde ao ponto de funcionamento para as duas bombas a trabalhar em simultâneo. Este valor é obtido através do cruzamento da curva caraterística da bomba, com duas bombas em funcionamento, e da curva caraterística de instalação.

Os resultados mais relevantes para a análise do choque hidráulico presentes também nessa folha de dados, são os valores da variação da pressão e da carga hidráulica ao longo dos 40 trechos em que se dividiu a conduta. A folha *"output"* da simulação pode ser consultada em anexo.

Analisando a Figura 5.11, constata-se que o sistema elevatório de Canelas necessita de um dispositivo de proteção, uma vez que os valores das subpressões, ou depressões, não são aceitáveis e a conduta apresenta subpressões ao longo de todo o seu traçado, atingindo um máximo de -6.79m aos 672.8m da conduta. A pressão é máxima imediatamente a jusante das bombas.

Na Tabela 5.3, mostram-se os principais resultados da simulação sem proteção ao choque hidráulico, correspondentes à Figura 5.11.

Tabela 5.3 - Resultados da simulação ao choque hidráulico sem dispositivo de proteção

Tempo de paragem do grupo eletrobomba (s)	13.285
Pressão máxima (m)	11.71
Pressão mínima (m)	-6.79

A folha *"output"* da simulação pode ser consultada em anexo.

5.2.4 Estudo de nova solução para proteção ao choque hidráulico

Apesar do RUD, dispositivo existente para efeitos de proteção ao choque hidráulico, se mostrar ao longo dos anos de exploração da estação elevatória como um dispositivo eficaz, depois de uma análise ao sistema notou-se que existia um consumo significativo de água potável neste sistema de proteção.

Como já foi abordado no capítulo referente aos sistemas de proteção ao choque hidráulico os RUD permitem compensar, durante um determinado intervalo de tempo, a diminuição do caudal fornecido pelas bombas, o que permite evitar a rotura da veia líquida em secções da conduta localizadas nos pontos altos ou junto às bombas.

Este dispositivo cumpre a totalidade dos requisitos que são necessários para a proteção do sistema, no entanto o volume consumido de água potável é proibitivo e portanto foram avaliadas alternativas de funcionamento, mantendo o objetivo inicial que é a proteção das depressões a que a conduta elevatória está sujeita.

Depois da avaliação de alternativas, a solução encontrada que melhor se adequa às solicitações do sistema foi uma solução da Charlatte, reservatório hidropneumático com alimentação automática de ar (RHAAA), e o seu funcionamento já foi explicado no anteriormente. A avaliação e estudo das alternativas foram feitas por uma entidade externa, contratada pela empresa para o devido efeito (SimDouro, 2015).

6 MODELAÇÃO DE DISPOSITIVO EM *MATLAB*: CHAMINÉ DE EQUILÍBRIO

Um dos objetivos do presente documento é a modelação de dispositivos de proteção ao choque hidráulico. Uma vez que o programa de cálculo utilizado, desenvolvido pelo Prof. Pacheco Figueiredo, já inclui a modelação do RAC, decidiu-se acrescentar ao programa a modelação de uma chaminé de equilíbrio, enriquecendo desta forma ainda mais a ferramenta de cálculo. É de salientar que para além de estar preparada para existência de RAC o programa calcula também fugas e perdas caso existam, mas essa vertente não será abordada neste relatório e por isso não se usou qualquer valor para o caso.

Optou-se pela modelação da chaminé de equilíbrio tendo por base o facto de uma possível continuidade do trabalho no futuro, e uma modelação do sistema RHAAA da Charlatte em "*Matlab"*. Uma vez que o sistema funciona como uma chaminé de equilíbrio até atingir o tubo de ventilação, e como um RAC depois de atingido o tubo, será mais acessível a modelação do sistema se a chaminé de equilíbrio e o RAC já estiverem devidamente modelados.

Tal como já foi abordado no capítulo 4.4.3 referente às condições de fronteira de uma chaminé de equilíbrio, as equações necessárias à modelação deste dispositivo de proteção são as seguintes:

- $Q_j = Q_m + Q_{ch}$
- $\Delta Z = -\frac{Q_{ch}(t)+ Q_{ch}(t+\Delta t)}{2*S_{ch}} * \Delta t$
- $Z_{ch}(t+\Delta t) = Z_{ch}(t) + \Delta Z(t+\Delta t)$
- $H_i = Z_{ch}$
- $H_i(t+\Delta t) = H_{i-1}(t) - A[Q_m(t+\Delta t) - Q_{i-1}(t)] - R(Q_{i-1}(t)|Q_{i-1}(t)|)$
- $H_i(t+\Delta t) = H_{i+1}(t) + A\left[Q_j(t+\Delta t) - Q_{i+1}(t)\right] + R(Q_{i+1}(t)|Q_{i+1}(t)|)$

Estas equações foram devidamente explicadas no capítulo em questão, bem como todas as incógnitas utilizadas no processo de cálculo. Para além dos pressupostos explicados anteriormente, admite-se que em todos os instantes $Z_{ch} > Z_{ch_min}$, em que Z_{ch_min} é a cota do fundo da chaminé.

De seguida, explica-se como se fez a compatibilização do conteúdo referente à chaminé de equilíbrio com o programa de cálculo. Em anexo, segue o código da rotina criada em *"Matlab"* destinado à modelação de uma chaminé de equilíbrio.

6.1 INSERÇÃO DA CHAMINÉ DE EQUILÍBRIO NO PROGRAMA DE CÁLCULO

Foi necessário fazer algumas alterações no programa base, para adaptar o mesmo à possibilidade de existir uma chaminé de equilíbrio no cálculo do choque hidráulico nos sistemas em estudo. Começou-se por inserir novos dados de entrada na folha *"input"*. A folha inicial pode ser consultada em anexo, sendo que as alterações feitas na folha *"input"*, são visíveis na figura seguinte:

```
Chaminé de Equilíbrio (CH)
Diametro da Chaminé (m); se Dcham=0, não há CH.
(inserir valor)
Zch_min (m)
(inserir valor)
D_lig (mm), D_tub (mm)
(inserir valor) (inserir valor)
Comprimento do tubo de ligação (m), Rugosidade no tubo de ligação
(mm)
(inserir valor)              (inserir valor)
Coef. de perda de carga localizada no tubo de ligação (não
considerar aqui a tubeira)
(inserir valor)
Seccao com CH (maior que 1 e menor que numero de "delta x" + 1;
se igual a 0 não há CH)
(inserir valor)
```

Figura 6.1 - Inserção de novos dados na folha *"input"*

Alerta-se para o facto de, como já foi referido quando se deduziram as equações das condições de fronteira, não se considerarem perdas de carga localizadas neste caso de estudo. Isto quer dizer os dados a fornecer nesta folha para o cálculo do choque hidráulico com chaminé de equilíbrio como dispositivo de proteção são:

- D_{cham} – Diâmetro da chaminé de equilíbrio;
- Zch_min – Cota do nível mínimo da chaminé de equilíbrio;

Todos os valores devem ser inseridos na folha de dados nas unidades que são pedidas, de modo a não interferir com os cálculos quando se dá a simulação do choque hidráulico no programa.

A variável "Secção com CH" corresponde à secção onde será colocada a chaminé de equilíbrio.

As outras variáveis seriam utilizadas se houvesse consideração das perdas de carga entre a ligação da chaminé de equilíbrio e a conduta elevatória.

Depois destas alterações na folha de dados, criou-se uma rotina em "*Matlab"* para que o programa original possa calcular o choque hidráulico recorrendo às condições fronteira da chaminé de equilíbrio.

6.2 APLICAÇÃO DO PROGRAMA COM CHAMINÉ DE EQUILÍBRIO AO CASO DE ESTUDO DE CANELAS

Após a inserção dos parâmetros necessários na folha *"input"* para o funcionamento da chaminé de equilíbrio no programa de cálculo, testou-se esta nova funcionalidade com dados referentes à adutora de Canelas.

Para o funcionamento do programa foi necessário escolher um valor para o diâmetro da chaminé de equilíbrio que se adaptasse ao sistema elevatório de Canelas. Como já foi referido, uma das condições impostas para o funcionamento da chaminé de equilíbrio é $Z_{ch} > Z_{ch_min}$, o nível da água nunca poderá ser inferior à cota do nível mínimo da chaminé de equilíbrio. Considerou-se o nível mínimo da chaminé de equilíbrio 3.4m, sendo a cota da conduta elevatória no ponto onde será instalada a chaminé de equilíbrio de 2.9m e considerando a ligação entre a conduta e a chaminé de 0.50m. Desta forma testaram-se vários diâmetros para a chaminé de equilíbrio, até encontrar o valor mínimo admissível. Mostra-se na

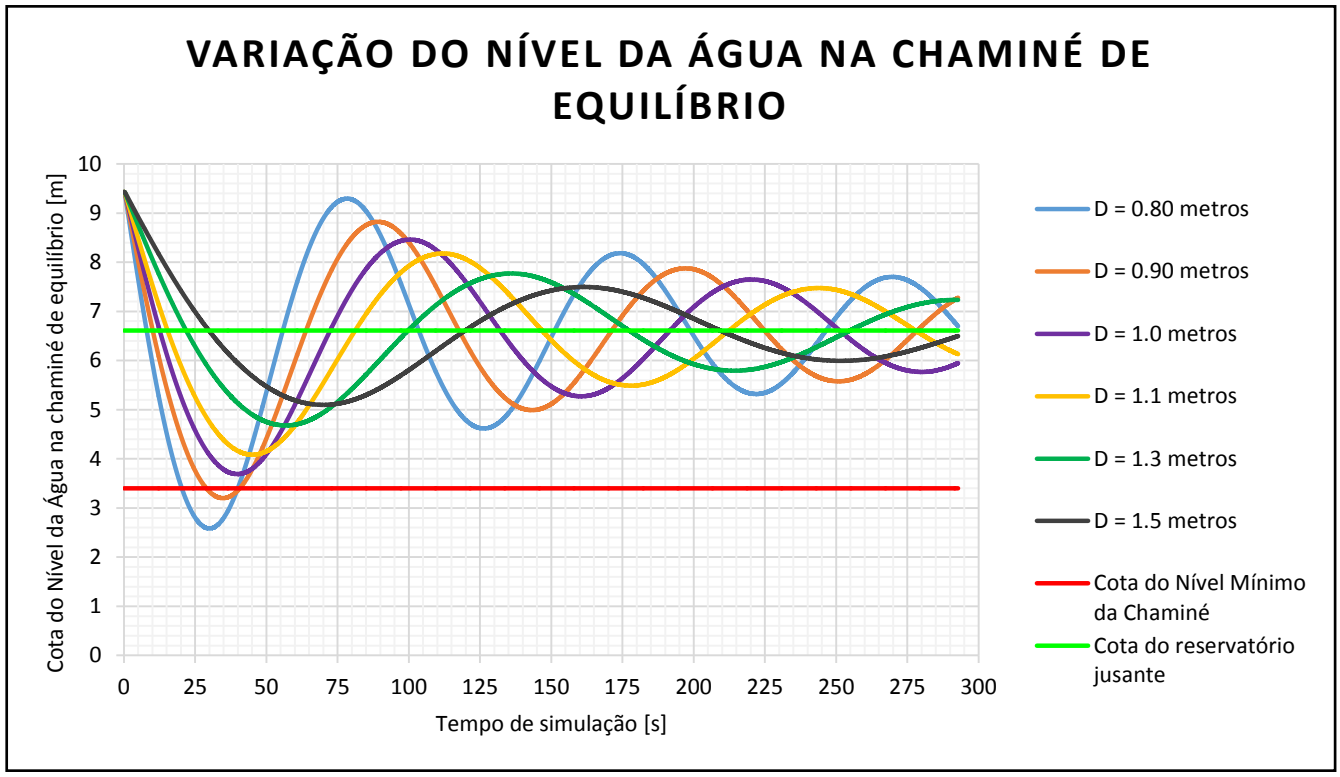


Figura 6.2 - Variação do nível da água na chaminé de equilíbrio para vários diâmetros

Figura 6.2 o gráfico com a variação do nível da água na chaminé de equilíbrio para os diâmetros escolhidos.

Da análise do gráfico da Figura 6.2, é possível perceber que a variação do nível da água no interior da chaminé para os diâmetros de 0.8m e 0.9m é inferior à cota do nível mínimo da chaminé. Para uma chaminé de 1m e valores superiores já não se corre o risco da entrada de ar na conduta pois o nível mínimo de água na chaminé de equilíbrio é superior à cota do nível mínimo da chaminé equilíbrio.

A diminuição do diâmetro da chaminé de equilíbrio implica maior oscilação do nível da água no interior da chaminé, daí resultam valores de subpressões e sobrepressões superiores e um período de oscilação mais curto. À medida que aumentamos o diâmetro, o volume disponível na chaminé será maior e as oscilações da água no seu interior são menores, obtendo assim melhores resultados para as subpressões e sobrepressões ao longo da conduta elevatória. Em qualquer um dos casos, no decorrer do tempo a variação do nível da água tende a estabilizar para um valor de 6.61m, que corresponde ao nível da superfície livre do reservatório a jusante da conduta.

Da análise gráfica, conclui-se que o valor mínimo admissível para a chaminé de equilíbrio é de 1m, e esse será o valor utilizado para prosseguir os cálculos.

Desta forma, os valores a inserir na folha *"input"* são apresentados na Tabela 6.1

Tabela 6.1 - Dados "*input*" a inserir no programa

Diâmetro da chaminé de equilíbrio: D_{cham} (m)	1.0
Cota do nível mínimo da chaminé de equilíbrio: Zch_min (m)	3.4
Secção com CH	2

A secção com chaminé de equilíbrio é a secção 2, pois considerou-se que a chaminé se encontrava imediatamente a jusante do grupo eletrobomba (aproximadamente 21m). Depois destes pressupostos, na Figura 6.3 pode ver-se o resultado da simulação, onde é possível observar o comportamento das envolventes da linha de carga utilizando a chaminé de equilíbrio como dispositivo de proteção.

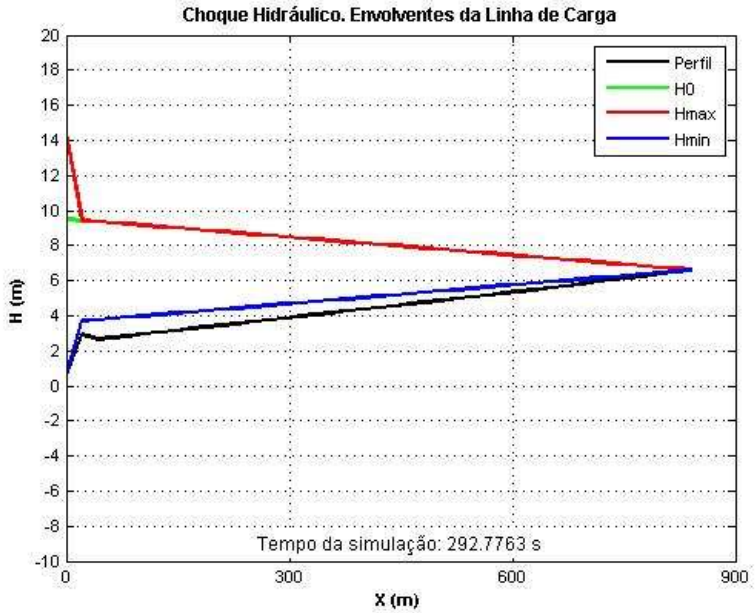


Figura 6.3 - Comportamento das envolventes da linha de carga com chaminé de equilíbrio

Na Figura 6.4 é possível observar o comportamento do nível da água na chaminé de equilíbrio no decorrer da simulação.

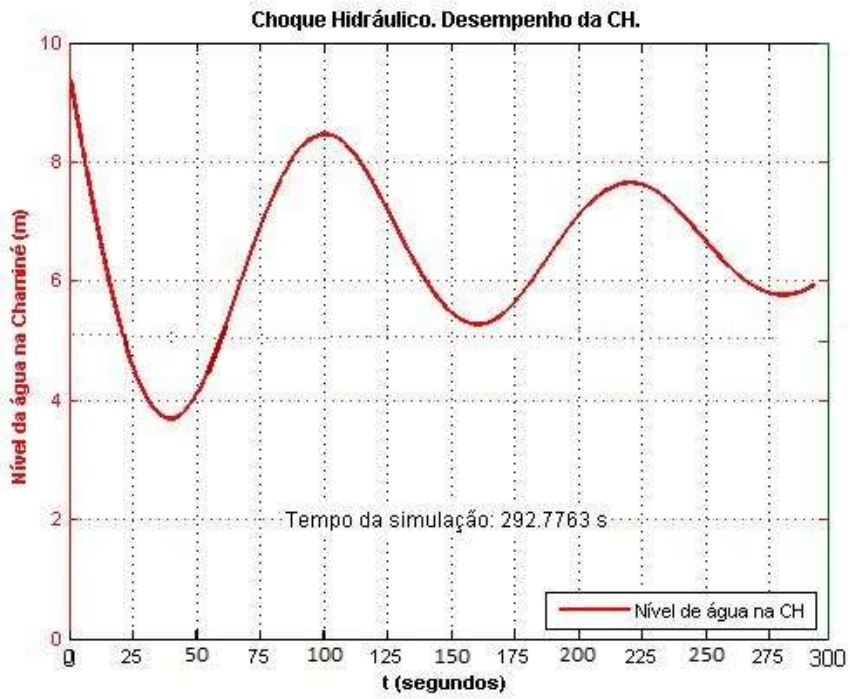


Figura 6.4 - Nível da água no interior da chaminé de equilíbrio

Na tabela seguinte, apresentam-se os principais resultados desta simulação sendo que em anexo se pode observar a folha *"output"* com os resultados totais obtidos para as envolventes, pressões e nível da água.

Tabela 6.2 - Resultados da simulação ao choque hidráulico com chaminé de equilíbrio

Tempo de paragem do grupo eletrobomba (s)	0.476
Pressão máxima (m)	13.854
Pressão mínima (m)	0
Nível máximo de água na chaminé (m)	9.430
Nível mínimo de água na chaminé (m)	3.689
Volume da chaminé de equilíbrio (m^3)	4.736

Perante os resultados obtidos pode concluir-se que a chaminé de equilíbrio era uma solução que resolveria os problemas a nível de pressões negativas ao longo da conduta como era expectável. Há um ligeiro acréscimo da pressão máxima, devido à inserção de um dispositivo de proteção, mas o valor continua aceitável.

Como já foi referido anteriormente, as grandes desvantagens da chaminé de equilíbrio são as obras avultadas que este tipo de dispositivo requer e também o impacto visual que causa o que faz com que este dispositivo não seja opção para a proteção ao choque hidráulico neste sistema elevatório.

O valor do nível máximo da água na chaminé de equilíbrio é igual ao valor da carga hidráulica na secção onde esta foi instalada, ou seja na secção 2. Usou-se um valor mais elevado para o tempo de simulação para que seja mais percetível a variação do nível da água ao longo do tempo.

Seria necessário uma chaminé de equilíbrio com um volume de 4.736m^3, e uma altura de aproximadamente 6m.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

7.1 CONCLUSÕES

Após a realização deste trabalho, pode-se chegar a algumas conclusões sobre o tema de estudo: avaliação do choque hidráulico e dispositivos de proteção em estações elevatórias de águas residuais.

Os objetivos propostos no início deste relatório pelo autor foram atingidos: o estudo do choque hidráulico na estação elevatória de Canelas, o estudo de dispositivos de proteção/minimização ao choque hidráulico e a modelação de um dispositivo de proteção ao choque hidráulico, neste caso a chaminé de equilíbrio.

No decorrer do estágio foi possível ter uma melhor perceção de como funcionam os sistemas presentes numa estação elevatória de águas residuais, bem como o funcionamento de cada um dos equipamentos individualmente. Foi possível verificar a importância destas instalações e o impacto que têm no ciclo do tratamento de águas residuais e no quotidiano da população. Para além disso perceberam-se as suscetibilidades e os cuidados permanentes a ter com este tipo de instalações para que funcionem normalmente sem causar danos, que em alguns casos podem ser graves não só para as pessoas mas também para o meio ambiente.

Relativamente ao choque hidráulico, constata-se que é um tema bastante complexo, com muitas melhorias ao longo dos tempos, e que nesta fase com os vastos recursos que se dispõem é possível fazer mais, conseguir resultados mais precisos para que se cometam menos falhas à posteriori no dimensionamento de dispositivos de proteção.

Analisando o caso prático de Canelas, após avaliação do atual dispositivo de proteção e novo cálculo do choque hidráulico, foi possível perceber que o RUD existente não é a solução que melhor se adequa ao sistema face aos problemas atuais, principalmente porque são notórios os gastos de água que a empresa tem com o dispositivo, embora o dispositivo seja eficaz na proteção ao choque hidráulico.

Após várias visitas ao terreno, constata-se que estas se revelaram bastante importantes para a análise do choque hidráulico, e da escolha do dispositivo de proteção. A fase de recolher dados relativos aos equipamentos instalados, verificar a sua funcionalidade, o seu estado e o espaço envolvente foram aspetos fulcrais para depois se realizar o cálculo do choque hidráulico e estudar uma alternativa para o dispositivo de proteção.

No decorrer dos cálculos e posteriores análises foi bastante gratificante perceber que os conhecimentos adquiridos nas unidades curriculares frequentadas foram importantes para relacionar os conhecimentos teóricos com a parte mais prática no terreno.

Ao longo do estágio também apareceram algumas dificuldades, devidas a vários fatores. Um dos fatores condicionantes foi o estágio decorrer em tempo coincidente com a época balnear: uma vez que a estação elevatória de Canelas se localiza junto à praia requer atenção e cuidados extremos, pois não se pode por em causa o serviço público prestado aos utentes. Outro problema notório foi o estado de conservação de alguns equipamentos, que começam a demonstrar algumas deficiências no seu funcionamento e a curto prazo requerem substituição. Por último o facto da estação elevatória já ter sido projetada há muitos anos o que dificultou o acesso a elementos de projeto de forma a ter uma base de comparação, bem como acesso a fichas técnicas que em certos casos tiveram de ser solicitadas aos fornecedores dos equipamentos.

Em suma, estes meses foram de constante aprendizagem o que enriqueceu bastante o percurso académico. A parceria entre a instituição de ensino e a entidade acolhedora foi uma mais-valia. Compreender e estar no dia o dia-a-dia em ambiente empresarial em contactos com outras entidades foi uma experiência que se revelará determinante no futuro. Observar como funcionam as instalações e os processos no terreno, a constante avaliação das infraestruturas e a ligação obra/projeto foi bastante enriquecedora e produtiva.

7.2 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

O autor sugere o desenvolvimento em "*Matlab"* da modelação de outros dispositivos de proteção ao choque hidráulico, tais como o RUD e RHAAA. Seria vantajoso para proveito académico a continuação da modelação dos dispositivos de proteção, uma vez que maior parte dos estudos incidem no RAC, e com o aparecimento de novas soluções como o caso RHAAA seria interessante explorar e melhorar o conteúdo existente.

Outra recomendação que seria interessante para entidade acolhedora consiste em continuar a explorar a utilização do RHAAA em outras estações elevatórias, de maneira a que os sistemas elevatórios de águas residuais sejam cada vez mais infraestruturas rentáveis e menos dispendiosas. É de grande interesse para a empresa confrontar os resultados da utilização do RHAAA com dispositivos utilizados nos seus sistemas (RAC e RUD) e fazer uma análise crítica dos mesmos.

Um tema que também pode ser bastante útil para a entidade acolhedora, num futuro estágio curricular, seria o estudo da quantificação das necessidades em termos de compressor de ar, nos sistemas que tem Reservatórios de Ar Comprimido como dispositivo de proteção/minimização do choque hidráulico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Águas do Norte, S.A. (2016). Sítio da Internet das Águas do Norte. Obtido a 23 de Fevereiro de 2016, de http://www.adnorte.pt

Águas do Norte, S.A. (2015). Contrato de Concessão.

Almeida, A. B. (1982). *Manual de Protecção Contra o Golpe de Aríete em Condutas Elevatórias*. LNEC. Lisboa

Almeida, M., & Cardoso, M. (2010). *Gestão patrimonial de infra-estruturas de águas residuais e pluviais. Uma abordagem centrada na reabilitação* (ERSAR). Lisboa.

Azevedo, D., Trigo, E., & Pereira, G. (2015). *Dimensionamento Hidráulico de um Sistema Elevatório de Água Residual Doméstica*. Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto.

Charlatte Réservoirs (2015). Sítio da Internet da Charlatte. Obtido a 18 de Maio de 2016, de http://www.charlattereservoirs.fayat.com/fr/gamme-eaux-usees

Costa, H. (2011). *Modelação do Funcionamento de um RAC - Reservatório de Ar Comprimido*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.

Diário da República. (1995). *Regulamento Geral dos Sistemas Públicos e Prediais de Distribuição de Água e de Drenagem de Águas Residuais*. Lisboa.

Fernandes, M. (2008). *Modelação Hidráulica da Exploração de um Sistema Elevatório de Águas Residuais*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.

Grilo, T. (2007). *Técnicas de Reabilitação de Sistemas de Abastecimento de Água*. Instituto Superior Técnico, Lisboa.

Isabel, J. (2015). *Avaliação do Comportamento Dinâmico de uma Chaminé de Equilíbrio*. Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.

Lopes, R. (2016). *Análise do Fenómeno de Choque Hidráulico numa Estação Elevatória de Águas Residuais- - Modelação e Análise de Funcionamento*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.

Marques, J., & Sousa, J. (2011). *Hidráulica Urbana - Sistemas de Abastecimento de Água e de Drenagem de Águas Residuais* (3ª ed.). Imprensa da Universidade de Coimbra, Coimbra.

Martins, J. (2009). *Comportamento Dinâmico de Sistemas Elevatórios*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.

Mendes, L. (2011). *Métodos Clássicos de Protecção de Sistemas Elevatórios Contra o Golpe de Aríete*. Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.

Novais-Barbosa, J. (1985). *Mecânica dos Fluídos e Hidráulica Geral* (Vol. 1). Porto Editora.

Pacheco Figueiredo, M.M. (2015). *CH Elevatoria - Conteúdos da Unidade Curricular de Sistemas de Abastecimento de Água*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.

Pereira, A. (2010). *Eficiência Hidrodinâmica e Optimização no Projecto de Aproveitamentos Hidroeléctricos*. Instituto Superior Técnico, Lisboa.

Pestana, A. (2016). *Choque Hidráulico - O Modelo Matemático*. Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto.

Silva, P. (2014). *Modelação Numérica do Choque Hidráulico*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.

SimDouro. (2015). *Nota Técnica – Projeto de Alteração do Sistema de Proteção ao Choque Hidráulico das Estações Elevatórias de Gaia Litoral*.

Valente, J. (2008). *Modelação Hidráulica do Comportamento de uma Fuga de Água - Mecanismos para a sua deteção no caso de uma conduta elevatória*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.

Viegas, T. (2007). *Contribuição Para a Otimização da Operação de Sistemas de Drenagem de Águas Residuais*. Instituto Superior Técnico, Lisboa.

Vivas, E. (2015). *Elementos de Apoio à disciplina de HIDAP*. Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto.

Wylie, E. B., & Streeter, V. L. (1978). *Fluid Transients* (3.ª ed.). McGraw-Hill International Book Company.

ANEXOS

ANEXO I – PLANTA DA ESTAÇÃO ELEVATÓRIA DE CANELAS

ANEXO II – FICHA TÉCNICA DO GRUPO ELETROBOMBA

ANEXO III – FOLHA INICIAL *"INPUT"*

ANEXO IV – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO: FOLHA *"OUTPUT"*

ANEXO V – CÓDIGO DA ROTINA EM "*MATLAB*" DA MODELAÇÃO DA CHAMINÉ DE EQUILÍBRIO

ANEXO VI – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO COM CHAMINÉ DE EQUILÍBRIO: FOLHA *"OUTPUT"*

ANEXO I

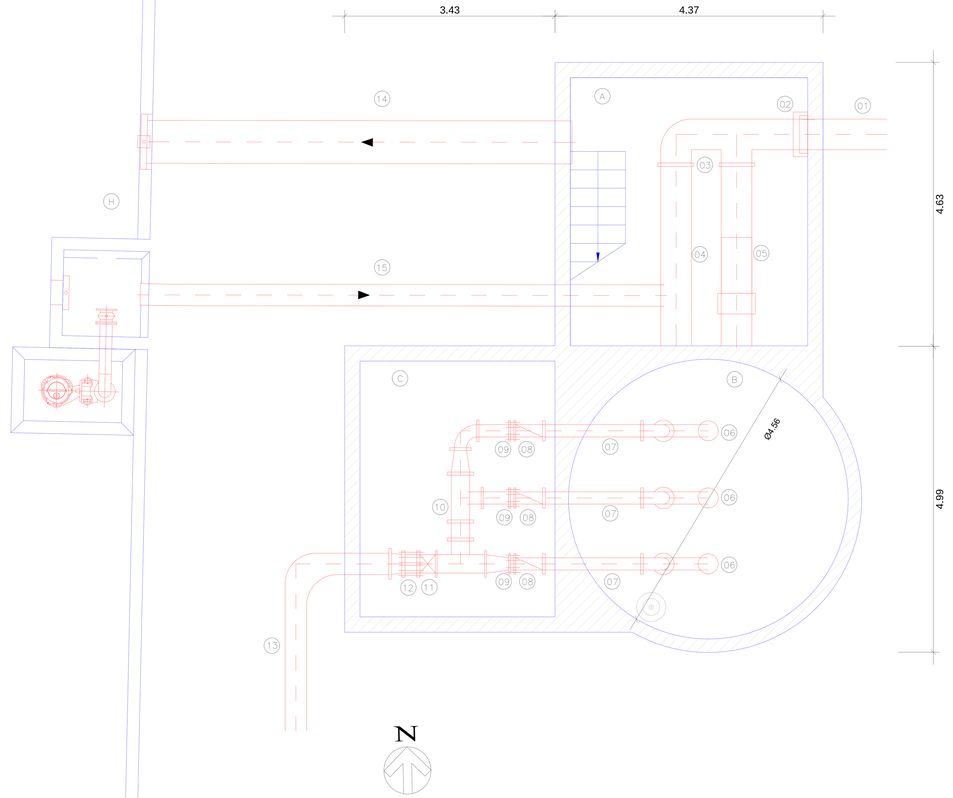
PLANTA DA ESTAÇÃO ELEVATÓRIA DE CANELAS

Planta do Piso Enterrado

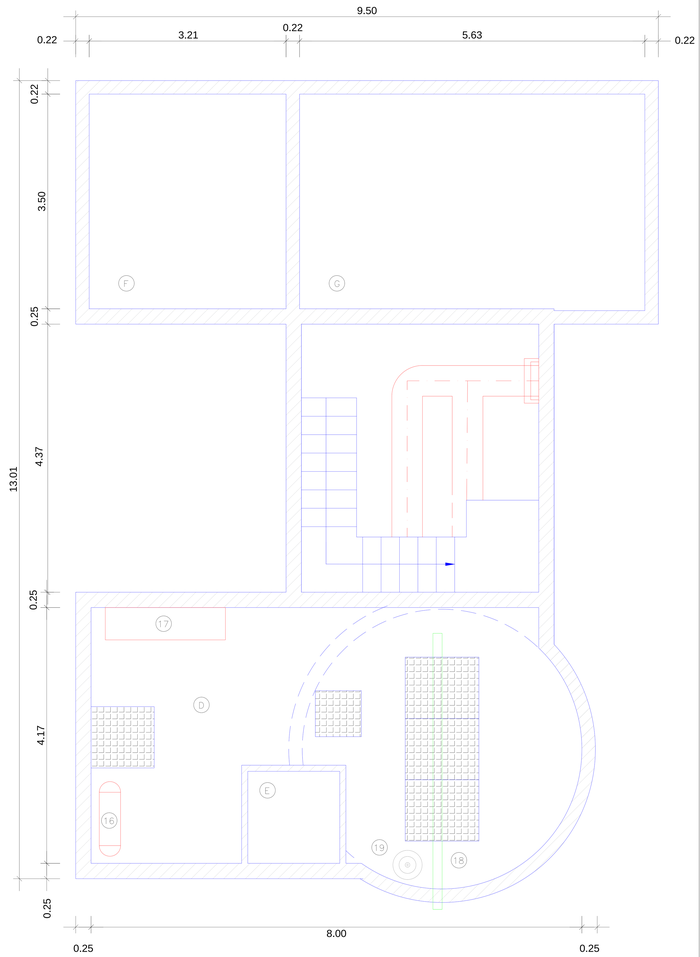
Identificação de órgãos, equipamentos, tubagens e acessórios

A - Obra de entrada
B - Poço de bombagem (Diâmetro=4.56m; H=5.76m;Hútil=1.56m)
C - Câmara de manobras
D - Área de acesso ao poço e câmara de manobras
E - Instalações sanitárias
F - Sala do Gerador de Emergência
G - Sala de Posto de Transformação de outra entidade (EDP)
H - Tanque de retenção

01 - Tubagem de chegada FFd DN500
02 - Válvula mural de acionamento pneumatico DN500
03 - Comporta manual
04 - Grade manual
05 - Grade mecanica
06 - Grupo eletrobomba
07 - Tubagem de compressão individual FFd DN200
08 - Válvula de retenção com batente DN200
09 - Válvula de borboleta com acionamento pneumatico DN200
10 - Tubagem de compressão coletiva FFd DN300
11 - Válvula de cunha manual DN300
12 - Junta de desmontagem DN300
13 - Conduta elevatória FFd DN350
14 - Tubagem de ligação ao tanque de retenção FFD DN700
15 - Descarga do tanque de retenção FFD DN350
16 - Unidade de Ar comprimido
17 - Quadro elétrico
18 - Diferencial de elevação 1000 Kg
19 - Tubo de ventilação com ventilador axial



Planta do Piso Térreo



Equipamentos a alimentar

N.º	Equipamento	Marca/Modelo	Quant.	Pot. Individual (kW)	Pot. conjunto (kW)	Observações
F	Gerador de Emergência	Atlas Copco QAS78	1	69kVA		Gasóleo
05	Grade Mecanica	Andritz MNCI	1	0.5	0.5	-
07	Bomba	Fagiolatti	2+1	17	34	-
17	Unidade de Ar comprimido	Atlas Copco	1	5.5	5.5	475l
20	Ventilador axial	-	1	0.5	0.5	-
21	Diferencial - Poço	Marcovil	1	1.0	1.0	1000kg
01	Válvula Mural	-	1	-	-	pneumática
09	Válvula de seccionamento	-	2+1	-	-	pneumática

Eq. accionamento elétrico

INTERVENÇÃO
REABILITAÇÃO DAS ESTAÇÕES ELEVATÓRIAS DE VILA NOVA DE GAIA

DESIGNAÇÃO DA INSTALAÇÃO
ESTAÇÃO ELEVATÓRIA DE CANELAS

ESCALAS
1:100

N° DE ORDEM
DES06

ANEXO II

FICHA TÉCNICA DO GRUPO ELETROBOMBA

FAGGIOLATI PUMPS® S.p.A.

CURVA CARATTERISTICA
PERFORMANCE CURVE

Serie	Tipo di pompa - *Pump type*
7D	**G413R6V2-P80AA2**

Cod. *Code*	Peso totale *Total weight*	Materiale *Construction*	Girante *Impeller*
7001145	**205** Kg	**GHISA EN-GJL-250** ***CAST IRON EN-GJL-250***	**VORTEX** ***VORTEX***

Idraulica - *Hydraulic*

MANDATA *DISCHARGE*	**DN 100** mm
ASPIRAZIONE *SUCTION*	**DN 125** mm
PASSAGGIO LIBERO *FREE PASSAGE*	**80** mm
DIAMETRO GIRANTE *IMPELLER DIAMETER*	**235** mm

Rend. max - *Best efficiency*

RENDIMENTO TOTALE *TOTAL EFFICIENCY*	**45,9** %
RENDIMENTO IDRAULICO *HYDRAULIC EFFICIENCY*	**49,8** %
POT. ASS. DALLA RETE *ABS. POWER FROM MAINS*	**9,3** kW
PREVALENZA *HEAD*	**13,1** m
PORTATA *CAPACITY*	**119,6** m^3/h

Motore- *Motor* M413T-12,9-400/50YY-IE3

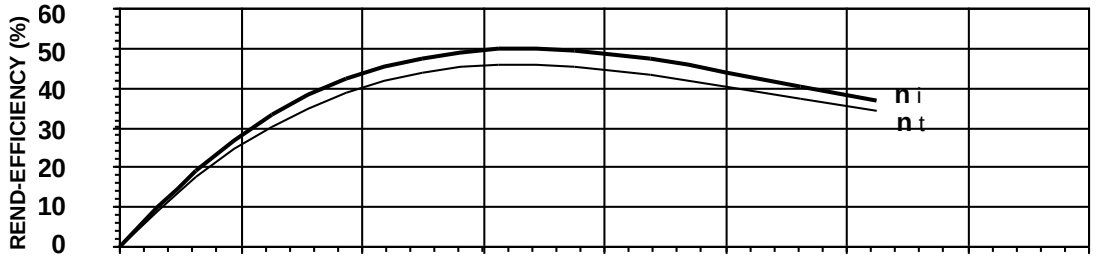
ALIMENTAZIONE *POWER SUPPLY*	**3ph 400/690V-50Hz**		
CLASSE DI ISOLAMENTO *INSULATION CLASS*	**H**		
VELOCITÀ NOMINALE *NOMINAL SPEED*	**1436** rpm		
POTENZA NOMINALE MOTORE *RATED MOTOR POWER*	**12,9** kW		
CORRENTE DI SPUNTO *STARTING CURRENT*	**142,2** A		
CORRENTE NOMINALE *RATED CURRENT*	**24,1** A		
MOMENTO DI INERZIA TOTALE *TOTAL MOMENT OF INERTIA*	**0,1488** kgm2		
	CARICO-LOADING 4/4	3/4	1/2
FATTORE DI POTENZA *POWER FACTOR*	**0,84**	**0,77**	**0,66**
RENDIMENTO MOTORE *MOTOR EFFICIENCY*	**92** %	**91** %	**90** %

Impiego - *Application*

TEMP. MAX DEL LIQUID *PUMPED LIQUID MAX TEMP.*	**< 40** °C
PROTEZIONE MECCANICA *MECHANICAL PROT. DEGREE*	**IP 68**
CAVO *CABLE*	**12G2,5 H07RNF**
CODICE DISEGNO *DRAWING CODE*	**713_100_13_1**
CURVA *CURVE*	**V713-445**

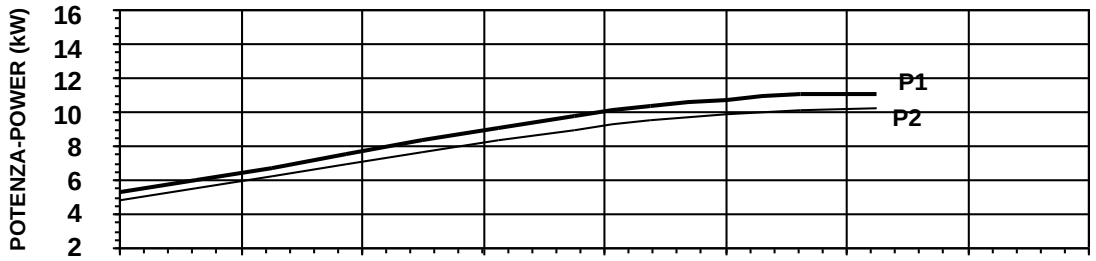
Protezioni - *Protections*

PROTEZIONE TERMICA *THERMAL PROTECTION*	YES
CONTROLLO INFILTRAZIONE *HUMIDITY PROBE*	YES
Ex d IIB T4	NO
MANTELLO DI RAFFREDDAMENTO *COOLING JACKET*	NO



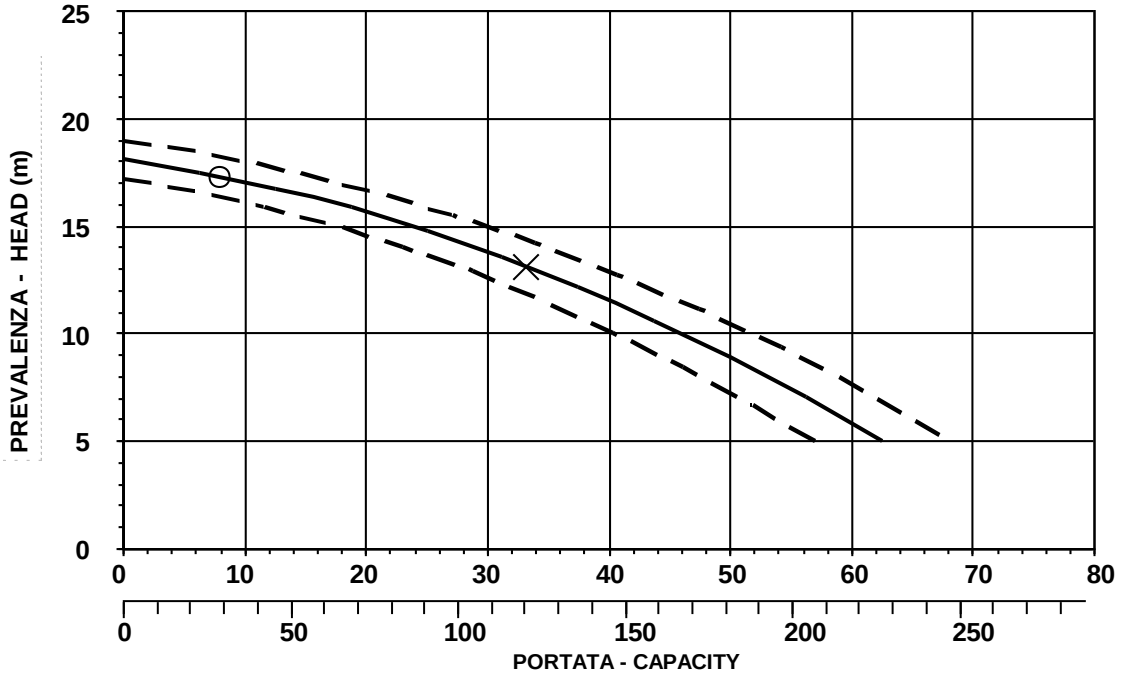
η i = Rendimento idraulico *Hydraulic efficiency*

η t = Rendimento totale *Total efficiency*



P1 = Potenza ass. dalla rete *Abs. power from mains*

P2 = Potenza idraulica *Hydraulic power*



O = Portata minima *Minimum capacity*

X = Punto max rendimento *Best efficiency point*

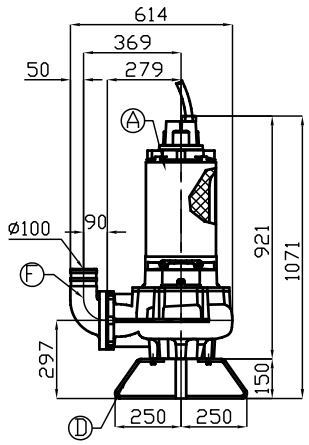
PREMIUM EFFICIENCY IE3 MOTOR

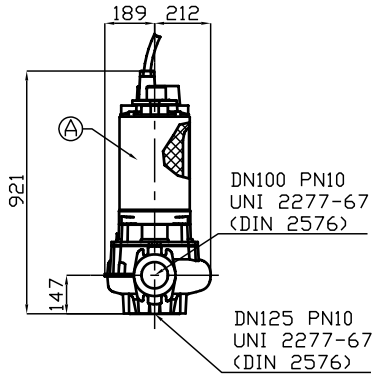
CURVA CARATTERISTICA SECONDO NORMA *PERFORMANCE CURVES IN ACCORDANCE TO* **UNI EN ISO 9906**	PRESTAZIONI IN ACQUA PULITA RIFERITE ALLA TEMP. DI 40°C *PERFORMANCE WITH CLEAR WATER AND RATING DATA AT 40°C*

FAGGIOLATI PUMPS® S.p.A.

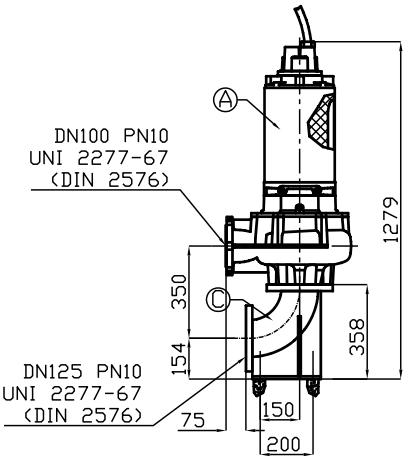
INGOMBRI
DIMENSIONS

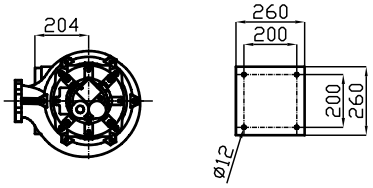
Codice disegno - Drawing code
713_100_13_1





P

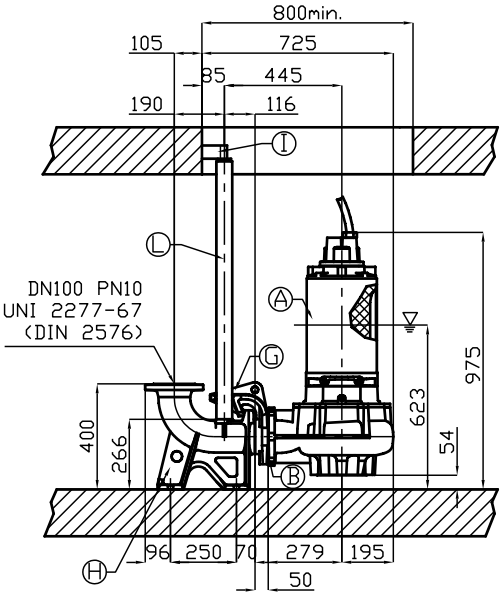


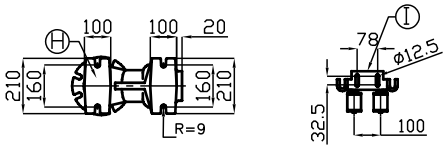


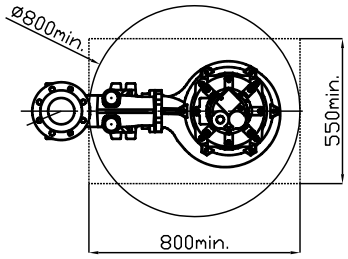
▽ LIVELLO MINIMO DI SOMMERGIBILITÁ STANDARD.
▽ PER VERSIONE ATEX, COMPLETAMENTE SOMMERSA.

▽ MINIMUM SUBMERSIBLE LEVEL STANDARD.
▽ FOR ATEX TYPE, COMPLETELY SUBMERGED.

E







R

Pos. *Pos.*	*Codice* *Code*	*Descrizione* *Description*	*Materiale* *Material*	*Peso Kg* *Weight Kg*
A	-	Elettropompa Sommergibile Submersible Pump		-
B	54.11015	Guarnizione DN100 Rubber joint DN100	Neoprene Neoprene	-
Type: **E**				
C	ECDN125	Curva aspirazione 90° Suction elbow 90°	Acciaio zincato Galvanized Steel	27
Type: **P**				
D	PAPDN125NP07	Tripiede appoggio X foot rest	Acciaio zincato Galvanized Steel	5
F	GCDN100/L	Curva di mandata 90° DN100 Delivery elbow 90° DN100	G250 Ghisa G250 Cast-Iron	10
Type: **R**		**GPADN100/L**		
G	GADT100-150	Controflangia accoppiamento 2 guide DN100 Double guide rail coupling flange DN100	G250 Ghisa G250 Cast-Iron	12
H	GBPACDN100	Piede d'accoppiamento 2 guide DN100 Double guide coupling feet DN100	G250 Ghisa G250 Cast-Iron	35
I	SOP2T	Sopporto tubi superiore 2 guide 2" Double guide rail upper support 2"	Acciaio zincato Galvanized Steel	1,9
L	TG2Z	Tubo guida 2" Guide rail 2"	Acciaio zincato Galvanized Steel	4,5

ANEXO III

FOLHA INICIAL "INPUT"

Comprimento (m), Diametro (mm), Rugosidade (mm)
(inserir valor) (inserir valor) (inserir valor)
#
Perfil da conduta
Número de pontos
5
X(m), Z(m)
(inserir valor) (inserir valor)
(inserir valor) (inserir valor)
(inserir valor) (inserir valor)
(inserir valor) (inserir valor)
(inserir valor) (inserir valor)
#
Definicao do desnivel geometrico
Hmontante (m), Hjusante (m)
(inserir valor) (inserir valor)
#
Perdas de carga localizadas na conduta
Factor de majoracao da perda de carga continua (usar 1.0 para não majorar)
(inserir valor)
Coeficiente de perdas de carga localizadas (usar 0.0 para não considerar)
(inserir valor)
Coeficiente de perda de carga localizada no reservatorio de jusante (usar 0.0 para não considerar)
(inserir valor)
#
Viscosidade cinematica (m^2/s)
(inserir valor)
#
Curva Característica do Grupo Elevatório (Hb = AN^2+BNQ+CQ^2; Hb:m; Q:m3/s)
No (rpm), A, B, C
(inserir valor) (inserir valor) (inserir valor) (inserir valor)
#
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
(inserir valor) (inserir valor) (inserir valor) (inserir valor)
#
Inercia do grupo elevatorio
PD^2 (Nm^2)
(inserir valor)
#
Celeridade (m/s)
(inserir valor)
#
Número de trechos da conduta (numero de "delta x")
(inserir valor)
#
Reservatorio de Ar Comprimido (RAC)
Diametro do RAC (m); se Drac=0, não há RAC.
(inserir valor)
Zrac_0 (m), Zrac_max (m), Zrac_min (m)
(inserir valor) (inserir valor) (inserir valor)
Alfa (expoente da lei de estado do ar no RAC)
(inserir valor)
D_lig (mm), D_tub (mm)
(inserir valor) (inserir valor)
Comprimento do tubo de ligação (m), Rugosidade no tubo de ligação (mm)
(inserir valor) (inserir valor)

Coef. de perda de carga localizada no tubo de ligação (não considerar aqui a tubeira)
(inserir valor)
Seccao com RAC (maior que 1 e menor que numero de "delta x" + 1; se igual a 0 não há RAC)
(inserir valor)
#
Fuga localizada de agua
Q_fuga inicial (m^3/s); se Q_fuga_in=0, não há fuga.
(inserir valor)
Beta (expoente da lei de vazão da fuga; geralmente adopta-se 0.5)
(inserir valor)
Seccao com fuga (maior que 1 e menor que numero de "delta x" + 1; se igual a 0 não há fuga)
(inserir valor)
#
Tempo de simulação (número de fases)
(inserir valor)
#

ANEXO IV

RESULTADOS DA SIMULAÇÃO: FOLHA "OUTPUT"

Comprimento da conduta: 841 m

Diâmetro da conduta: 350 mm

Rugosidade da conduta: 0.15 mm

Perfil longitudinal da conduta (número de pontos: 5)

X(m)	Z(m)
0.0	0.55
0.1	3.60
31.0	2.60
637.0	5.50
841.0	6.61

Definição do desnível geométrico

Hmontante: 0.55 m
Hjusante: 6.61 m

Majoração da perda de carga contínua

Factor de majoração: 1.20

Perdas de carga localizadas (diâmetro constante)

Coeficiente (K_loc): 0.00
Coeficiente (K_loc_jus): 0.00

Viscosidade cinemática: 1.31e-06 m^2/s

Curva característica do(s) grupo(s) elevatório(s)
(Hb = AN^2+BNQ+CQ^2; Hb:m; Q:m3/s)

No: 1436.0 rpm
A : +8.89000e-06
B : -3.28000e-02
C : -4.54550e+02

Curva de rendimento do(s) grupo(s) para No
(rend(%) = aa*Q^3+bb*Q^2+cc*Q+dd; Q:m3/s)

aa: +7.17170e+04
bb: -2.16310e+04
cc: +1.90680e+03
dd: -2.17270e+00

Inércia do(s) grupo(s) elevatório(s)

PD2: 12.00 N.m^2

Outros dados para o estudo do Choque Hidráulico

Celeridade: 1149 m/s

Divisão da conduta para o Método das Características (MdC): 40 trechos

Perfil longitudinal das secções do MdC (número de secções: 41)

X(m)	Z(m)
0.0	0.6
21.0	2.9
42.0	2.6
63.1	2.7
84.1	2.8
105.1	2.9
126.1	3.0
147.2	3.1
168.2	3.2
189.2	3.3
210.3	3.5
231.3	3.6
252.3	3.7
273.3	3.8
294.3	3.9
315.4	4.0
336.4	4.1
357.4	4.2
378.4	4.3
399.5	4.4
420.5	4.5
441.5	4.6
462.5	4.7
483.6	4.8
504.6	4.9
525.6	5.0
546.6	5.1
567.7	5.2
588.7	5.3
609.7	5.4
630.8	5.5
651.8	5.6
672.8	5.7
693.8	5.8
714.8	5.9
735.9	6.0
756.9	6.2
777.9	6.3
798.9	6.4
820.0	6.5
841.0	6.6

Tempo de simulação do Choque Hidráulico

Número de fases: 16

Ponto de funcionamento da instalação elevatória

Caudal elevado: 100.899 l/s

Altura manométrica do(s) grupo(s) elevatório(s) (p/ CCB): 8.952 m

Velocidade (média) na conduta: 1.049 m/s

Perda de carga unitária na conduta: 2.866 m/km

Choque Hidráulico - Resultados

Envolventes da Carga Hidráulica e de Pressão

X(m)	Z(m)	Ho(m)	Hmáx(m)	Hmin(m)	Pmáx(m)	Pmin(m)
0.0	0.6	9.502	12.263	0.539	11.713	0.011
21.0	2.9	9.430	11.844	0.480	8.928	-2.436
42.0	2.6	9.357	11.241	0.413	8.598	-2.231
63.1	2.7	9.285	10.744	0.345	8.000	-2.399
84.1	2.8	9.213	10.337	0.278	7.492	-2.567
105.1	2.9	9.140	10.003	0.210	7.057	-2.736
126.1	3.0	9.068	9.986	0.143	6.939	-2.904
147.2	3.1	8.996	10.010	0.075	6.862	-3.073
168.2	3.2	8.924	10.032	0.008	6.783	-3.241
189.2	3.3	8.851	10.054	-0.060	6.704	-3.409
210.3	3.5	8.779	10.074	-0.127	6.623	-3.578
231.3	3.6	8.707	10.094	-0.194	6.542	-3.746
252.3	3.7	8.634	10.112	-0.262	6.459	-3.914
273.3	3.8	8.562	10.129	-0.329	6.375	-4.082
294.3	3.9	8.490	10.144	-0.396	6.289	-4.250
315.4	4.0	8.417	10.158	-0.463	6.202	-4.418
336.4	4.1	8.345	10.169	-0.529	6.112	-4.586
357.4	4.2	8.273	10.178	-0.596	6.021	-4.753
378.4	4.3	8.201	10.185	-0.662	5.926	-4.920
399.5	4.4	8.128	10.188	-0.727	5.829	-5.087
420.5	4.5	8.056	10.188	-0.792	5.728	-5.252
441.5	4.6	7.984	10.184	-0.855	5.623	-5.417
462.5	4.7	7.911	10.175	-0.917	5.513	-5.580
483.6	4.8	7.839	10.161	-0.977	5.398	-5.741
504.6	4.9	7.767	10.141	-1.034	5.277	-5.899
525.6	5.0	7.694	10.113	-1.088	5.148	-6.053
546.6	5.1	7.622	10.076	-1.135	5.010	-6.202
567.7	5.2	7.550	10.029	-1.176	4.862	-6.343
588.7	5.3	7.478	9.970	-1.205	4.702	-6.473
609.7	5.4	7.405	9.896	-1.220	4.527	-6.589
630.8	5.5	7.333	9.805	-1.213	4.335	-6.683
651.8	5.6	7.261	9.693	-1.176	4.113	-6.757
672.8	5.7	7.188	9.556	-1.095	3.862	-6.790
693.8	5.8	7.116	9.390	-0.950	3.581	-6.759
714.8	5.9	7.044	9.187	-0.710	3.263	-6.633
735.9	6.0	6.971	8.940	-0.330	2.902	-6.368
756.9	6.2	6.899	8.933	0.251	2.781	-5.901
777.9	6.3	6.827	8.958	1.117	2.692	-5.149
798.9	6.4	6.755	8.483	2.371	2.101	-4.010
820.0	6.5	6.682	7.595	4.143	1.099	-2.352
841.0	6.6	6.610	6.610	6.610	0.000	0.000

ANEXO V

CÓDIGO DA ROTINA EM "*MATLAB*" DA MODELAÇÃO DA CHAMINÉ DE EQUILÍBRIO

```
function [qpm_f,qpj_f,hp_f,qc_f,zc_f] = ...
    mc_cham(cel,d,dx,visccin,f_maj, ...
    qa,ha,qb,hb,qpm_i,qpj_i, ...
    qc_i,zc_i, ...
    dcham,dlig,k_lig, ...
    zc_min, ...
    control_r)
% """"""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""
% Função (function) para o cálculo dos valores do caudal e da carga
% hidráulica (Qm_f,Qj_f,Hp) numa secção do MdC no interior da conduta ("ponto
% interior") com Chaminé de Equilíbrio.
% """"""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""
% Incógnitas [5]:
%
%      Hp_f;
%      Qc_f; Qpm_f; Qpj_f;
%      Zc_f;
%
% ++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++
% Identificação das VARIÁVEIS utilizadas:
%

% aa ..................... Variável com o valor de A (ver fórmula em
%                          'mc_p_interior.m').

% ca ..................... Variável com o valor de Ca (ver fórmula em
%                          'mc_p_interior.m').

% cb ..................... Variável com o valor de Cb (ver fórmula em
%                          'mc_p_interior.m').

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

% control_r ............... Parâmetro que define o modo de calcular o
%                          valor de R: control_r = 0 >> escoamento
%                          turbulento rugoso ("lambda" constante);
%                          control_r = 1 >> caso geral ("lambda" função
%                          do caudal).

% d ...................... Diâmetro (interior) da conduta (m).

% dcham .................. Diâmetro (interior) da Chaminé de Equilíbrio.

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

% dx ..................... Comprimento (m) do trecho de conduta entre
%                          duas secções do MdC (delta_x);

% f_maj .................. Variável com o factor de majoração da perda de
%                          carga contínua.

% ha ..................... Carga hidráulica na secção imediatamente a
%                          montante e no instante imediatamente anterior
%                          (Ha).

% hb ..................... Carga hidráulica na secção imediatamente a
%                          jusante e no instante imediatamente anterior
%                          (Hb).

% hp_f ................... Carga hidráulica (Hp) na secção em análise, no
%                          instante final do incremento temporal (ie,
%                          t+dt).
```

```
% k ....................... Variável com o valor da rugosidade (m) na
%                           conduta principal.

% lambda .................. Variável com o valor do factor de resistência.

% lambda_a ................ Variável com o valor do factor de resistência
%                           calculado para Qa.

% lambda_b ................ Variável com o valor do factor de resistência
%                           calculado para Qb.

% lambda_j ................ Variável com o valor do factor de resistência
%                           calculado para Qp,j.

% lambda_m ................ Variável com o valor do factor de resistência
%                           calculado para Qp,m.

% qa ...................... Caudal na secção imediatamente a montante e no
%                           instante imediatamente anterior (Qa).

% qb ...................... Caudal na secção imediatamente a jusante e no
%                           instante imediatamente anterior (Qb).

% qpj_f ..................... Caudal (Qp,j) na secção em análise, no
%                           instante final do incremento temporal (ie,
%                           t+dt). Considerar este valor o caudal no nó do
%                           RAC na matriz QQ que regista o valor do caudal
%                           nas secções do MdC, nos diversos instantes de
%                           simulação.

% qpj_i ..................... Caudal (Qp,j) na secção em análise, no
%                           instante inicial do incremento temporal
%                           (ie, t). Considerar este valor o caudal no nó
%                           da CH na matriz QQ que regista o valor do
%                           caudal nas secções do MdC, nos diversos
%                           instantes de simulação.

% qpm_f ..................... Caudal (Qp,m) na secção em análise, no
%                           instante final do incremento temporal (ie,
%                           t+dt).

% qpm_i ..................... Caudal (Qp,m) na secção em análise, no
%                           instante inicial do incremento temporal
%                           (ie, t).

% qc_f ................... Caudal que sai da Chaminé no instante final do
%                           incremento da integração em ordem ao tempo
%                           ("delta_t")(ie, t+dt).

% qc_i ................... Caudal que sai da Chaminé no instante inicial do
%                           incremento da integração em ordem ao tempo
%                           ("delta_t")(ie, t).

% ra ...................... Variável com o valor de Ra (ver fórmula em
%                           'mc_p_interior.m').

% rb ...................... Variável com o valor de Rb (ver fórmula em
%                           'mc_p_interior.m').

% s ....................... Área da secção (interior) da conduta
%                           principal.

% s_lig ................... Área da secção (interior) da conduta de
%                           ligação da Chaminé à conduta principal principal.
```

```
% visc_cin .................. Variável com o valor da viscosidade cinemática
%                            da água (m2/s).

% x ......................... Variável auxiliar para o cálculo de "lambda".

% zc_i ...................  Carga hidráulica na secção em análise, no
%                            instante inicial do incremento temporal
%                            (ie, t).

% zc_min .................. Cota do fundo da Chaminé; nível mínimo da água
%                            no interior da CH.

% zc_f ..................... Cota da superfície livre da água no interior
%                            da Chaminé (zc_min <= zc ) no instante
%                            final do incremento da integração em ordem ao
%                            tempo ("delta_t").
%
% FIM da identificação das VARIÁVEIS utilizadas
%
% Iniciar variáveis necessárias

s = pi*d^2/4;               % Cálculo da área da secção da conduta
                            % principal.

s_lig = pi*dlig^2/4;        % Cálculo da área da conduta de ligação da
                            % CH à conduta principal.

aa = 4*cel/9.81/pi/d^2;     % Cálculo de A (ver fórmula).

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

% Calcular "lambda" para a hipótese do escoamento turbulento rugoso
% (control_r = 0); fazê-lo aqui economiza esforço de cálculo nos
% procedimentos iterativos para o cálculo de Qp.

x = -2*log10(k_lig/3.7/d);
lambda = 1/x^2;         % Lambda da conduta principal.

x = -2*log10(k_lig/3.7/dlig);
lambda_lig_0 = 1/x^2;     % Lambda da conduta principal.

% Fim de "iniciar variáveis"
% .....................................................................

% Início dos cálculos preparatórios

% Cálculo de Ra e Rb

if ( control_r == 0 )

    % Cálculo de Ra e Rb para um escoamento turbulento rugoso.

    ra = f_maj*lambda*dx/2/9.81/d/s^2;
    rb = ra;

elseif ( control_r == 1 )

    % Cálculo do valor de Ra e Rb para os caudais Qa e Qb.

    [lambda_a,iter] = lambda_cw(k_lig,visccin,d,abs(qa));
    ra = f_maj*lambda_a*dx/2/9.81/d/s^2;

    [lambda_b,iter] = lambda_cw(k_lig,visccin,d,abs(qb));
    rb = f_maj*lambda_b*dx/2/9.81/d/s^2;
```

```
else

   error('Erro: "control_r" mal definido na chamada de "mc_cham"!!');

end

% Cálculo de Ca e Cb

ca = ha + aa*qa - ra*abs(qa)*qa;

cb = hb - aa*qb + rb*abs(qb)*qb;

W = [1 0 aa 0 0;1 0 0 -aa 0;0 0 -1 1 -1;1 0 0 0 ((dltt/(2*(pi*dcham^2)/4)));...
    1 -1 0 0 0];

M = [ca;cb;0;(zc_i-(dltt/(2*((pi*dcham^2)/4)))*qc_i);0];

y = W\M;

zc_f = y(1,1)
hp_f = y(2,1)
qpm_f = y(3,1)
qpj_f = y(4,1)
qc_f = y(5,1)

    if zc_f < zc_min
        error('Erro: Secção da chaminé insuficiente !!');
    end

end
```

```
Error using mc_cham (line 151)
Not enough input arguments.
```

Published with MATLAB® R2013a

ANEXO VI

RESULTADOS DA SIMULAÇÃO COM CHAMINÉ DE EQUILÍBRIO: FOLHA "OUTPUT"

Comprimento da conduta: 841 m

Diâmetro da conduta: 350 mm

Rugosidade da conduta: 0.15 mm

Perfil longitudinal da conduta (número de pontos: 5)

X(m)	Z(m)
0.0	0.55
0.1	3.60
31.0	2.60
637.0	5.50
841.0	6.61

Definição do desnível geométrico

Hmontante: 0.55 m
Hjusante: 6.61 m

Majoração da perda de carga contínua

Factor de majoração: 1.20

Perdas de carga localizadas (diâmetro constante)

Coeficiente (K_loc): 0.00
Coeficiente (K_loc_jus): 0.00

Viscosidade cinemática: 1.31e-06 m^2/s

Curva característica do(s) grupo(s) elevatório(s)
(Hb = AN^2+BNQ+CQ^2; Hb:m; Q:m3/s)

No: 1436.0 rpm
A : +8.89000e-06
B : -3.28000e-02
C : -4.54550e+02

Curva de rendimento do(s) grupo(s) para No
(rend(%) = aa*Q^3+bb*Q^2+cc*Q+dd; Q:m3/s)

aa: +7.17170e+04
bb: -2.16310e+04
cc: +1.90680e+03
dd: -2.17270e+00

Inércia do(s) grupo(s) elevatório(s)

PD2: 12.00 N.m^2

Outros dados para o estudo do Choque Hidráulico

Celeridade: 1149 m/s

Divisão da conduta para o Método das Características (MdC): 40 trechos

Perfil longitudinal das secções do MdC (número de secções: 41)

X(m)	Z(m)
0.0	0.6
21.0	2.9
42.0	2.6
63.1	2.7
84.1	2.8
105.1	2.9
126.1	3.0
147.2	3.1
168.2	3.2
189.2	3.3
210.3	3.5
231.3	3.6
252.3	3.7
273.3	3.8
294.3	3.9
315.4	4.0
336.4	4.1
357.4	4.2
378.4	4.3
399.5	4.4
420.5	4.5
441.5	4.6
462.5	4.7
483.6	4.8
504.6	4.9
525.6	5.0
546.6	5.1
567.7	5.2
588.7	5.3
609.7	5.4
630.8	5.5
651.8	5.6
672.8	5.7
693.8	5.8
714.8	5.9
735.9	6.0
756.9	6.2
777.9	6.3
798.9	6.4
820.0	6.5
841.0	6.6

Chaminé de Equilíbrio

Diâmetro da Chaminé de Equilíbrio: 1.0 m

Cota do nível mínimo na CH: 3.40 m

Secção do MdC com CH: 2

Tempo de simulação do Choque Hidráulico

Número de fases: 200

Ponto de funcionamento da instalação elevatória

Caudal elevado: 100.899 l/s

Altura manométrica do(s) grupo(s) elevatório(s) (p/ CCB): 8.952 m

Velocidade (média) na conduta: 1.049 m/s

Perda de carga unitária na conduta: 2.866 m/km

Choque Hidráulico - Resultados

Envolventes da Carga Hidráulica e de Pressão

X(m)	Z(m)	Ho(m)	Hmáx(m)	Hmin(m)	Pmáx(m)	Pmin(m)
0.0	0.6	9.502	14.404	0.550	13.854	0.000
21.0	2.9	9.430	9.430	3.689	6.514	0.773
42.0	2.6	9.357	9.357	3.762	6.714	1.119
63.1	2.7	9.285	9.285	3.836	6.541	1.092
84.1	2.8	9.213	9.213	3.909	6.368	1.064
105.1	2.9	9.140	9.140	3.983	6.195	1.037
126.1	3.0	9.068	9.068	4.057	6.021	1.010
147.2	3.1	8.996	8.996	4.130	5.848	0.982
168.2	3.2	8.924	8.924	4.204	5.675	0.955
189.2	3.3	8.851	8.851	4.278	5.501	0.928
210.3	3.5	8.779	8.779	4.352	5.328	0.901
231.3	3.6	8.707	8.707	4.426	5.155	0.875
252.3	3.7	8.634	8.634	4.501	4.982	0.848
273.3	3.8	8.562	8.562	4.575	4.808	0.821
294.3	3.9	8.490	8.490	4.649	4.635	0.795
315.4	4.0	8.417	8.417	4.724	4.462	0.769
336.4	4.1	8.345	8.345	4.799	4.289	0.742
357.4	4.2	8.273	8.273	4.874	4.115	0.716
378.4	4.3	8.201	8.201	4.949	3.942	0.690
399.5	4.4	8.128	8.128	5.024	3.769	0.664
420.5	4.5	8.056	8.056	5.099	3.596	0.638
441.5	4.6	7.984	7.984	5.174	3.422	0.613
462.5	4.7	7.911	7.911	5.249	3.249	0.587
483.6	4.8	7.839	7.839	5.325	3.076	0.562
504.6	4.9	7.767	7.767	5.400	2.903	0.536
525.6	5.0	7.694	7.694	5.476	2.729	0.511
546.6	5.1	7.622	7.622	5.552	2.556	0.486
567.7	5.2	7.550	7.550	5.628	2.383	0.461
588.7	5.3	7.478	7.478	5.704	2.210	0.436
609.7	5.4	7.405	7.405	5.779	2.036	0.410
630.8	5.5	7.333	7.333	5.854	1.863	0.384
651.8	5.6	7.261	7.261	5.929	1.680	0.349
672.8	5.7	7.188	7.188	6.005	1.494	0.310
693.8	5.8	7.116	7.116	6.079	1.307	0.270
714.8	5.9	7.044	7.044	6.154	1.120	0.230
735.9	6.0	6.971	6.971	6.228	0.933	0.190
756.9	6.2	6.899	6.899	6.301	0.747	0.149
777.9	6.3	6.827	6.827	6.375	0.560	0.108
798.9	6.4	6.755	6.755	6.448	0.373	0.067
820.0	6.5	6.682	6.682	6.521	0.187	0.026
841.0	6.6	6.610	6.610	6.610	0.000	0.000

Comportamento da chaminé de equilíbrio (CH)

Nível de água mínimo: 3.689 m
(instante: 39.7444 s)

Nível de água máximo: 9.430 m
(instante: 0.0183 s)