

ANÁLISE DO FENÓMENO DE CHOQUE HIDRÁULICO NUMA ESTAÇÃO ELEVATÓRIA DE ÁGUAS RESIDUAIS. MODELAÇÃO E ANÁLISE DE FUNCIONAMENTO

RUI BONIFÁCIO VIANA LOPES

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL – ESPECIALIZAÇÃO EM HIDRÁULICA

Orientador: Professora Doutora Elsa Maria da Silva Carvalho

Coorientador: Professor Doutor José Carlos Tentúgal Valente

JANEIRO DE 2016

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2015/2016

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446



miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440



feup@fe.up.pt



<http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a Mestrado Integrado em Engenharia Civil – 2015/2016 – Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2016.

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

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Aos meus Avós e Pais,

“All I can do is be me, whoever that is.”

Bob Dylan

AGRADECIMENTOS

Aos meus orientadores, Professora Elsa Carvalho e Professor José Carlos Tentúgal Valente, o meu sincero agradecimento por todo tempo despendido na resolução dos problemas que foram surgindo, por todo o esforço, dedicação e especialmente por todos os conhecimentos transmitidos no decurso deste trabalho. Serão certamente duas das minhas maiores referências que espero levar para a vida profissional, principalmente devido ao seu profissionalismo e dedicação.

Ao Professor Manuel Maria Pacheco Figueiredo, o meu agradecimento pela disponibilidade e paciência para me atender quando me surgiam dúvidas em diversas etapas desta dissertação, mesmo em situações de maior sobrecarga de trabalho.

Agradeço também a todos os professores que tive sorte de encontrar ao longo de todo o meu percurso académico. Todos me instruíram as ferramentas que irei utilizar enquanto engenheiro e me fizeram crescer.

Aos meus Pais, Irmã e Avós, agradeço tudo o que fizeram por mim, não só no decorrer deste trabalho, mas também por me proporcionarem todo o afeto e apoio desde sempre e por me tornarem na pessoa que sou hoje.

À Daniela, agradeço a importância que teve ao nunca duvidar da minha capacidade de ultrapassar as dificuldades. Por me conhecer tão bem, soube dar-me incentivo nos momentos de maior desânimo e teve paciência para aturar fases menos boas do meu humor.

À Dona Esmeralda Miguel, o meu agradecimento por todo o carinho, preocupação e apoio que proporcionou ao longo do último ano e meio. A sua alegria contagiante faz com que a faculdade, sendo a nossa segunda casa, seja um sítio bem mais acolhedor.

Por último, não poderia deixar de agradecer a todos os meus colegas e amigos que me acompanharam ao longo destes anos. Ao Eduardo, em particular, por toda a ajuda prestada em diversas fases deste trabalho. Penso que nos conseguimos ajudar mutuamente, por estarmos a abordar o mesmo caso de estudo, ultrapassando algumas dificuldades encontradas. Não poderia também deixar de agradecer a toda a turma de hidráulica 2014/2015, por todo o companheirismo e entejuda demonstrada.

RESUMO

Quando há uma alteração no escoamento permanente em sistemas hidráulicos sob pressão, devido ao fecho de uma válvula (em condutas gravíticas) ou ao arranque/paragem repentinos do funcionamento de grupos elevatórios (condutas elevatórias), ocorre um fenómeno de propagação da onda de pressão, que poderá levar a um aumento significativo dos valores de pressões máximas e mínimas. A este fenómeno dá-se o nome de choque hidráulico.

A consideração do fenómeno de choque hidráulico no dimensionamento de uma instalação hidráulica sob pressão assume uma importância cada vez maior, já que este pode colocar em risco o bom funcionamento dos sistemas hidráulicos. À medida que o conhecimento sobre o choque hidráulico foi aprofundado, foram desenvolvidos vários métodos de cálculo. Porém, foi nas últimas décadas, aproveitando a evolução do cálculo computacional, que houve um maior impulso na precisão dos mesmos. Foram também desenvolvidos equipamentos de proteção que minimizam os possíveis problemas associados ao choque hidráulico.

Na presente dissertação fez-se uma análise do fenómeno de choque hidráulico numa estação elevatória de águas residuais e a influência do equipamento de proteção instalado. A estação elevatória escolhida para análise do fenómeno foi a do “Molhe Sul”, localizado em Vila do Conde, que integra o subsistema de saneamento de águas residuais da ETAR do Ave, concessionado à *Águas do Norte S.A.*

Recorreu-se a um programa desenvolvido em *software* “Matlab” pelo Professor Manuel Maria Pacheco Figueiredo cuja base do seu algoritmo é o Método das Características. Foi avaliada, para os vários níveis de funcionamento (um, dois ou três grupos elevatórios), a influência do equipamento de proteção instalado (Reservatório de Ar Comprimido).

PALAVRAS-CHAVE: **estação elevatória, águas residuais, regimes transitórios, choque hidráulico, reservatório de ar comprimido.**

ABSTRACT

When under pressure hydraulic systems suffer a disturbance, due to the closure of a valve (gravity pipelines) or a sudden start/stop of a pump (pumping systems), there is a pressure wave propagation that can lead to a substantial increase of surge pressures. That phenomenon is called “water hammer” or “hydraulic shock”.

The consideration of this phenomenon in the design of hydraulic systems has been gaining wide interest, as it may jeopardize the proper functioning of those systems. As the knowledge of water hammer was developed, several methods of evaluating surge pressures were created. However, in the last two decades, taking advantage of computational analysis development, there has been a major boost in its precision. At the same time, various devices that mitigate problems related to water hammer were developed.

This project focused on the analysis of water hammer effect in a wastewater pumping station and the effectiveness of the installed protection device. The pumping station that was chosen was “Molhe Sul”, which integrates the wastewater subsystem of the “Ave” WWTP (Waste Water Treatment Plant), located in Vila do Conde and which concession was given to *Águas do Norte S.A.*

To do that, a program developed in “Matlab” was used. The program was developed by Professor Manuel Maria Pacheco Figueiredo and its algorithm is based on the Method of Characteristics. The evaluation focused on the three operating combinations (one, two or three active pumps with no protection) and the comparison with the same combinations with protection. In that way, the influence of the protection device (Air Vessel) is evaluated.

KEYWORDS: **pumping station, wastewater, transient regimes, water hammer, air vessel.**

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. APRESENTAÇÃO E ENQUADRAMENTO DO TEMA	1
1.2. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	2
2. CHOQUE HIDRÁULICO	3
2.1. VERTENTE HISTÓRICA.....	3
2.2. MÉTODOS DE CÁLCULO	4
2.2.1 EQUAÇÕES FUNDAMENTAIS	5
2.2.1.1 EQUILÍBRIO DINÂMICO	6
2.2.1.2. CONSERVAÇÃO DA MASSA.....	7
2.2.2. MÉTODOS EXPEDITOS.....	9
2.2.3. MÉTODOS NUMÉRICOS.....	12
2.2.4 CONDIÇÕES FRONTEIRA	13
2.2.4.1. CONDIÇÃO FRONTEIRA NO RESERVATÓRIO.....	13
2.2.4.2. CONDIÇÃO FRONTEIRA NA BOMBA	13
2.2.5. MÉTODO DAS CARACTERÍSTICAS	14
2.2.5.1. CONDIÇÃO FRONTEIRA NO RESERVATÓRIO.....	19
2.2.5.2. CONDIÇÃO FRONTEIRA NO GRUPO ELEVATÓRIO.....	20
2.2.5.3. CONDIÇÃO DE FRONTEIRA NO RAC	21
2.3. CAVITAÇÃO. ROTURA DA VEIA LÍQUIDA	24
2.4. DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO	25
2.3.1. VOLANTE DE INÉRCIA	25
2.3.2. CHAMINÉ DE EQUILÍBRIO.....	26
2.3.3. RESERVATÓRIO UNIDIRECIONAL	27
2.3.4. CONDUTA DE ASPIRAÇÃO PARALELA.....	28
2.3.5. VÁLVULA DE DESCARGA AUTOMÁTICA.....	28
2.3.6. RESERVATÓRIO DE AR COMPRIMIDO.....	29

3. CASO DE ESTUDO: SISTEMA ELEVATÓRIO DO “MOLHE SUL” 33

3.1. DESCRIÇÃO GERAL..... 33

3.2. DESCRIÇÃO DO SISTEMA ELEVATÓRIO DO “MOLHE SUL” 33

3.2.1. RESERVATÓRIO DE MONTANTE 35

3.2.2. GRUPOS ELEVATÓRIOS 35

3.2.2.1. CUVA CARACTERÍSTICA DA BOMBA (CCB) 36

3.2.2.2. CURVA DE RENDIMENTO..... 39

3.2.2.3. PD²..... 42

3.3.3. RESERVATÓRIO DE AR COMPRIMIDO 42

3.3.4. CONDUITA ELEVATÓRIA..... 45

3.3.5. RESERVATÓRIO DE JUSANTE 45

4. METODOLOGIA..... 47

4.1. ABORDAGEM 47

4.2. DADOS DE “INPUT“ FIXOS 47

4.2.1. DADOS COMUNS A TODOS OS CASOS AVALIADOS 48

4.2.2. DADOS COMUNS AOS CASOS COM RAC 49

4.3. DADOS DE “INPUT“ VARIÁVEIS 50

4.3.1. CURVA CARACTERÍSTICA DA BOMBA..... 50

4.3.2. CURVA DE RENDIMENTO..... 50

4.3.3. PD² 50

4.3.4. COTA DO NÍVEL DE ÁGUA NO RAC EM REGIME PERMANENTE..... 50

4.4. RESULTADOS 51

4.4.1. UMA BOMBA EM FUNCIONAMENTO 51

4.4.1.1. REGIME PERMANENTE..... 51

4.4.1.2. CHOQUE HIDRÁULICO SEM PROTEÇÃO 52

4.4.1.3. CHOQUE HIDRÁULICO COM PROTEÇÃO DO RAC 53

4.4.2. DUAS BOMBAS EM FUNCIONAMENTO 54

4.4.2.1. REGIME PERMANENTE..... 54

4.4.2.2. CHOQUE HIDRÁULICO SEM PROTEÇÃO 55

4.4.2.3. CHOQUE HIDRÁULICO COM PROTEÇÃO DO RAC 56

4.4.3. TRÊS BOMBAS EM FUNCIONAMENTO 58

4.4.3.1. REGIME PERMANENTE.....	58
4.4.3.2. CHOQUE HIDRÁULICO SEM PROTEÇÃO	59
4.4.3.3. CHOQUE HIDRÁULICO COM PROTEÇÃO.....	60
4.5. ANÁLISE AOS RESULTADOS OBTIDOS.....	62
4.5.1. VARIAÇÃO DA COTA DO NÍVEL DE ÁGUA NO INTERIOR DO RAC	62
4.5.2. ANÁLISE DAS ENVOLVENTES DE PRESSÃO	63
4.5.3. ANÁLISE DO PERFIL LONGITUDINAL E PRESSÕES NEGATIVAS.....	64
 5. CONCLUSÕES	 65
5.1. CONCLUSÕES GERAIS SOBRE O CASO DE ESTUDO	65
5.2. SUGESTÕES DE ALTERNATIVAS E DE TRABALHOS FUTUROS.....	66
 BIBLIOGRAFIA	 67
 ANEXOS	 69
ANEXO A: PERFIL LONGITUDINAL.....	71
ANEXO B: ENVOLVENTES DE CARGA E PRESSÃO.....	77
B.1 : ENVOLVENTE DE CARGA E PRESSÃO PARA 1 BOMBA SEM PROTEÇÃO	77
B.2 : ENVOLVENTE DE CARGA E PRESSÃO PARA 1 BOMBA COM RAC	79
B.3 : ENVOLVENTE DE CARGA E PRESSÃO PARA 2 BOMBAS SEM RAC	82
B.4 : ENVOLVENTE DE CARGA E PRESSÃO PARA 2 BOMBAS COM RAC.....	85
B.5 : ENVOLVENTE DE CARGA E PRESSÃO PARA 3 BOMBAS SEM RAC	87
B.6 : ENVOLVENTE DE CARGA E PRESSÃO PARA 3 BOMBAS COM RAC.....	90
B.7 : ENVOLVENTE DE CARGA E PRESSÃO PARA 3 BOMBAS COM RAC (PROPOSTA ALTERNATIVA)	92

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Trecho Elementar de Conduta (Pacheco Figueiredo, 1990)	6
Figura 2 – Envolvente de Manobra Instantânea numa Conduta Elevatória (Piqueiro, 2014)	11
Figura 3 – Envolvente de Manobra Rápida numa Conduta Elevatória (Piqueiro, 2014)	11
Figura 4 – Envolvente de Manobra Lenta numa Conduta Elevatória (Piqueiro, 2014)	12
Figura 5 - Linhas Características (Pacheco Figueiredo, 2014)	17
Figura 6 - Mudança de Inclinação da Conduta (Pacheco Figueiredo, 1990).....	18
Figura 7 - Carga no Reservatório (Pacheco Figueiredo, 1990)	19
Figura 8 - Esquema de Ligação do RAC à Conduta Elevatória (Pacheco Figueiredo, 2014)	21
Figura 9 - Método das Características: Fronteira Montante (Pacheco Figueiredo, 2014)	23
Figura 10 - Rotura da Veia Líquida (Betâmio de Almeida, 1981).....	24
Figura 11 - Escoamento Bolhoso (Betâmio de Almeida, 1981)	25
Figura 12 - Representação de um Volante de Inércia (Martins, 2009)	26
Figura 13 - Instalação com Volante de Inércia [1]	26
Figura 14 - Chaminé de Equilíbrio [2]	27
Figura 15 - Esquema de um Reservatório Unidirecional (Mendes, 2011)	27
Figura 16 - Conduta de Aspiração Paralela (Camargo, 1989)	28
Figura 17 - Esquema de uma Válvula de Descarga Automática (Camargo, 1989).....	29
Figura 18 – Conduta Elevatória Protegida com RAC (Betâmio de Almeida, 1981)	30
Figura 19 - Layout de um RAC [3]	30
Figura 20 - Escoamento na Tubeira (Pacheco Figueiredo, 1990).....	31
Figura 21 - Fases de Funcionamento de um RAC (Piqueiro, 2014).....	32
Figura 22 - Localização da Estação Elevatória "Molhe Sul" (Adaptado de <i>Google Earth</i>)	34
Figura 23 - Estação Elevatória "Molhe Sul"	34
Figura 24 - Grupos Elevatórios Instalados (Fotografia do Prof. Francisco Piqueiro)	35
Figura 25 - Dois dos Quatro Variadores de Frequência Existentes	36
Figura 26 - CCB Bomba Original a 50 Hz	37
Figura 27 - CCB 1 Bomba a 42,7 Hz	37
Figura 28 – CCB 1 Bomba a 49,8 Hz.....	38
Figura 29 - Curva de Rendimento Bomba Original a 50 Hz.....	39
Figura 30 - Curva de Rendimento de 1 Bomba (42,7 Hz).....	40
Figura 31 - Curva de Rendimento de 2 Bombas (49,8 Hz)	41

Figura 32 - Curva de Rendimento de 3 Bombas (49,8 Hz).....	41
Figura 33 - RAC Instalado na Estação Elevatória (Fotografia do Prof. Francisco Piqueiro)	42
Figura 34 - Um dos Compressores Instalados.....	43
Figura 35 – Esquema do Pormenor de Ligação ao RAC (Cedido pela Entidade Gestora).....	43
Figura 36 – Fotografia do Pormenor de Ligação ao RAC.....	44
Figura 37 - Linha piezométrica em Regime Permanente para 1 Bomba.....	51
Figura 38 - Envolvente de Pressões sem RAC para 1 Bomba	52
Figura 39 - Envolvente de Pressões com RAC para 1 Bomba	53
Figura 40 - Desempenho do RAC para 1 Bomba.....	54
Figura 41 - Linha piezométrica em Regime Permanente para 2 Bombas.....	55
Figura 42 - Envolvente de Pressões sem RAC para 2 Bombas	56
Figura 43 - Envolvente de Pressões com RAC para 2 Bombas	57
Figura 44 - Desempenho do RAC para 2 Bombas.....	58
Figura 45 - Linha piezométrica em Regime Permanente para 3 Bombas.....	59
Figura 46 - Envolvente de Pressões sem RAC para 3 Bombas	60
Figura 47 - Envolvente de Pressões com RAC para 3 Bombas	61
Figura 48 - Desempenho do RAC para 3 Bombas.....	62
Figura 49 - Variações do Caudal Elevado e Velocidade de Rotação das Bombas: Paragem de 3 Bombas sem Proteção do RAC.....	63
Figura 50 - Envolvente de Pressões com RAC para 3 Bombas: Proposta Alternativa	64

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Coeficiente de Inclinação da Conduta.....	10
Tabela 2 - Coeficiente de Inércia do Grupo Eletrobomba.....	10
Tabela 3 - Valores de PD^2	42
Tabela 4 - Características do RAC	44
Tabela 5 - Dados de “Input” Comuns a Todos os Casos.....	48
Tabela 6 - Dados de “Input” Comuns aos Casos com RAC	49
Tabela 7 - CCB's Introduzidas no Programa.....	50
Tabela 8 - Curvas de Rendimento Introduzidas no Programa.....	50
Tabela 9 - Cota do Nível de Água no RAC em Regime Permanente.....	50
Tabela 10 - Ponto de Funcionamento da Elevatória para 1 Bomba.....	51
Tabela 11 - Resultados do Choque Hidráulico sem RAC para 1 Bomba	52
Tabela 12 - Resultados do Choque Hidráulico com RAC para 1 Bomba	53
Tabela 13 - Níveis no Interior do RAC para 1 Bomba	54
Tabela 14 - Ponto de Funcionamento da Elevatória para 2 Bombas	55
Tabela 15 - Resultados do Choque Hidráulico sem RAC para 2 Bombas	56
Tabela 16 - Resultados do Choque Hidráulico com RAC para 2 Bombas	57
Tabela 17 – Níveis no Interior do RAC para 2 Bombas.....	58
Tabela 18 - Ponto de Funcionamento da Elevatória para 3 Bombas.....	59
Tabela 19 - Resultados do Choque Hidráulico sem RAC para 3 Bombas	60
Tabela 20 - Resultados do Choque Hidráulico com RAC para 3 Bombas	61
Tabela 21 – Níveis no Interior do RAC para 3 Bombas.....	62
Tabela A.1 – Perfil Longitudinal.....	71
Tabela B.1 – Envolvente para 1 Bomba sem RAC.....	77
Tabela B.2 – Envolvente para 1 Bomba com RAC.....	79
Tabela B.3 – Envolvente para 2 Bombas sem RAC.....	82
Tabela B.4 – Envolvente para 2 Bombas com RAC.....	85
Tabela B.5 – Envolvente para 3 Bombas sem RAC.....	87
Tabela B.6 – Envolvente para 3 Bombas com RAC.....	90
Tabela B.7 – Envolvente para 3 Bombas com RAC. Proposta Alternativa.....	92

SÍMBOLOS E ACRÓNIMOS

a – Celeridade

e – Espessura da conduta

d – Diâmetro da tubeira

g – Aceleração da gravidade

p – Pressão

t – Tempo

t_A , t_B e t_P – Instante correspondente aos pontos A, B e P, respetivamente

t_i – Tempo no instante i

x – Coordenada segundo o eixo da conduta

x_A , x_B e x_P – Abcissa do ponto A, B e P, respetivamente

z – Cota topográfica

A – Parâmetro da curva característica da bomba.

A_1 e A_2 – Equações diferenciais correspondentes a β_1 e β_2 , respetivamente.

B – Parâmetro da curva característica da bomba

C – Parâmetro da curva característica da bomba

C_1 – Parâmetro que traduz a influência da forma de fixação da conduta na propagação das ondas de choque

C_2 – Coeficiente experimental em função da inclinação da conduta

C_c – Coeficiente de contração na tubeira

C^+ e C^- – Equações características

D – Diâmetro da conduta; Parâmetro da curva característica da bomba

D_l – Diâmetro do tubo de ligação do RAC à conduta

D_{RAC} – Diâmetro do RAC

E – Módulo de elasticidade do material constituinte da conduta

F – Onda de pressão “emitida” na secção da bomba; Força

G – Parâmetro da curva característica da bomba

H – Carga

H_A – Carga em A

H_B – Carga em B

H_0 – Carga em regime permanente

H_c – Carga na conduta, na secção de ligação ao RAC

H_g – Altura geométrica

H_{man} – Altura manométrica

H_P – Carga em P

H_{RAC} – Carga no RAC

I – Integral de uma função genérica

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

I^+ - Integral de perda de carga e da inclinação da conduta, na equação C^+

I^- - Integral da perda de carga e da inclinação da conduta, na equação C^-

J – Perda de carga unitária

K – Fator de ponderação da integração numérica; rugosidade equivalente

K_I - Coeficiente experimental que representa, principalmente, o efeito da inércia do grupo eletrobomba

K_L – Coeficiente de perda de carga localizada na passagem da conduta para o reservatório

K_{tb} – Coeficiente de perda de carga na tubeira

L – Comprimento da conduta

L_1 e L_2 – Equações diferenciais

M_0 - Momento atuante sobre as massas girantes da bomba

M_e – Massa que entra no volume de controlo

M_m – Momento motor

M_r – Momento resistente

M_s – Massa que sai do volume de controlo

N – Velocidade angular das massas girantes em r.p.m.

N_i – Velocidade de rotação da bomba no instante i

N_{i+1} – Velocidade de rotação da bomba no instante $i+1$

P – Pressão relativa

P_{RAC} – Altura piezométrica absoluta do ar no RAC

P_{RAC0} – Altura piezométrica absoluta inicial, do ar contido no RAC

P_A – Pressão atmosférica

PD^2 - Parâmetro que traduz a inércia das massas girantes da bomba

Q – Caudal

Q_A – Caudal em A

Q_B – Caudal em B

Q_b – Caudal na bomba

Q_P – Caudal em P

Q_0 – Caudal inicial

Q_{RAC} – Caudal que sai ou entra no RAC

R – Parâmetro definido em (59)

S – Área da secção da conduta

S_c – Área da secção contraída na tubeira

S_r – Área da secção do tubo de ligação do RAC à conduta

T – Parâmetro definido em (60)

T_A – Tempo de anulação do escoamento (Betâmio de Almeida)

T_R – Tempo de anulação do escoamento (Rosich)

U – Velocidade média numa secção da conduta

U_r – Velocidade média numa secção do tubo de ligação do RAC à conduta

U_0 – Velocidade inicial do escoamento

V – Volume

$V_{RAC,0}$ – Volume inicial do ar no RAC

V_{RAC} – Volume de ar no RAC

Z_R – Cota topográfica da superfície livre de água no reservatório

Z_{RAC} – Cota topográfica da superfície livre de água no RAC

$Z_{RAC,MÁX}$ – Cota máxima da superfície livre de água no RAC

$Z_{RAC,MIN}$ – Cota mínima da superfície livre de água no RAC

$Z_{RAC,0}$ – Cota da superfície livre de água no RAC em regime permanente

α – Expoente politrópico

α_b – Aceleração angular das massas girantes da bomba

β – Coeficiente de combinação linear das equações diferenciais

γ – Peso volúmico do fluído

Δt – Intervalo de tempo

Δx – comprimento do trecho de conduta entre duas secções

ΔH – Variação da carga hidráulica

ΔH_l – Perda de carga localizada num estreitamento brusco

ΔH_{tb} – Perda de carga localizada na tubeira

ΔM_i – Variação da massa no interior do volume de controlo

ΔP – Variação de pressão

ΔU – Variação de velocidade

ε – Módulo de elasticidade de volume

η – Rendimento da bomba

θ – Ângulo que o eixo da conduta faz com a horizontal

λ – Coeficiente de Compensação Energética

ν – Coeficiente de Poisson

μ – Fase da onda de choque

ρ – Massa volúmica do fluído

τ_0 – Tensão tangencial

ω_b – Velocidade angular das massas girantes da bomba

CAP – Conduta de Aspiração Paralela

CCB – Curva Característica da Bomba

FFD – Ferro Fundido Dúctil

ETAR – Estação de Tratamento de Águas Residuais

RAC – Reservatório de Ar Comprimido

RUD – Reservatório Unidirecional

VDA – Válvula de Descarga Automática

WWTP – Wastewater Treatment Plant

1

INTRODUÇÃO

1.1. APRESENTAÇÃO E ENQUADRAMENTO DO TEMA

As alterações nas condições de funcionamento de um sistema hidráulico sob pressão podem levar a que o escoamento normal (permanente) deste se transforme, durante um período de tempo, num regime variável. Quando este regime variável assume variações de pressão consideráveis, atribui-se a esse fenómeno o nome de choque hidráulico ou golpe de aríete. O choque hidráulico é então a manifestação física das variações ocorridas no escoamento. Se não for considerado no dimensionamento dos sistemas, as consequências da sua ocorrência poderão ser de extrema gravidade, por exemplo rotura de condutas. Poderão também acontecer problemas de exploração, como redução do rendimento dos equipamentos, ressonância, cavitação e ruído.

A avaliação dessas pressões resultantes do choque hidráulico tem ganho maior relevo com o avanço do cálculo computacional, sendo possível hoje em dia utilizar métodos de cálculo muito mais apurados e rápidos do que acontecia anteriormente. Estas ferramentas são indispensáveis para escolher o método de proteção dos sistemas mais eficaz para cada situação.

Os sistemas sob pressão podem ser gravíticos ou elevatórios. A opção gravítica é utilizada sempre que possível, desde que as condições de implantação da conduta o permitam. A elevatória está sempre associada a um equipamento mecânico (grupos elevatórios) que introduz a energia necessária para o escoamento vencer o desnível geométrico e as perdas de carga. Para o caso de drenagem de águas residuais, só se utilizam escoamentos sob pressão em “último recurso”, quando não é possível realizar escoamento gravítico em superfície livre (pontos baixos da rede recorrendo a grupos elevatórios) ou quando há obstáculos a ultrapassar (utilizando por norma sifões invertidos). Esta dissertação irá abordar um caso de escoamento sob pressão num sistema elevatório. Não há muita diferenciação entre o cálculo para drenagem de águas residuais e adução por não haver alteração nos parâmetros de “input”. A maior diferença reside nos tipos de equipamentos e materiais a utilizar e na manutenção dos mesmos.

Esta dissertação tem, então, como âmbito principal a avaliação do fenómeno de choque hidráulico e a eficácia do equipamento de proteção instalado. Para isso, recorrer-se-á a um programa em “Matlab” desenvolvido pelo Professor Doutor Manuel Pacheco Figueiredo, que tem como base de cálculo o Método das Características e que irá ser apresentado no próximo capítulo. Irá ser feito o cálculo das pressões resultantes da paragem dos grupos elevatórios com e sem proteção, para que se possa ter noção do amortecimento de pressões que a proteção oferece. Desse modo irá também ser feita uma análise dos problemas que poderão existir mesmo com a proteção instalada e descobrir a possibilidade de os evitar.

1.2. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação divide-se em cinco capítulos, incluindo o presente capítulo em que é feita uma breve introdução ao tema em estudo.

O Capítulo 2 consiste no estudo do fenómeno choque hidráulico. É feita uma breve introdução histórica do estudo do fenómeno, seguida de uma abordagem geral a vários métodos de cálculo, com principal atenção ao Método das Características. São também listados os diversos equipamentos de proteção contra os efeitos do choque hidráulico.

No Capítulo 3 é feita uma apresentação do caso de estudo, incluindo a determinação de alguns parâmetros necessários para aplicar o método.

O Capítulo 4 apresenta em primeiro lugar o programa utilizado, são listados todos os dados de “input” requeridos e apresentados os resultados obtidos. É feita uma análise aos resultados e possíveis alterações a realizar.

Por fim, no Capítulo 5 são reunidas as conclusões retiradas do presente estudo, sendo também propostas ideias de possíveis análises em futuros trabalhos.

2

CHOQUE HIDRÁULICO

O termo “Choque Hidráulico”, ou “Golpe de Aríete”, é utilizado para descrever a propagação da onda de pressão provocada pelas alterações ao escoamento que, para a água, são consequência de ações involuntárias como a rotura ou bloqueios nos circuitos e, mais especificamente no caso das condutas elevatórias, as ações de arranque e paragem dos grupos eletrobomba. Uma súbita mudança de velocidade de um fluido incompressível, que no caso desta dissertação se trata de água, provoca uma transferência de energia cinética para a tubagem e poderá provocar fenómenos como excessos de pressão, tanto positiva como negativa, ruídos e forças destrutivas que poderão colocar o funcionamento dos sistemas hidráulicos em risco.

2.1. VERTENTE HISTÓRICA

Os fenómenos transitórios dos escoamentos começaram a ser estudados por Young em 1808, quando a investigação da propagação de ondas de pressão em tubagens deu os primeiros passos. Helmholtz, sensivelmente na mesma época, foi o primeiro a indicar que a velocidade das ondas de pressão em água confinada numa conduta é menor do que aquela não confinada, salientando que essa diferença advém da elasticidade das paredes da tubagem. Manabrea, prosseguindo o ímpeto criado com estes trabalhos, iniciou, em 1858, o estudo do golpe de aríete, utilizando pela primeira vez essa designação para identificar o regime transitório em condutas e estabelecendo pela primeira vez as equações que deduzem o valor das subpressões em condutas gravíticas. Contudo, alguma literatura atribui esse feito a Michaud, que fez uma análise, utilizando chaminés de equilíbrio e válvulas de controlo, ao choque hidráulico (Anderson, 1976; Chaudhry, 1979).

Apesar de Weston, Carpenter e Friezell terem desenvolvido, em 1897, estudos que examinam a relação entre as variações de pressão e a velocidade, foi só com o seu contemporâneo Jowkowsky que se começaram a realizar os primeiros trabalhos importantes, do ponto de vista de engenharia, quando este analisou o fenómeno em ensaios sistemáticos de condutas de abastecimento de água. Em 1898, com a formulação da “Equação Fundamental do Choque Hidráulico, que é conhecida também por “Equação de Joukowsky”, “Equação de Alliévi” ou Equação de “Alliévi-Joukowsky”, deu um grande contributo para o estudo do fenómeno (Ghidaoui et al., 2005). Segundo Betâmio de Almeida e Martins (1999) esta equação, apresentada em (1) e (2), é também conhecida por “Fórmula de Frizell-Joukowsky”.

$$\Delta P = \pm \rho a \Delta U \quad (1)$$

ou;

$$\Delta H = \frac{\Delta P}{\gamma} = \frac{\pm \rho a \Delta U}{\gamma} = \pm \frac{a \Delta U}{g} \quad (2)$$

onde a representa a celeridade (velocidade da onda de propagação), ΔP a variação de pressão provocada pelo fecho brusco de uma válvula, γ o peso volúmico da água, g a aceleração da gravidade, ΔH a variação da carga hidráulica e ΔU a variação instantânea da velocidade.

Esta formulação não considera vários aspetos na sua dedução, tais como as perdas de carga contínuas, cavitação e rotura de veia líquida, lei não uniforme de velocidades, existência de bolsas de ar acumulado e ainda vibrações na conduta e nos equipamentos associados (Costa, 2011).

Portanto, os valores obtidos pelas equações (1) e (2), ultrapassam na maioria dos casos os valores de variações de pressões medidas em casos reais, pelo que se torna assim, possivelmente, antieconómica (Betâmio de Almeida, 1990).

Sensivelmente na mesma época apareceu a teoria geral do choque hidráulico de Alliévi, desenvolvida desde os princípios básicos publicados em 1902. Este autor, ao analisar casos importantes, especialmente os relacionados com manobras lineares de válvulas, apresentou as suas fundamentações teóricas de um modo elegante e bastante pormenorizado. Contudo, ao não considerar perdas de carga, poderá apresentar algumas lacunas na justificação de casos práticos (Betâmio de Almeida, 1979).

Os trabalhos de Alliévi serviram de base para muita investigação realizada nas décadas seguintes, destacando-se a de Jeager e Favre, em 1933 e 1938 respetivamente (Betâmio de Almeida, 1981).

Na mesma década surge também o Método Gráfico de Schnyder-Bergeron, quando Bergeron trabalha e apresenta o método gráfico desenvolvido por Schnyder. Este método é fruto da necessidade de compreensão do fenómeno em sistemas mais complexos. É um método ainda bastante útil, visto que permite uma melhor perceção dos fenómenos de choque hidráulico com a consideração, ainda que de forma aproximada, de perdas de carga e também de determinadas condições de fronteira (Costa, 2011).

Com a evolução e aperfeiçoamento da capacidade e utilização do cálculo automático devido aos avanços tecnológicos que colocam ao dispor de cada um recursos impensáveis há algumas décadas, o Método das Características tem-se imposto como o método mais potente e versátil em aplicações de engenharia (Betâmio de Almeida, 1981).

2.2. MÉTODOS DE CÁLCULO

Quando um escoamento sob pressão sofre perturbações em que se registam alterações das variáveis de pressão e de caudal que caracterizam o mesmo, diz-se estar sujeito a um regime variável. Estes poderão ser divididos em dois grupos: regimes gradualmente variáveis (ou quase-permanentes) e regimes rapidamente variáveis. Quando as variações dos parâmetros do escoamento são feitas de forma progressiva, possibilitando que as condições de compatibilidade interna sejam atingidas praticamente sem atraso, trata-se de um regime gradualmente variável. Trata-se de um regime rapidamente variável quando existe um atraso no estabelecimento das novas condições de compatibilidade interna, o que

provoca consideráveis variações dos valores da pressão e do caudal que por sua vez mobiliza forças de natureza elástica resultantes da compressibilidade da água e da deformabilidade da conduta (Pacheco Figueiredo, 1990).

O regime rapidamente variável que ocorre entre dois regimes permanentes, ou quase permanentes, resultante de uma alteração no escoamento é denominado transitório ou transiente hidráulico. Está diretamente relacionado com o fenómeno de choque hidráulico pois este é o fenómeno que descreve as variações de pressão e de caudal capazes de mobilizar forças elásticas (Pacheco Figueiredo, 1990).

2.2.1 EQUAÇÕES FUNDAMENTAIS

A fundamentação teórica e matemática do choque hidráulico é baseada na aplicação dos princípios de equilíbrio dinâmico e conservação da massa a um trecho elementar do escoamento sob pressão, entre duas secções da conduta. Para estes serem aplicáveis, consideram-se algumas hipóteses simplificadoras que se expõem de seguida (Betâmio de Almeida, 1981).

Nas simplificações referentes às características do fluído e do escoamento, tem-se que: (Pacheco Figueiredo, 1990)

- O escoamento é unidimensional e a distribuição de velocidades e de pressão é uniforme na secção transversal da conduta, pelo que serão deduzidas equações globais;
- O fluído é homogéneo e monofásico durante todo o regime transitório não sendo considerada a hipótese da cavitação;
- A compressibilidade do fluído é caracterizada por um único parâmetro, o módulo de elasticidade de volume, ε , definido por:

$$\varepsilon = -V \frac{dP}{dV} = \rho \frac{dP}{d\rho} \quad (3)$$

em que V é o volume e ρ é a massa volúmica do fluído.

- As expressões utilizadas para o cálculo da perda de carga num escoamento permanente são aplicadas, no regime transitório, para o cálculo da perda de carga em cada instante;
- A altura cinética ($U^2/2g$) é desprezável, definindo-se a carga H por:

$$H = z + \frac{P}{\gamma} \quad (4)$$

em que z é a cota topográfica e P a pressão relativa.

- Em cada instante, a massa volúmica no interior do tubo de corrente elementar é considerada constante, pelo que se admite:

$$\frac{\partial \rho}{\partial x} = 0 \quad (5)$$

em que x é a coordenada segundo o eixo da conduta.

É preciso também considerar simplificações no que diz respeito ao comportamento da conduta, tais como:

- Imobilidade do eixo da conduta durante o regime transitório, pelo que:

$$\frac{dz}{dt} = 0 \quad (6)$$

em que t é o tempo.

- A conduta (o invólucro) tem um comportamento elástico de acordo com a Lei de Hooke, caracterizado pelo módulo de elasticidade, E , e pelo coeficiente de Poisson, ν ;
- Em cada instante, o trecho elementar da conduta é considerado como uniforme, isto é, com diâmetro, espessura do invólucro e características elásticas constantes. Em particular admite-se que:

$$\frac{\partial S}{\partial x} = 0 \quad (7)$$

em que S é a área da secção da conduta.

2.2.1.1 Equilíbrio Dinâmico

Segundo o mesmo autor, a equação de equilíbrio dinâmico exprime o princípio de equilíbrio de um sistema de forças, exteriores e de inércia, que atua sobre um determinado corpo ou volume. Esta equação advém da aplicação da Equação Geral da Dinâmica ao movimento de um fluido.

$$\sum \vec{F}_{\text{exterior}} + \sum \vec{F}_{\text{inércia}} = 0 \quad (8)$$

É considerado, para a sua dedução e como ilustra a Figura 1, um trecho elementar de tubo de corrente delimitado por duas secções, afastadas de dx .

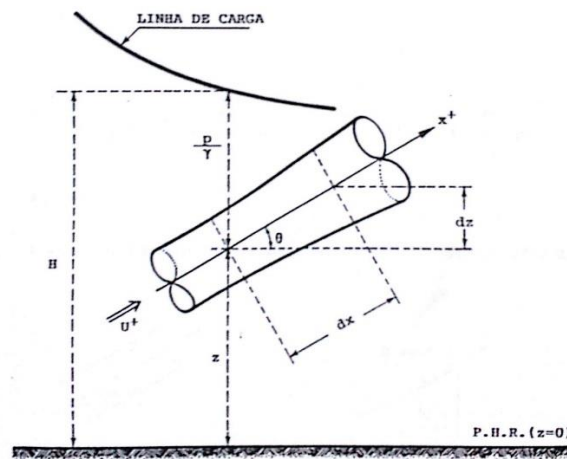


Figura 1 - Trecho Elementar de Conduta (Pacheco Figueiredo, 1990)

As componentes das forças exteriores e de inércias consideradas, segundo o eixo longitudinal da conduta, são as seguintes:

- Resultante da diferença de pressões entre as duas secções da conduta, separada por dx :

$$PS - \left(P + \frac{\partial p}{\partial x} dx \right) \left(S + \frac{\partial S}{\partial x} dx \right) = -S \frac{\partial P}{\partial x} dx \quad (9)$$

- Peso do fluído contido no tubo de corrente elementar:

$$-\gamma S \sin \theta dx \quad (10)$$

em que θ é o ângulo representado na Figura 1.

- Força tangencial devido ao atrito fluído-conduta, distribuída pela superfície lateral da conduta em sentido contrário ao deslocamento:

$$\pm \frac{\gamma \lambda U^2 S}{2gD} dx \quad (11)$$

em que λ é o coeficiente de resistência e D o diâmetro da conduta

- Força de inércia, sendo definida como o simétrico do produto da massa elementar pela respetiva aceleração:

$$-\rho S \left(\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} \right) dx \quad (12)$$

Depois de simplificar sucessivamente as equações acima enunciadas, juntando todas as componentes, segundo o eixo da conduta, e considerando o caudal, Q , em vez da velocidade obtém-se o aspeto final da equação de equilíbrio dinâmico:

$$\frac{1}{S} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{Q}{S^2} \frac{\partial Q}{\partial x} + g \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\lambda Q |Q|}{2DS^2} = 0 \quad (13)$$

2.2.1.2. Conservação da Massa

O princípio de conservação da massa, numa perspetiva de equação de balanço, determina que a diferença entre a quantidade de massa que sai, M_s , e a que entra, M_e , seja igual à redução da quantidade de massa no interior do trecho da conduta (mantendo o exemplo do trecho representado na Figura 1). Pode-se então estabelecer que:

$$M_s - M_e = \Delta M_i \quad (14)$$

onde a massa que entra no volume de controlo, trecho elementar representado na Figura 1, durante um intervalo de tempo dt , é expressa pela expressão (15) e a que sai, para o mesmo intervalo de tempo, é expressa pela equação (16):

$$M_e = \rho Q dt = \rho U S dt \quad (15)$$

$$M_s = \left(\rho + \frac{\partial \rho}{\partial x} dx \right) \left(U + \frac{\partial U}{\partial x} dx \right) \left(S + \frac{\partial S}{\partial x} dx \right) dt \quad (16)$$

A equação que traduz a diminuição da massa no interior do volume de controlo é dada por:

$$\Delta M_i = - \frac{\partial(\rho S)}{\partial t} dx dt \quad (17)$$

A equação de balanço, depois de desenvolvida e arrumada no primeiro membro da igualdade, escreve-se:

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{S} \frac{\partial S}{\partial t} = 0 \quad (18)$$

Como a configuração da equação (18) ainda não permite um tratamento numérico adequado, é necessário transformá-la de modo a que as variações de secção S e da massa volúmica do fluído ρ sejam expressas à custa das variáveis do problema como o caudal (ou a velocidade) e a pressão (ou a carga hidráulica).

Para isso ser possível, substitui-se a segunda parcela do primeiro membro da equação (18) por:

$$\frac{1}{\varepsilon} \frac{dp}{dt} \quad (19)$$

Considerando também a variação da massa volúmica:

$$d\rho = \frac{\partial \rho}{\partial t} dt + \frac{\partial \rho}{\partial x} dx \quad (20)$$

Após múltiplas deduções e simplificações matemáticas, que são amplamente descritas por Pacheco Figueiredo (1990), juntamente com o uso de algumas hipóteses simplificadoras referidas anteriormente (como é o caso da equação (5)), e até a introdução de novas variáveis como a celeridade, a , é possível chegar à pretendida equação de conservação da massa para um escoamento transitório sob pressão:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{Q}{S} \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{a^2}{gS} \frac{\partial Q}{\partial x} - \frac{Q}{S} \sin \theta = 0 \quad (21)$$

2.2.2. MÉTODOS EXPEDITOS

Com o aumento do interesse no estudo destes regimes transitórios e pela sua importância na segurança dos sistemas hidráulicos, vários métodos foram desenvolvidos, muitos utilizando conhecimento empírico, simplificações e cálculos sistemáticos porque sem o auxílio do cálculo computacional era impossível obter uma solução exata das equações descritas anteriormente.

Estes métodos tornaram-se então uma ferramenta importante para traçar envolventes de pressão sem ter de se recorrer a métodos iterativos. São ainda frequentemente utilizados na fase preliminar de projetos mas, para casos de grande dimensão e complexidade, devem ser evitados devido às suas simplificações. Têm como condicionante a impossibilidade de “poder seguir” o fenómeno ao longo do tempo e portanto não poder avaliar o caudal e carga numa qualquer secção, para um dado instante.

Serão descritas de seguida as equações utilizadas e o aspeto das envolventes resultantes dos métodos expeditos. Note-se que apenas será abordado o caso de condutas elevatórias e não de condutas gravíticas.

É preciso ter em conta que para estudar os escoamentos transitórios tem que se caracterizar a condição de fronteira responsável pela ocorrência do fenómeno. Para o caso de condutas elevatórias é, como foi referido anteriormente, o grupo elevatório.

Nas condutas elevatórias o choque hidráulico é diretamente afetado pelo comportamento da estrutura e também pela definição da lei de paragem do escoamento. Esta é diretamente função da lei de paragem dos grupos elevatórios e da inércia da massa fluida.

O choque hidráulico num sistema elevatório, começa por desenvolver uma onda de depressão, que se propaga para jusante a partir da fronteira montante (grupo elevatório). Os métodos expeditos consideram ajustes à definição da envolvente das depressões não em relação ao nível da carga estática mas em relação ao desenvolvimento da linha de carga em regime permanente.

Para aplicar os métodos expeditos, é necessário definir parâmetros fundamentais na análise dos escoamentos transitórios. O primeiro a ser definido é a celeridade, a :

$$a = \sqrt{\frac{1}{\rho \left(\frac{1}{e} + \frac{DC_1}{Ee} \right)}} \quad (22)$$

Onde ρ é a massa específica da água, C_1 o parâmetro que traduz a influência da forma de fixação da conduta na propagação das ondas de choque e e a espessura da conduta.

Importa também definir a fase da onda de choque, μ , que se relaciona com a celeridade:

$$\mu = \frac{2L}{a} \quad (23)$$

em que L é o comprimento da conduta.

Para se definir a envolvente, aplicando os métodos expeditos, é preciso definir o tempo de paragem do escoamento. Comparando o tempo de paragem com a fase, pode-se definir a manobra. Quando o tempo de manobra é nulo, a manobra é instantânea. Se o tempo de paragem for inferior à fase, a manobra diz-se rápida. Pelo contrário, se o tempo de paragem for superior à fase, a manobra é lenta.

O tempo de paragem pode ser estimado a partir das fórmulas aproximadas de Rosich ou de Betâmio de Almeida.

Segundo Rosich, o tempo de paragem é dado por:

$$T_R = C_2 + \frac{K_1 L U_0}{g H_{man}} \quad (24)$$

onde T_R é o tempo de anulação do escoamento de Rosich, U_0 a velocidade inicial do escoamento, H_{man} a altura manométrica, C_2 o coeficiente experimental em função da inclinação da conduta, retirado da Tabela 1 e K_1 o coeficiente experimental que representa, principalmente, o efeito da inércia do grupo eletrobomba, retirado da Tabela 2.

Tabela 1 - Coeficiente de Inclinação da Conduta

H_{man}/L (%)	C_2
≤ 20	1,0
25	0,8
30	0,6
35	0,4
> 40	0

Tabela 2 - 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

O método de Betâmio de Almeida, comparado com o de Rosich, não recorre aos parâmetros C_2 e K_1 mas utiliza outros dois parâmetros. O primeiro é o coeficiente de compensação energética (que se define como sendo o quociente entre a energia cinética das massas giratórias e a energia cinética da coluna líquida), λ_1 , e o segundo o rendimento no ponto de funcionamento em regime permanente, η . O tempo de paragem define-se então como:

$$T_A = \frac{2}{3} (\eta \lambda_1 + 1) \frac{L U_0}{g H_{man}} \quad (25)$$

em que T_A é o tempo de anulação do caudal de Betâmio de Almeida.

A definição da forma e grandeza das envolventes de pressão depende, como foi anteriormente referido, do tempo de paragem. Na Figura 2, apresenta-se o diagrama da envolvente de pressões para o caso de uma manobra instantânea, em que a variação de pressões ΔH é dada por:

Finalmente, para o caso de uma manobra lenta, a forma da envolvente representa-se na Figura 4, em que ΔH é:

$$\Delta H = \frac{a\Delta U}{g} \frac{\mu}{T_p} \quad (28)$$

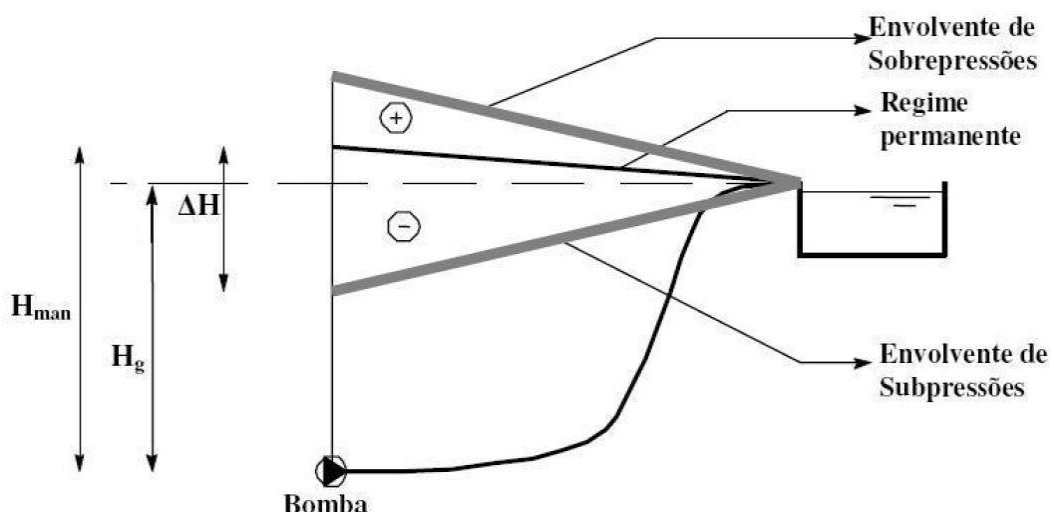


Figura 4 – Envolvente de Manobra Lenta numa Conduta Elevatória (Piqueiro, 2014)

2.2.3. MÉTODOS NUMÉRICOS

Devido ao facto de, como foi referido anteriormente, o estudo de regimes variáveis ser regulado pelas equações fundamentais do equilíbrio dinâmico e da conservação da massa e estas formarem um sistema de equações do tipo hiperbólico, cuja solução exata não pode ser obtida, foram desenvolvidos vários métodos de estudo para chegar a soluções aproximadas.

Como já foi referido no subcapítulo da vertente histórica do estudo do choque hidráulico, durante os séculos em que o estudo se desenvolveu, foram aparecendo métodos numéricos mais ou menos precisos, com mais ou menos simplificações inerentes. Um dos métodos numéricos de maior relevo, numa altura anterior ao uso de métodos computacionais, é o método de Alliévi. Contudo, com o desenvolvimento do cálculo computacional, foram desenvolvidos métodos bem mais complexos, tais como:

- Método das Diferenças Finitas;
- Método dos Elementos Finitos;
- Método Espectral;
- Método dos Elementos de Contorno;
- Método das Características.

Estes métodos, sendo os mais utilizados o das diferenças finitas e o das características, ganharam mais importância sobre os métodos algébricos ou gráficos devido à sua maior precisão (Martins, 2009).

O Método das Características, devido ao facto de poder definir condições de fronteira mais diversas e de ter uma maior eficiência, é o mais utilizado, enquanto o dos Elementos Finitos é utilizado para casos de menor aproximação, não sendo conhecidas as condições de fronteira (Martins, 2009).

2.2.4 CONDIÇÕES FRONTEIRA

Para os métodos numéricos serem possíveis de serem aplicados, é necessário definir as condições de fronteira pois é sobretudo devido a elas que acontece o regime transitório. As condições de fronteira de um sistema hidráulico podem ser, por exemplo, válvulas de retenção, reservatórios, bombas, reservatórios de ar comprimido ou chaminés de equilíbrio.

Segundo Pacheco Figueiredo (1990), no caso de uma conduta elevatória composta pelo grupo elevatório (bomba hidráulica), válvula de retenção imediatamente a jusante da bomba e pela conduta que conduz a água até ao reservatório, as condições de fronteira a considerar são, na secção do reservatório e na secção da bomba hidráulica.

2.2.4.1. Condição Fronteira no Reservatório

A conduta ou descarrega em superfície livre (para a atmosfera) ou para o interior da água do reservatório, portanto para qualquer caudal a carga vai sempre ser constante. Tal é traduzido em:

$$H = H_0 = \text{constante} \quad (29)$$

2.2.4.2. Condição Fronteira na Bomba

Para estabelecer uma condição fronteira na bomba é necessário relacionar os parâmetros que caracterizam o funcionamento desta. Essa relação designa-se por curva característica da bomba. Geralmente, é nesta secção que são geradas as perturbações do escoamento, com a entrada e saída de serviço da mesma.

A bomba tanto pode ter um comportamento ativo ou passivo no escoamento, dependendo de esta ser ou não a responsável pela variação do escoamento. Para o caso que irá ser abordado, mais à frente, a bomba irá ser a responsável pela perturbação do escoamento, logo terá um comportamento ativo. Neste caso, segundo Pacheco Figueiredo (1990) a bomba representa uma condição fronteira dinâmica regida 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 primeira, admite-se que as massas girantes da bomba são rígidas, o que torna possível escrever-se a equação diferencial:

$$M_0 = M_m - M_r = \alpha_b I_0 \quad (30)$$

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 (Pacheco Figueiredo, 1990).

Segundo o mesmo autor, após algumas simplificações e considerações, obtém-se uma equação diferencial das massas girantes, que integrada entre os instantes t_i e t_{i+1} recorrendo a uma técnica de diferenças finitas resulta em:

$$N_{i+1} = N_i - \frac{900\gamma}{\pi^2 I_0} \left[\frac{Q_b H_{man}}{N\eta} \right]_{t_i} \Delta t \quad (31)$$

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_b o caudal na bomba e N a velocidade de rotação da bomba.

A equação (31) é conhecida como a Lei de Paragem da Bomba.

É relevante conhecer o valor do momento de inércia, I_0 , que normalmente é relacionado (como demonstra a equação (32)) com o parâmetro PD^2 . Este parâmetro pode ser estimado, mas é preferível a utilização do valor correspondente a cada caso, consultando o fabricante.

$$PD^2 = 4gI_0 \quad (32)$$

No que diz respeito às curvas características das bombas, que traduzem a relação entre a altura manométrica H_{man} , a velocidade de rotação da bomba N e o caudal bombado Q_b , a sua relação é dada por:

$$H_{man} = AN^2 + BNQ_b - CQ_b^2 \quad (33)$$

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

2.2.5. MÉTODO DAS CARACTERÍSTICAS

Neste método, o fenómeno adota uma lei de propagação de ondas que associa o tempo à abcissa x , que é definida ao longo do comprimento da conduta através da celeridade, a . As equações indefinidas formam um sistema de equações parciais hiperbólicas quase lineares (Pimentel, 2010).

As duas equações de derivadas parciais, as equações fundamentais de equilíbrio dinâmico e de conservação da massa (equações (13) e (21), respetivamente), são transformadas em equações diferenciais integráveis pelo método das diferenças finitas. É de referir que para este método são desprezados os termos convetivos, o que leva a uma versão simplificada dessas equações (Pacheco Figueiredo, 1990).

São obtidas, então, as seguintes equações:

$$L_1 = 0 \Leftrightarrow \frac{\partial Q}{\partial t} + gS \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\lambda |Q| Q}{2DS} = 0 \quad (34)$$

$$L_2 = 0 \Leftrightarrow gS \frac{\partial H}{\partial t} + a^2 \frac{\partial Q}{\partial x} - gQ \sin \theta = 0 \quad (35)$$

onde L_1 e L_2 são as equações diferenciais.

Sendo L_1 e L_2 iguais a zero, a combinação das equações lineares também será nula:

$$L = L_1 + \beta L_2 = 0 \quad (36)$$

em que β é o coeficiente de combinação linear das equações diferenciais.

Resulta, portanto:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \beta a^2 \frac{\partial Q}{\partial x} + \beta g S \left(\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{1}{\beta} \frac{\partial H}{\partial x} \right) + F|Q|Q - \beta g Q \sin \theta = 0 \quad (37)$$

em que F é dado por:

$$F = \frac{\gamma}{2DS} \quad (38)$$

Para cada valor de β corresponde uma equação diferencial, pelo que para um par de valores de β corresponderão duas equações diferenciais ($A_1=0$ e $A_2=0$), equivalentes a (34) e (35):

$$A_1 = L_1 + \beta_1 L_2 = 0 \quad (39)$$

$$A_2 = L_1 + \beta_2 L_2 = 0 \quad (40)$$

Para encontrar as referidas equações diferenciais ordinárias, é do maior interesse escolher dois valores de β que produzam o efeito desejado.

Considerando os diferenciais totais das variáveis dependentes Q e H :

$$dQ = \frac{\partial Q}{\partial t} dt + \frac{\partial Q}{\partial x} dx \quad (41)$$

$$dH = \frac{\partial H}{\partial t} dt + \frac{\partial H}{\partial x} dx \quad (42)$$

Para obter as referidas equações diferenciais ordinárias, pode-se integrar em ordem ao tempo ou em ordem ao espaço. Segundo Pacheco Figueiredo (1990) os dois resultam em equações equivalentes, mas quando se segue o caminho da integração em ordem ao espaço, as equações características C^+ e C^- apresentam formas que se adequam melhor à integração. Por esse mesmo motivo, apenas vai ser demonstrada, no presente trabalho, a integração em ordem ao espaço.

Para tal, é necessário dividir (41) e (42) por dx :

$$\frac{dQ}{dx} = \frac{\partial Q}{\partial t} \frac{dt}{dx} + \frac{\partial Q}{\partial x} \quad (43)$$

$$\frac{dH}{dx} = \frac{\partial H}{\partial t} \frac{dt}{dx} + \frac{\partial H}{\partial x} \quad (44)$$

onde:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{1}{\beta} = \beta a^2 \Rightarrow \frac{dt}{dx} = \frac{1}{\beta a^2} = \beta \quad (45)$$

e:

$$\frac{1}{\beta} = \beta a^2 \Rightarrow \beta = \pm \frac{1}{a} \quad (46)$$

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

$$\frac{dx}{dt} = +a \wedge \beta = +\frac{1}{a} \quad (47)$$

$$\frac{dx}{dt} = -a \wedge \beta = -\frac{1}{a} \quad (48)$$

substituindo na equação (37) as equações (43) e (44), obtêm-se dois novos conjuntos de equações:

- Equações C^+ – onde $\beta = +\frac{1}{a}$:

$$\frac{dH}{dx} + \frac{a}{gS} \frac{dQ}{dx} + \frac{F|Q|Q}{gS} - \frac{Q}{aS} \sin \theta = 0 \quad (49)$$

$$\frac{dx}{dt} = +a \quad (50)$$

- Equações C^- – onde $\beta = -\frac{1}{a}$:

$$\frac{dH}{dx} - \frac{a}{gS} \frac{dQ}{dx} + \frac{F|Q|Q}{gS} + \frac{Q}{aS} \sin \theta = 0 \quad (51)$$

$$\frac{dx}{dt} = -a \quad (52)$$

Considerando uma representação cartesiana das variáveis x e t , na qual cada ponto de uma dada secção x tem como correspondente um instante t , como representa a Figura 5. Considera-se a celeridade a

constante para uma determinada conduta. Assim, a integração de (50) e (52) leva, respetivamente, a (53) e (54):

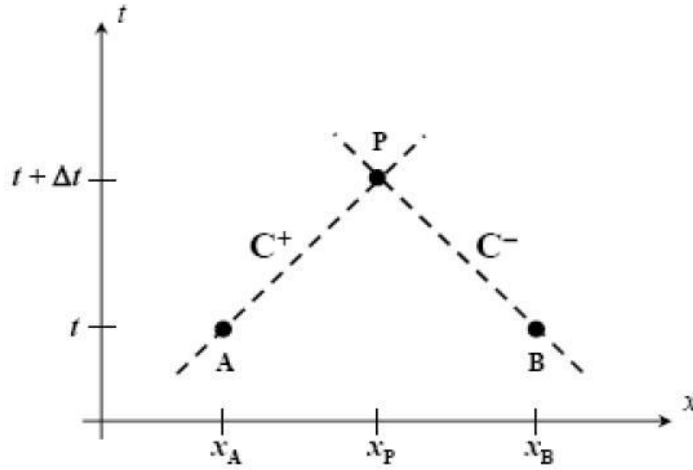


Figura 5 - Linhas Características (Pacheco Figueiredo, 2014)

$$x_P - x_A = a(t_P - t_A) \quad (53)$$

$$x_P - x_B = a(t_P - t_B) \quad (54)$$

em que x_P , x_A , x_B , t_P , t_A e t_B são as abcissas e ordenadas dos pontos representados na Figura 5.

Depois de simplificar as equações (49) e (51), integram-se entre A e P e entre B e P, respetivamente. Desta forma obtém-se um novo conjunto de equações, escritas do seguinte modo:

$$C^+: H_P - H_A + \frac{a}{gS}(Q_P - Q_A) + I^+ = 0 \quad (55)$$

$$C^-: H_P - H_B + \frac{a}{gS}(Q_P - Q_B) + I^- = 0 \quad (56)$$

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

I^+ e I^- correspondem à integração das perdas de carga e do efeito relativo à inclinação da conduta. Estas podem ser escritas, depois de integradas por métodos numéricos aproximados, da seguinte forma mais sintética:

$$I^+ = (1 - K)(R_A T_A)|Q_A|Q_A + K(R_P - T_P)|Q_P|Q_P \quad (57)$$

$$I^- = -(1 - K)(R_B T_B)|Q_B|Q_B - K(R_P + T_P)|Q_P|Q_P \quad (58)$$

K representa o fator de ponderação da integração numérica.

R e T , para uma dada secção da conduta são dados, respetivamente, por (59) e (60):

$$R = \frac{\lambda}{2gDS^2} \Delta x \quad (59)$$

$$T = \frac{\sin \theta}{aS|Q|} \Delta x \quad (60)$$

É possível reescrever as equações características para que, conhecendo os valores de Q e H nas secções A e B , permitam formar um sistema de equações com Q_P e H_P como incógnitas:

$$C^+: H_P + [A + K(R_P - T_P)|Q_P|]Q_P - C_A = 0 \quad (61)$$

$$C^-: H_P - [A + K(R_P + T_P)|Q_P|]Q_P - C_B = 0 \quad (62)$$

isto se as equações (63), (64) e (65) forem consideradas:

$$A = \frac{a}{gS} \quad (63)$$

$$C_A = H_A + [A - (1 - K)(R_A - T_A)|Q_A|]Q_A \quad (64)$$

$$C_B = H_B - [A - (1 - K)(R_B + T_B)|Q_B|]Q_B \quad (65)$$

Refira-se que é necessário, antes de prosseguir com o método, realizar o desdobramento do parâmetro relativo à inclinação da conduta, particularmente no que diz respeito à secção P , como ilustra a Figura 6, pois quando há uma mudança de inclinação neste ponto, o parâmetro T toma valores diferentes à esquerda e à direita.

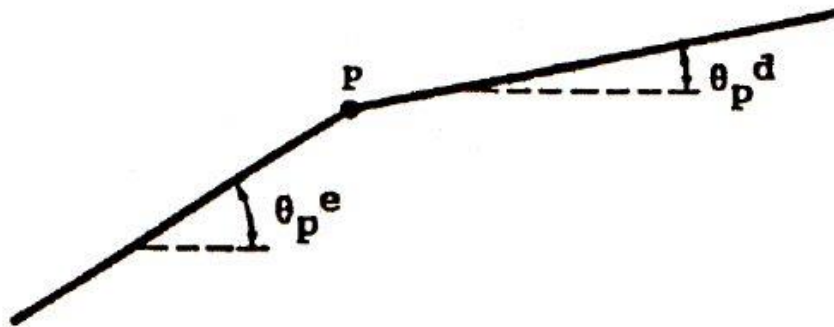


Figura 6 - Mudança de Inclinação da Conduta (Pacheco Figueiredo, 1990)

Tendo esta mudança em conta, o cálculo é retomado com a soma e subtração ordenada das equações características (61) e (62), que resolvendo em ordem a H_P e Q_P , respetivamente, resulta em:

$$H_P = \frac{K(T_P^e + T_P^d)|Q_P|Q_P + C_A + C_B}{2} \quad (66)$$

$$Q_P = \frac{C_A - C_B}{A_1} \quad (67)$$

com A_1 sendo definido por:

$$A_1 = A + \sqrt{A^2 + 2K\left(R_P + \frac{T_P^d}{2} - \frac{T_P^e}{2}\right)|C_A - C_B|} \quad (68)$$

É de realçar que para uma integração numérica que valoriza de igual modo a perda de carga e a inclinação da conduta, é conveniente usar o fator de ponderação $K=0.5$ (Pacheco Figueiredo, 1990).

Com as equações características definidas, resta definir as condições de fronteira correspondentes ao sistema elevatório em causa. Nesta dissertação, irá ser abordado um sistema composto por um grupo eletrobomba e um RAC - Reservatório de Ar Comprimido na fronteira montante e por um reservatório na jusante. Na primeira abordagem, como irá ser descrito no devido capítulo, irá ser estudada apenas a presença do grupo eletrobomba na fronteira jusante.

2.2.5.1. Condição Fronteira no Reservatório

Como já foi referido, no reservatório a carga é constante e igual à cota da extremidade jusante da conduta, no caso de descarga para a atmosfera, ou da superfície livre da água, quando a água é descarregada no fundo, como ilustra a Figura 7:

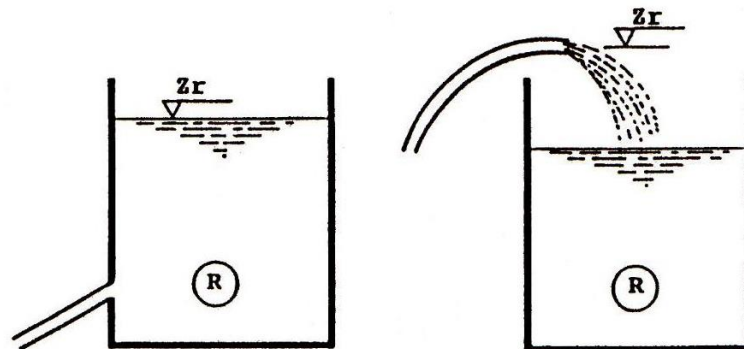


Figura 7 - Carga no Reservatório (Pacheco Figueiredo, 1990)

Ao substituir a equação característica C , equação (62), por uma condição de fronteira adequada obtém-se a carga a montante da extremidade da conduta:

$$H_P = Z_R + K_L |Q_P| Q_P \quad (69)$$

em que K_L é o coeficiente de perda de carga localizada na extremidade da conduta. Introduzindo a igualdade de H_P , (69), na equação característica C^+ , (61), resulta:

$$(K_L + KR_P - KT_P^e) |Q_P| Q_P + A Q_P - C_A + Z_R = 0 \quad (70)$$

e que, depois de simplificada, se poderá escrever em ordem a Q_P :

$$Q_P = \frac{2(C_A - Z_R)}{A_2} \quad (71)$$

sendo A_2 dado por:

$$A_2 = A + \sqrt{A^2 + 4(K_L + KR_P - KT_P^e) |Z_R - C_A|} \quad (72)$$

H_P é obtido por substituição do caudal assim determinado em (61) e (69).

2.2.5.2. Condição Fronteira no Grupo Elevatório

Para o grupo elevatório, a equação característica C^+ , (61), é substituída pela equação da curva característica da bomba:

$$H_P = GN^2 + BNQ_P - CQ_P^2 \quad (73)$$

De notar que o parâmetro G surge aqui em substituição do parâmetro A que foi utilizado na equação (33) para evitar confusão com o parâmetro A definido em (63).

Inserindo (73) na equação característica C^- , (62), resulta, após simplificações de escrita e a consideração de $K=0$, para uma integração numérica explícita:

$$-CQ_P^2 + (BN - A)Q_P + GN^2 - C_B = 0 \quad (74)$$

cuja raiz positiva é expressa por:

$$Q_P = \frac{(BN - A)}{2C} \frac{1}{2C} \sqrt{(BN - A)^2 + 4C(GN^2 - C_B)} \quad (75)$$

Esta solução só é válida se $C_B \leq GN^2$. Se isso não acontecer e como geralmente $A \gg BN$, deve-se assumir $Q_P = 0$, para evitar uma solução negativa que será impossível visto existir uma válvula de retenção imediatamente a jusante da bomba, que evita o contra fluxo.

2.2.5.3. Condição de Fronteira no RAC

A presença de um RAC no processo de cálculo do Método das Características introduz cinco novas incógnitas e outras tantas equações no método. As incógnitas são:

- Q_{RAC} – Caudal à saída/entrada do RAC;
- Q_P – Caudal na ligação do RAC à conduta (ponto P);
- H_{RAC} – Carga no RAC;
- P_{RAC} – Altura piezométrica absoluta do ar no RAC;
- V_{RAC} – Volume de ar no RAC.

Para resolver essas equações, é necessário recorrer a um processo iterativo.

Tendo em conta a Figura 8, que representa a ligação do RAC à conduta elevatória, tem-se a expressão (76) que traduz a lei de continuidade no RAC.

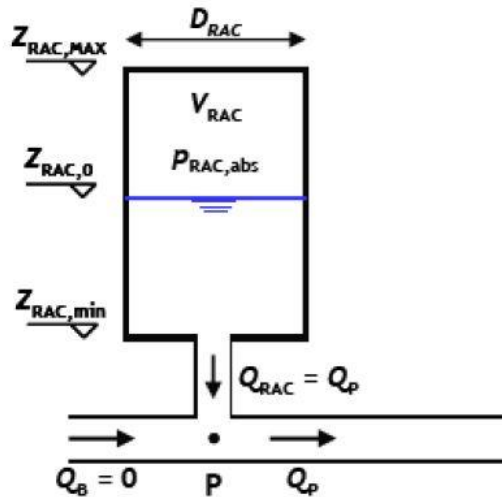


Figura 8 - Esquema de Ligação do RAC à Conduta Elevatória (Pacheco Figueiredo, 2014)

$$Q_P = Q_B + Q_{RAC} \quad (76)$$

Admitindo uma paragem instantânea dos grupos elevatórios, tem-se que:

$$Q_B = 0 \Rightarrow Q_P = Q_{RAC} \quad (77)$$

Segundo Pacheco Figueiredo (2014), a primeira das equações a definir é o volume de ar no RAC, que se dá pela expressão:

$$V_{RAC}(t + \Delta t) = V_{RAC}(t) + [(1 - K)Q_P(t)\Delta t + KQ_P(t + \Delta t)]\Delta t \quad (78)$$

A segunda expressa a relação entre o volume de ar e água no reservatório e a cota topográfica da superfície livre da água no RAC:

$$Z_{RAC}(t + \Delta t) = \frac{4V_{RAC}(t + \Delta t)}{\pi(D_{RAC})^2} - Z_{RAC,MÁX} \quad (79)$$

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

Segue-se a expressão politrópica de estado do ar confinado no reservatório, considerando a incompressibilidade da água:

$$PV^\alpha = constante \Leftrightarrow P_{RAC} = P_{RAC,0} \left(\frac{V_{RAC,0}}{V_{RAC}} \right)^\alpha \quad (80)$$

sendo $P_{RAC,0}$ e $V_{RAC,0}$ os valores iniciais da altura piezométrica absoluta e volume de ar, respetivamente. O expoente α é fator politrópico, cujo valor vai depender do processo termodinâmico do ar. Se for isotérmico, para a situação de gás perfeito, toma o valor unitário enquanto se for adiabático toma o valor de 1,4. A solução real anda sempre entre estes dois valores. (Pacheco Figueiredo, 2014)

A quarta equação a referir é a carga no RAC, que é determinada a partir de:

$$H_{RAC} = P_{RAC} + Z_{RAC} - P_A \quad (81)$$

Quando resultar um valor negativo para Q_B , devido à presença da válvula de retenção, esse valor é anulado (passa a ser nulo). A equação característica C^- (representada na Figura 9), na extremidade montante da conduta (grupo elevatório e RAC), no instante $t + \Delta t$ e para a primeira secção da malha de aplicação do Método das Características a jusante do grupo elevatório e RAC no instante t , é escrita da seguinte maneira:

$$C^-: H_P - [A + KR_P|Q_P|]Q_P - C_B = 0 \quad (82)$$

onde:

$$C_B = H_P - [A + KR_P|Q_P|]Q_P \quad (83)$$

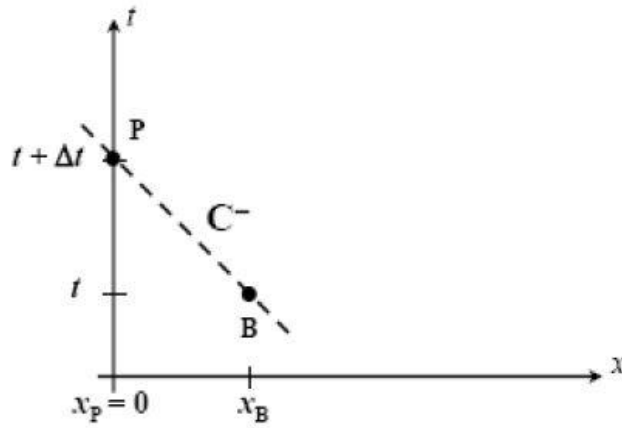


Figura 9 - Método das Características: Fronteira Montante (Pacheco Figueiredo, 2014)

Escrevendo em ordem ao caudal, resulta a quinta equação:

$$Q_P = \frac{2(H_P - C_B)}{A_3} \quad (84)$$

sendo:

$$A_3 = A + \sqrt{A^2 + 4(KR_P + K_{RAC}|C_B - H_{RAC}|)} \quad (85)$$

A última equação a definir é a da carga no ponto de inserção do tubo de ligação do RAC à conduta. Quando a igualdade das cargas entre o escoamento da conduta principal e o do RAC é desfeita devido à perda de carga na tubeira (que será descrita mais à frente, quando for apresentado o equipamento de proteção-RAC), a carga no ponto P é:

$$H_P = H_{RAC} - K_{RAC}|Q_{RAC}|Q_{RAC} \quad (86)$$

Estão portanto descritas as seis equações a utilizar no método iterativo. O processo inicia-se tomando como primeira aproximação $Q_P(t + \Delta t) = Q_P(t)$. Depois de conhecidas as variáveis para um instante t , a sua determinação no instante seguinte $(t + \Delta t)$ inicia-se pela equação(76).

As seis equações em causa são resolvidas pela ordem apresentada, obtendo um novo valor de Q_P que é inserido novamente na primeira equação. O processo é repetido sucessivamente até que as diferentes variáveis apresentem variações inferiores a um limite estabelecido (erro). Dá-se então por concluído o processo iterativo para um determinado instante, passando-se ao instante seguinte.

2.3. CAVITAÇÃO. ROTURA DA VEIA LÍQUIDA

Aquando do fenómeno do choque hidráulico poderão ocorrer pressões num troço da conduta que atinjam valores próximos dos da tensão de vapor do líquido. As características do escoamento, no caso de isso se verificar, alteram-se por aparecer uma fase gasosa não dissolvida, resultante não só da vaporização do líquido mas também da difusão de gases nele dissolvidos. Esta fase poderá aparecer e desaparecer num curto período de tempo, até que fenómenos dissipativos atenuem as variações de pressão. O desaparecimento brusco da fase gasosa é, geralmente, seguido de sobrepressões elevadas que poderão pôr em risco o sistema elevatório e por isso mesmo a ocorrência de valores de pressão próximos dos da tensão de vapor do líquido, durante um regime transitório, é algo a evitar no dimensionamento de um sistema elevatório (Betâmio de Almeida, 1981).

Segundo Betâmio de Almeida (1981) podem-se identificar, simplifcadamente, dois tipos de cavitação: rotura da veia líquida ou separação da coluna e escoamento bolhoso ou cavitante.

No primeiro tipo, a fase gasosa concentra-se em determinados pontos da conduta, preenchendo a quase totalidade da respetiva secção transversal, o que provoca uma clara descontinuidade na coluna líquida (Figura 10). Este fenómeno tende a verificar-se nos pontos altos intermédios da conduta ou em secções vizinhas do órgão obturador.

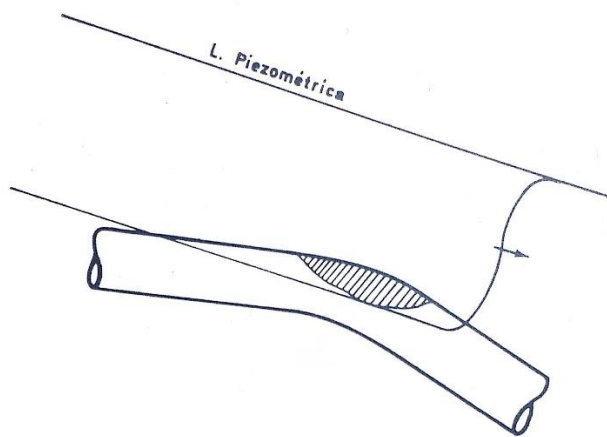


Figura 10 - Rotura da Veia Líquida (Betâmio de Almeida, 1981)

Na cavitação com escoamento bolhoso ou cavitante (Figura 11), a fase gasosa aparece difundida por um comprimento considerável da conduta sob a forma de um elevado número de bolhas de dimensões variadas. Este tipo de cavitação ocorre mais em condutas horizontais ou em trechos com declive inferior ao declive da linha piezométrica em regime permanente.

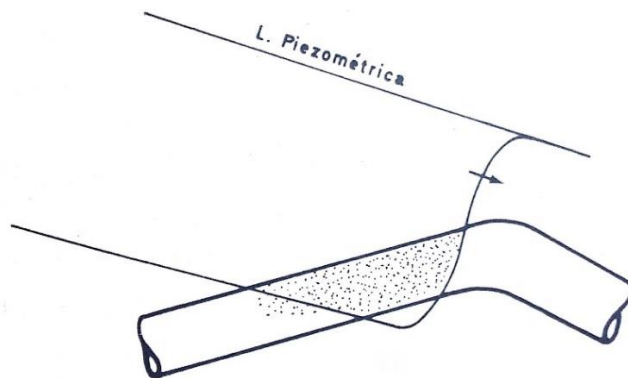


Figura 11 - Escoamento Bolhoso (Betâmio de Almeida, 1981)

Por norma, o tipo de cavitação analisado é o da rotura da veia líquida, considerando algumas hipóteses simplificadoras e recorrendo a métodos analíticos ou gráficos.

2.4. DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO

Os sistemas elevatórios dispõem de dispositivos que atenuam os efeitos das ondas de choque. Estes têm de ser selecionados depois de analisados os excessos e variações de pressão que possam colocar em risco o sistema.

Dentro dos vários tipos de dispositivos existentes, a opção por um dispositivo ou por uma solução com vários deve ter em conta tanto características do sistema elevatório em questão, como o tipo de conduta ou topografia, e também considerações económicas, construtivas e de segurança.

Serão abordados de seguida, de modo conciso, os principais dispositivos de proteção contra os efeitos do choque hidráulico.

2.3.1. VOLANTE DE INÉRCIA

O volante de Inércia consiste numa massa adicional acoplada ao veio do grupo eletrobomba (Figura 12 e Figura 13) que aumenta o valor do parâmetro PD^2 , ou seja o momento de inércia das massas girantes do grupo. Atua principalmente na diminuição das pressões mínimas, não controlando suficientemente a envolvente de pressões máximas.

Este dispositivo tem duas fases distintas de funcionamento: na primeira 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 das perdas de carga.

O aumento do tempo de paragem constitui uma limitação, pois assim este dispositivo será apenas aplicável a condutas de extensão até cerca de 2.000 m. Grandes Volantes de Inércia podem apresentar inconvenientes de natureza elétrica e mecânica e também dificuldades no arranque dos grupos e esforços nas chumaceiras. (Costa, 2011)

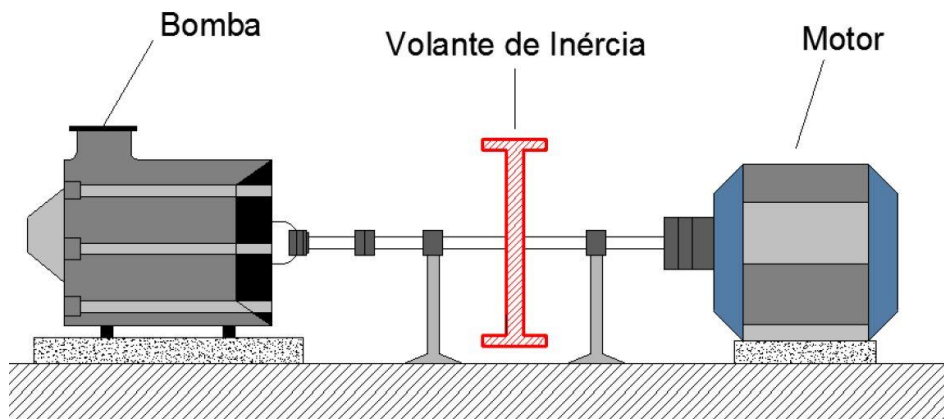


Figura 12 - Representação de um Volante de Inércia (Martins, 2009)



Figura 13 - Instalação com Volante de Inércia [1]

2.3.2. CHAMINÉ DE EQUILÍBRIO

Este dispositivo consiste num reservatório com superfície livre, que mobiliza o efeito de oscilação em massa para transferência de volumes de água com a conduta em função das solicitações impostas pelo regime transitório. É um dispositivo menos utilizado por necessitar de obras de construção civil mais complexas. São normalmente utilizadas em centrais hidroelétricas, entre a galeria sob pressão e a conduta forçada.

As Chaminés de Equilíbrio apresentam um comportamento reversível, pois atuam não só no controlo das pressões máximas mas também das pressões mínimas. Não consomem energia elétrica e a manutenção requerida é reduzida.

Por serem estruturas muito grandes, provocam um elevado impacto visual. Um exemplo de uma Chaminé de Equilíbrio é apresentado na Figura 14. (Costa, 2011)



Figura 14 - Chaminé de Equilíbrio [2]

2.3.3. RESERVATÓRIO UNIDIRECIONAL

Reservatório Unidirecional (RUD), esquematizado na Figura 15, consiste num reservatório, de dimensões menores à chaminé de equilíbrio, que contém água e ar, ligado à conduta elevatória por uma conduta de pequeno diâmetro. Permite controlar depressões na conduta com a entrada de água na mesma, mas devido à existência de uma válvula de retenção é impedida a entrada de água no reservatório, o que faz com que não seja um dispositivo útil no controlo das sobrepressões.

Os RUD apresentam um funcionamento favorável quando as cotas do plano de água e da superfície livre no reservatório de jusante estão próximas. Têm, porém, dificuldades em proteger trechos de conduta mais afastados deste. (Martins, 2009)

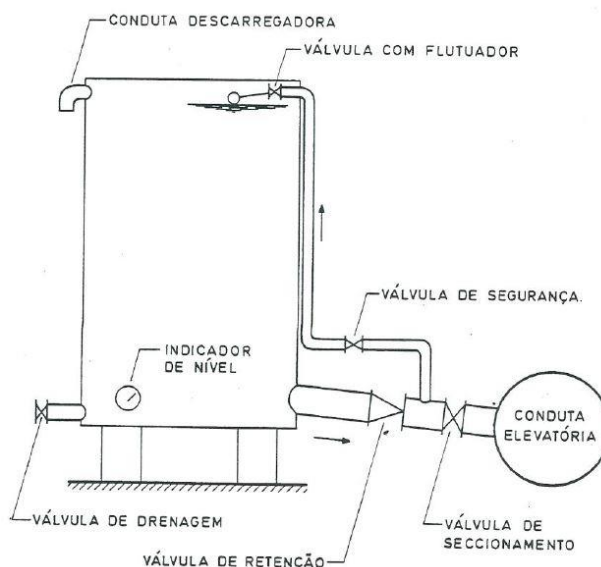


Figura 15 - Esquema de um Reservatório Unidirecional (Mendes, 2011)

2.3.4. CONDOTA DE ASPIRAÇÃO PARALELA

Conduto de Aspiração Paralela (CAP), dispositivo também conhecido por “by-pass”, atua na proteção de depressões resultantes do fenómeno de choque hidráulico. Na Figura 16 apresenta-se um exemplo de uma CAP.

A rápida diminuição de caudal elevado, durante o regime transitório, gera na secção da conduta imediatamente a jusante das válvulas de retenção dos grupos eletrobomba uma diminuição de pressão e, pelo contrário, na secção a montante um aumento da mesma. A CAP, instalada entre o reservatório de montante e a conduta elevatória a jusante dos grupos eletrobomba, possibilita que chegue à bomba um caudal adicional, durante o tempo em que o valor da cota piezométrica instantânea na secção de jusante da conduta for inferior ao correspondente à extremidade montante. Este dispositivo permite, então, aumentar o tempo de anulação do caudal e, portanto, diminuir o valor da cota piezométrica mínima na secção a jusante do “by-pass”.

Para que o seu funcionamento seja adequado, é necessário que o reservatório de montante apresente 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 dos grupos eletrobomba. Tem uma eficácia limitada na proteção de depressões excessivas, especialmente nos pontos mais elevados. (Betâmio de Almeida e Martins, 1999)

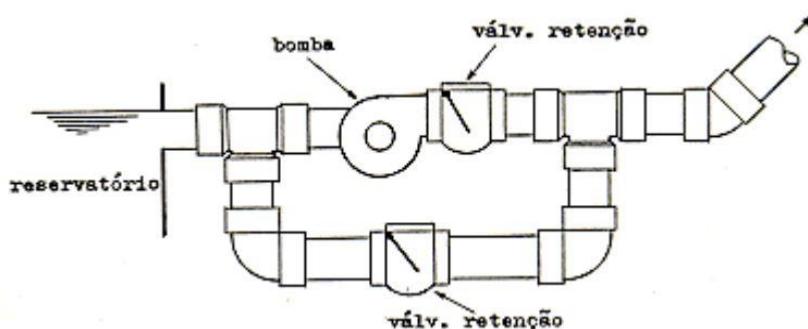


Figura 16 - Conduta de Aspiração Paralela (Camargo, 1989)

2.3.5. VÁLVULA DE DESCARGA AUTOMÁTICA

Válvula de Descarga Automática (VDA), também conhecida por Válvula de Alívio, consiste num dispositivo que estabelece uma ligação temporária com o exterior, sendo normalmente controlada por uma mola que aciona um tampão (Figura 17).

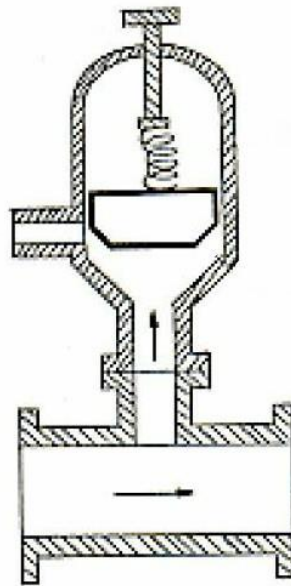


Figura 17 - Esquema de uma Válvula de Descarga Automática (Camargo, 1989)

Essa mola está calibrada para uma dada pressão para que em regime permanente a válvula se encontre fechada e que quando essa pressão é ultrapassada a válvula abre, evacuando caudal “em excesso”. É um dispositivo que controla apenas as sobrepressões. Isto acontece porque a energia de pressão é transformada em energia cinética (escoamento para o exterior) e energia potencial (mola).

A sua eficácia é tanto maior quanto maior for a altura de elevação geométrica, permitindo a adoção de válvulas mais económicas. Algumas válvulas deste tipo podem funcionar como ventosas, permitindo a entrada de ar na conduta.

É de realçar que este tipo de dispositivo requer uma manutenção periódica para ajustes na calibração da mola e requer também a instalação de acessórios suplementares para receção e escoamento de água descarregada para o exterior. É um dispositivo que não consegue evitar a rotura da veia líquida e a ocorrência de elevadas depressões. (Pimentel, 2010)

2.3.6. RESERVATÓRIO DE AR COMPRIMIDO

O Reservatório de Ar Comprimido (RAC) é um reservatório de água fechado com ligação permanente à conduta a proteger (Figura 18 e Figura 19). Contém no seu interior um gás comprimido, que na generalidade é ar. Atualmente é um dos dispositivos de proteção contra os efeitos dos regimes transitórios mais utilizado. É o dispositivo principal de proteção contra o choque hidráulico utilizado na Estação Elevatória que será estudada nesta dissertação.

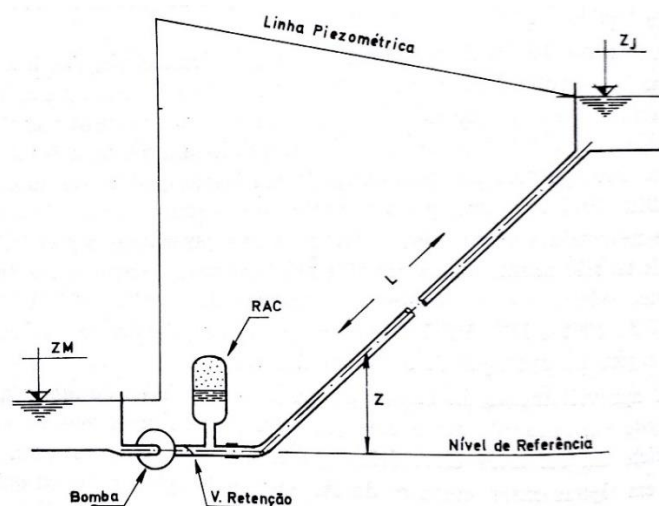


Figura 18 – Conduta Elevatória Protegida com RAC (Betâmio de Almeida, 1981)

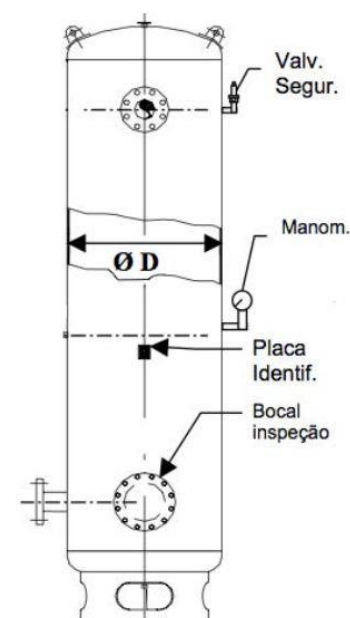


Figura 19 - Layout de um RAC [3]

A ligação à conduta é feita geralmente com a presença de um estrangulamento, denominado de tubeira. Este estrangulamento tem como objetivo introduzir perdas de carga enquanto se dão as trocas de volumes entre a conduta e o RAC. A forma desta tubeira permite uma maior perda de carga na entrada de água no RAC (situação de sobrepressão) em comparação à saída (situação de depressão), para o mesmo caudal.

Segundo Pacheco Figueiredo (1990), a expressão que permite calcular a perda de carga na tubeira é deduzida da fórmula da perda de carga localizada num estreitamento brusco:

$$\Delta H_l = \left(1 - \frac{S_r}{S_c}\right)^2 + \frac{1}{9} \frac{U_r^2}{2g} \quad (87)$$

em que U_r é a velocidade média numa secção do tubo de ligação do RAC à conduta, S_r a área da secção do tubo de ligação do RAC à conduta, S_c a secção contraída na tubeira definida em (88).

$$S_c = \frac{\pi(C_c d)^2}{4} \quad (88)$$

sendo d o diâmetro da tubeira e C_c o coeficiente de contração.

S_r é a secção do tubo que liga o RAC à conduta elevatória, dependente do respetivo diâmetro D_l :

$$S_r = \frac{\pi D_l^2}{4} \quad (89)$$

Substituindo a velocidade U_r pelo quociente entre o caudal e a secção do tubo de ligação RAC-conduta e introduzindo (88) e (89) em (87), obtém-se:

$$\Delta H_{tb} = \frac{8}{g\pi^2 D_l^4} \left[1 - \left(\frac{D_l}{C_c d} \right)^2 \right]^2 + \frac{1}{9} Q_r^2 \quad (90)$$

Note-se que como foi referido acima, o valor da perda de carga à entrada é superior à da saída e isto explica-se porque o valor do coeficiente de contração é diferente para os dois casos. Enquanto que para a saída toma valores entre 0,9 e 1,0, para a entrada desce para valores próximos de 0,7. O escoamento na tubeira é representado na Figura 20.

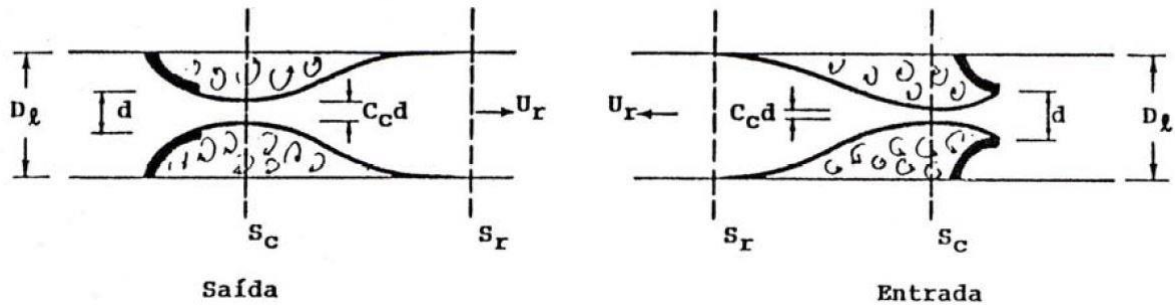


Figura 20 - Escoamento na Tubeira (Pacheco Figueiredo, 1990)

O RAC é um dispositivo de proteção reversível pois, tal como as chaminés de equilíbrio, controla tanto as sobrepressões como as depressões máximas. O ar funciona então como uma mola, que “empurra” a água em situações de depressão, alimentando a conduta com os volumes em falta e recebendo os volumes em excesso quando o escoamento inverte o sentido. Estas trocas entre o RAC e a conduta e a respetiva variação de pressão dentro deste estão esquematizadas na Figura 21. As trocas de volumes dão-se sucessivamente até que se estabeleça o regime permanente. O volume de ar é controlado por compressores e sistemas de controlo de pressão. (Martins, 2009)

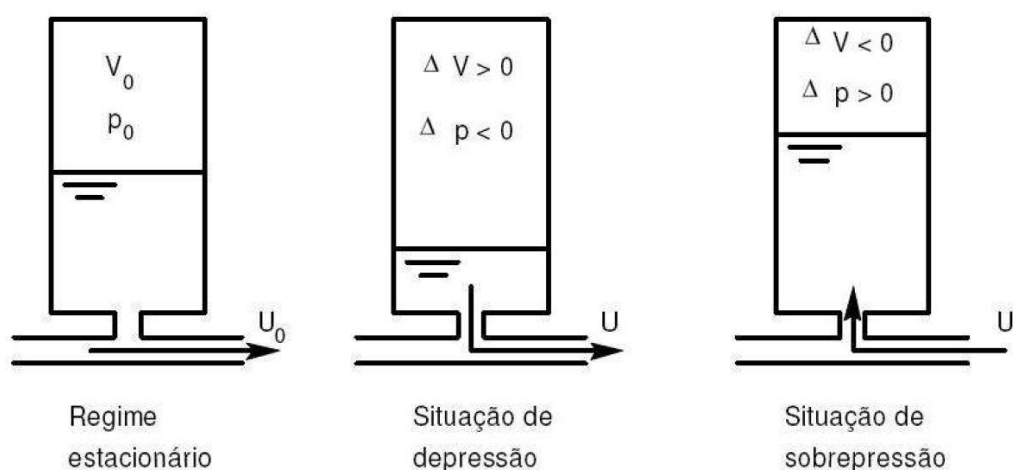


Figura 21 - Fases de Funcionamento de um RAC (Piqueiro, 2014)

Há diversos tipos de RAC, com ou sem membrana a separar o gás e água, verticais ou horizontais e com capacidades desde as dezenas de litros até às dezenas de milhares de litros. Este dispositivo tem, no entanto, as suas desvantagens:

- Em certos casos necessita de ser instalado em divisões criadas propositadamente para o acolher, devido a exigências legais, que obrigam a que equipamentos com uma certa pressão sejam protegidos;
- Necessita de manutenção e controlo permanente do seu funcionamento;
- Aplicável a condutas até 10.000 m;
- Custo elevado do sistema de proteção: Reservatório e acessórios.

3

CASO DE ESTUDO: SISTEMA ELEVATÓRIO DO “MOLHE SUL”

3.1. DESCRIÇÃO GERAL

O sistema elevatório de águas residuais escolhido para análise do fenómeno de choque hidráulico integra o subsistema de saneamento da ETAR do Ave. Este subsistema faz parte do sistema multimunicipal de abastecimento de água e de saneamento do Norte de Portugal, que foi criado a 30 de Junho de 2015 através do Decreto-Lei nº. 93/2015, por agregação das anteriores entidades gestoras: Águas do Douro e Paiva, S.A., da Águas de Trás-os-Montes e Alto Douro, S.A., da Simdouro – Saneamento do Grande Porto, S.A. e da Águas do Noroeste, S.A.

Águas do Norte é a entidade gestora do sistema multimunicipal em “alta” 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 sépticas.

Há, neste subsistema, mais quatro estações elevatórias de águas residuais além da que será alvo de estudo. Tratam-se das estações elevatórias do Estaleiro, Azurara, Vila do Conde e Formariz.

Irá então, no subcapítulo seguinte, ser introduzido e descrito este sistema elevatório e seus constituintes relevantes para o estudo a ser realizado no capítulo 4.

3.2. DESCRIÇÃO DO SISTEMA ELEVATÓRIO DO “MOLHE SUL”

O Sistema Elevatório do “Molhe Sul” iniciou o seu funcionamento em 2010 e foi projetado para o ano horizonte de 2038. Localiza-se no concelho de Vila do Conde, mais precisamente junto à Marina da Póvoa de Varzim (que se situa praticamente na fronteira que divide os dois concelhos). Recebe caudais provenientes de duas estações elevatórias: estação elevatória do Forte, com um caudal de 420 L/s e a estação elevatória de Vila do Conde, com um caudal de 300 L/s. Recebe também, graviticamente, caudais de águas residuais geradas nas bacias de drenagem VCD7 a VCD10, VCD12 e VCD13.

O Sistema Elevatório do “Molhe Sul” é constituído pelo reservatório de montante, que é o poço de bombagem, grupos elevatórios (ambos incluídos no edifício da estação elevatória), pela conduta elevatória e pelo reservatório de jusante, que consiste numa câmara de transição de regime (onde se dá a troca de escoamento sob pressão para escoamento em superfície livre). Depois de se efetuar a troca de regime, os caudais são transportados graviticamente até à ETAR do Ave. A estação elevatória dispõe também de diversos equipamentos que integram o sistema elevatório, como por exemplo a gradagem e válvulas, mas para o presente estudo, apenas se referenciará o Reservatório de Ar Comprimido, pois é o principal dispositivo de proteção do sistema elevatório contra o choque hidráulico.

A localização da estação elevatória está representada na Figura 22 (assinalada pelo triângulo amarelo) e o edifício na Figura 23.



Figura 22 - Localização da Estação Elevatória "Molhe Sul" (Adaptado de Google Earth)



Figura 23 - Estação Elevatória "Molhe Sul"

3.2.1. RESERVATÓRIO DE MONTANTE

Como foi referido anteriormente, este reservatório equivale ao poço de bombagem sendo, portanto, o órgão que faz o amortecimento dos caudais afluentes para os caudais que irão posteriormente ser bombados. É, logicamente, dimensionado para níveis de funcionamento que promovam um número de arranques dos grupos elevatórios razoável.

O poço de bombagem do Sistema Elevatório do “Molhe Sul” tem um volume total e útil de 246 m³ e 150 m³, respetivamente. O seu nível de funcionamento oscila entre os 4 e os 6 m e o seu fundo está à cota -5,1 m. Para efeitos de cálculo, utilizou-se um valor da cota do nível do reservatório de montante de 0 m por se tratar do nível intermédio de funcionamento do mesmo e por, depois de se efetuar uma análise de sensibilidade, o uso de outros valores (entre -1,5 e 1 m) não influenciariam os valores das pressões em mais do que 1 m.c.a., no pior dos casos.

É importante referir que a montante do poço, ainda dentro do edifício da Estação Elevatória, há um sistema de gradagem para que possa haver um controlo do material prejudicial ao funcionamento dos grupos elevatórios.

3.2.2. GRUPOS ELEVATÓRIOS

O sistema dispõe de quatro grupos eletrobomba, trabalhando apenas três no máximo em simultâneo (em paralelo), ficando o quarto de reserva. Note-se que há uma rotação dos grupos em funcionamento, para que não haja um que fique de reserva por muito tempo. Os grupos são de eixo horizontal e de instalação em poço seco. Na Figura 24 são visíveis três dos quatro grupos elevatórios instalados.

Foram instalados quatro grupos da marca *Sulzer* e modelo ABS AFP 3002 – ME2000/4-63 com capacidade de bombagem superior ao projetado e, portanto, a instalação dispõe de redutores de frequência (Figura 25) que induzem os pontos de funcionamento projetados. As bombas instaladas têm uma frequência de 50 hertz e os redutores fazem com que para quando trabalha uma bomba apenas a frequência reduza para os 42,7 hertz e para quando trabalham duas ou três a frequência de cada uma baixe para 49,8 hertz. Os caudais bombados andam, normalmente, por volta dos 270 L/s, 667 L/s e 833 L/s para uma, duas e três bombas respetivamente.



Figura 24 - Grupos Elevatórios Instalados (Fotografia do Prof. Francisco Piqueiro)



Figura 25 - Dois dos Quatro Variadores de Frequência Existentes

De seguida serão apresentadas algumas características dos grupos elevatórios, utilizadas no cálculo das envolventes de pressão.

3.2.2.1. Curva Característica da Bomba (CCB)

Como para esta instalação, existe uma redução da frequência e por esta variar com o número de bombas em funcionamento teve de se proceder a relações de semelhança entre o número de rotações e a altura manométrica e o caudal bombado para traçar as curvas características das frequências instaladas. As relações de semelhança utilizadas estão apresentadas nas expressões (91) (92):

$$\frac{H_2}{H_1} = \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2 \quad (91)$$

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{N_2}{N_1} \quad (92)$$

em que H_1 e H_2 representam a altura manométrica no ponto 1 e 2 respetivamente, Q_1 e Q_2 o caudal e N_1 e N_2 o número de rotações da bomba.

A seguir são apresentadas as CCB para cada combinação: um, dois ou três grupos em funcionamento e os valores utilizados para as obter.

Para o caso de uma bomba, sabendo que trabalha a 42,7 Hz que equivale a 1.284 rpm, utilizaram-se as relações de semelhança (91) e (92) para obter a curva dessa bomba, relacionando-a com a original, que se sabe que funciona a 1.480 rpm.

A CCB original é apresentada na Figura 26.

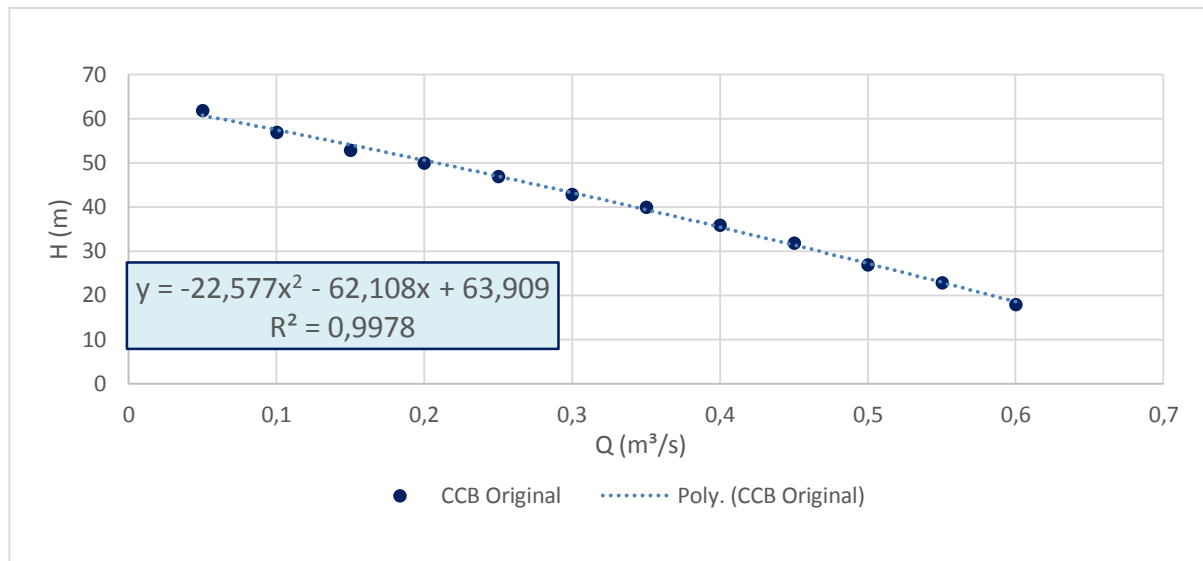


Figura 26 - CCB Bomba Original a 50 Hz

A equação polinomial foi obtida por regressão a partir do gráfico da curva característica fornecido pelo fabricante, mas não está de acordo com o formato descrito em (33), mas com a terceira parcela a somar em vez de subtrair. Após fazer as alterações necessárias para estar escrita no formato correto, obtém-se:

$$H_b = (2,9E - 05)N^2 - (4,2E - 02)NQ_b - (22,6) Q_b^2 \quad (93)$$

Utilizando as condições de semelhança, obteve-se a Curva Característica do funcionamento de uma bomba na instalação para $N=1.284$ rpm, representada na Figura 27.

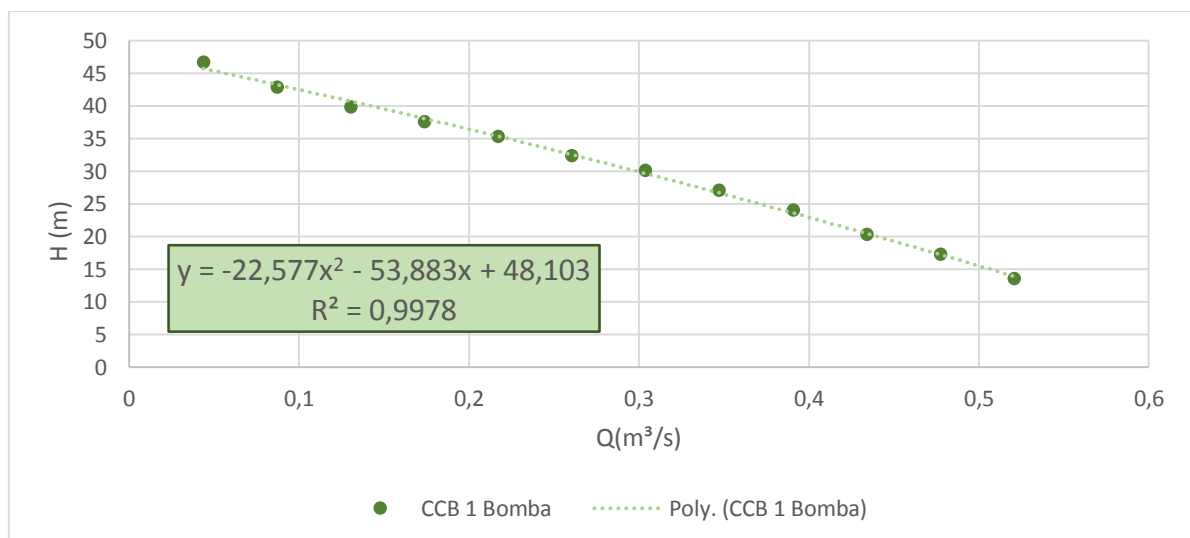


Figura 27 - CCB 1 Bomba a 42,7 Hz

A equação obtida é dada por:

$$H_b = (2,9E - 05)N^2 - (4,2E - 02)NQ_b - (22,6)Q_b^2 \quad (94)$$

Para o caso de funcionamento de duas e três bombas, foi utilizado o mesmo procedimento, mas para uma nova rotação. Obteve-se a uma curva característica de uma bomba, representada na Figura 28 e expressa por:

$$H_b = (2,9E - 05)N^2 - (4,2E - 02)NQ_b - (22,6)Q_b^2 \quad (95)$$

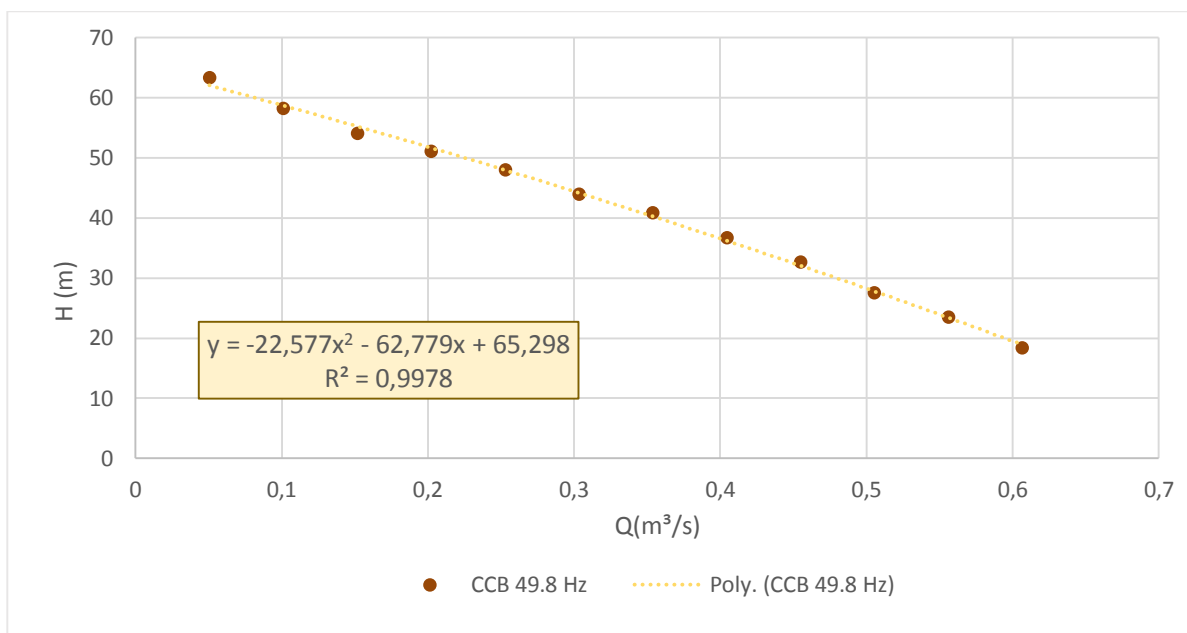


Figura 28 – CCB 1 Bomba a 49,8 Hz

Visto que a equação (95) é a CCB de apenas uma bomba a uma frequência de 49,8 Hz e que, como esta frequência apenas se verifica quando estão duas ou três bombas em funcionamento na instalação, fez-se a adaptação para esse funcionamento. Quando se associam bombas, há uma alteração dos parâmetros dependentes do caudal. O termo linear é dividido pelo número de bombas associadas e o termo ao quadrado pelo número de bombas associadas ao quadrado. Assim, para o funcionamento de duas bombas, a CCB é:

$$H_b = (2,9E - 05)N^2 - (2,1E - 02)NQ_b - (5,6)Q_b^2 \quad (96)$$

e para o caso de três bombas:

$$H_b = (2,9E - 05)N^2 - (1,4E - 02)NQ_b - (2,5)Q_b^2 \quad (97)$$

3.2.2.2. Curva de Rendimento

Para o caso das Curvas de Rendimento foi utilizado um processo idêntico ao das CCB. Partindo do gráfico fornecido pelo fabricante, apresentado na Figura 29.

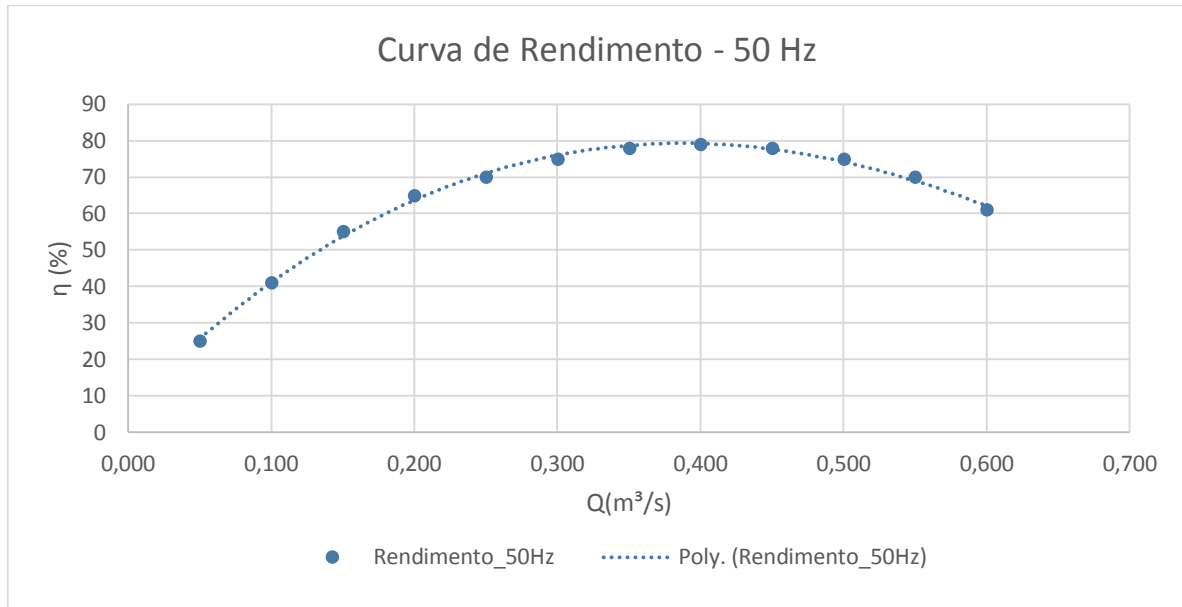


Figura 29 - Curva de Rendimento Bomba Original a 50 Hz

A curva obtida é dada por:

$$\eta = (169,9)Q_b^3 - (612,4)Q_b^2 + (397,6)Q_b + 7,3 \quad (98)$$

Utilizando os valores dos caudais da bomba a funcionar a 42,7 Hz (1.284 rpm), obtidos anteriormente com o recurso à relação de semelhança (92) e mantendo os rendimentos da bomba original, obteve-se a Curva de Rendimento para o funcionamento de uma bomba na instalação (42,7 Hz), representada na Figura 30 e definida pela expressão:

$$\eta = (260,2)Q_b^3 - (813,7)Q_b^2 + (458,3)Q_b + 7,3 \quad (99)$$

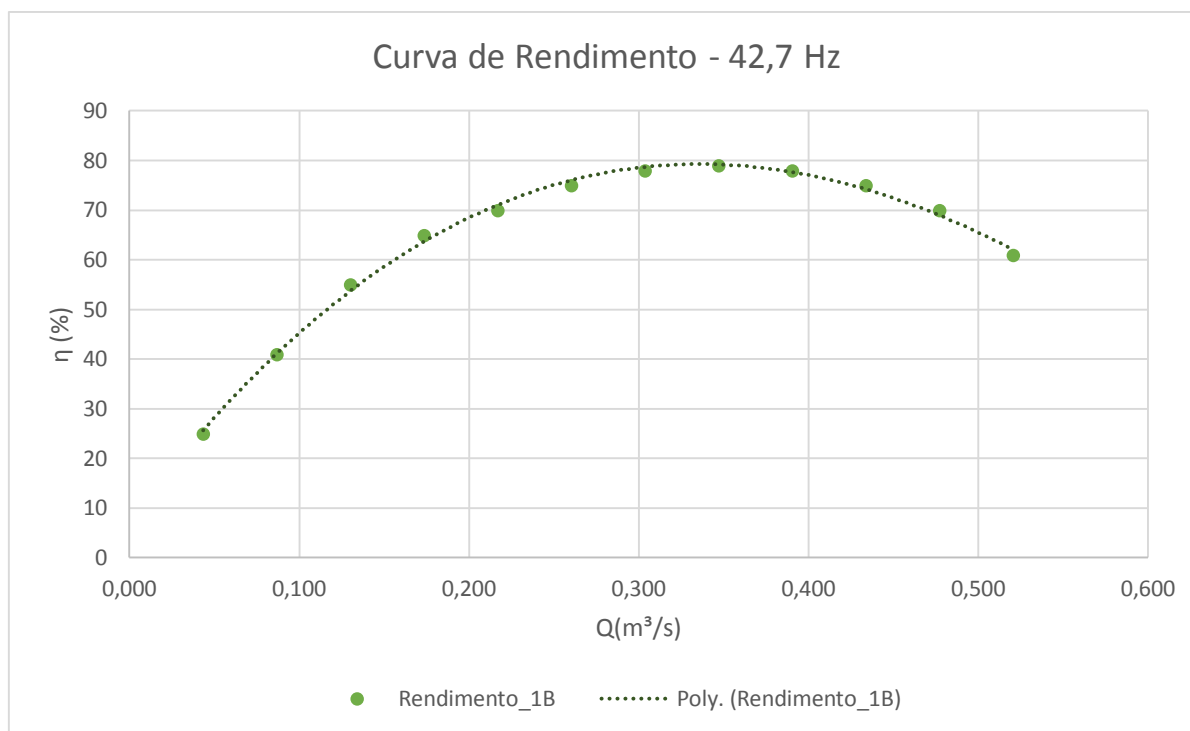


Figura 30 - Curva de Rendimento de 1 Bomba (42,7 Hz)

Para o caso de funcionamento de duas e três bombas foram utilizados os valores dos caudais da CCB apresentada na Figura 28 e multiplicados por dois e por três para o caso de estarem duas ou três bombas em funcionamento, respetivamente, para os mesmos valores de rendimentos, anteriormente utilizados.

Obtiveram-se portanto as Curvas de Rendimento para estes dois regimes de funcionamento.

Para o caso de duas bombas obteve-se a curva da Figura 31, definida pela expressão:

$$\eta = (20,6)Q_b^3 - (149,9)Q_b^2 + (196,7)Q_b + 7,3 \quad (100)$$

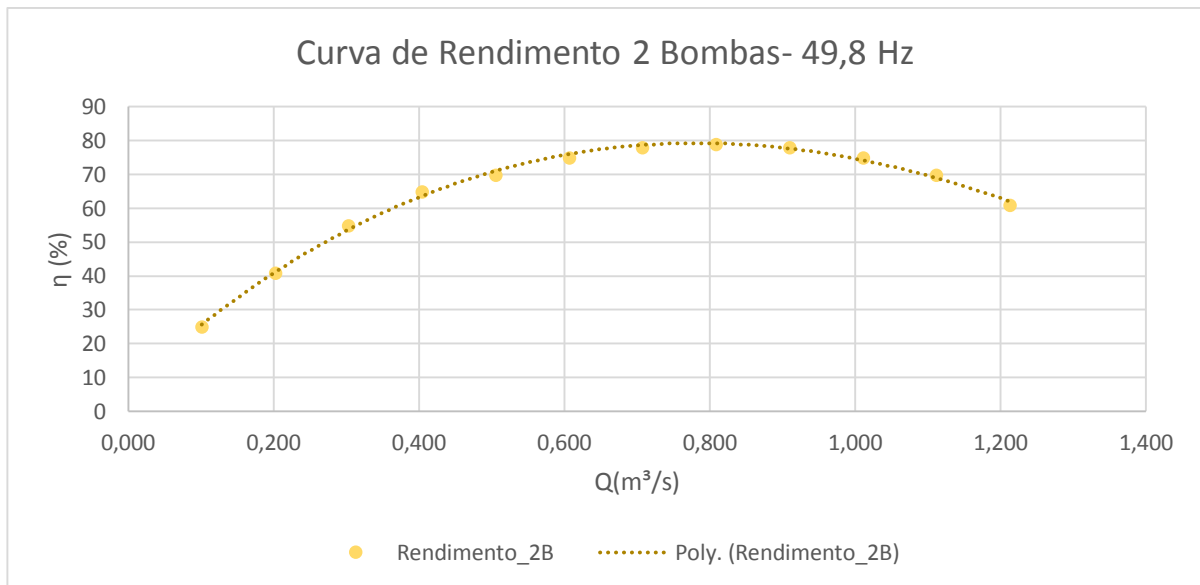


Figura 31 - Curva de Rendimento de 2 Bombas (49,8 Hz)

Na Figura 32 representa-se a curva para o caso de três bombas em funcionamento, definida por:

$$\eta = (6,1)Q_b^3 - (66,6)Q_b^2 + (131,1)Q_b + 7,3 \quad (101)$$

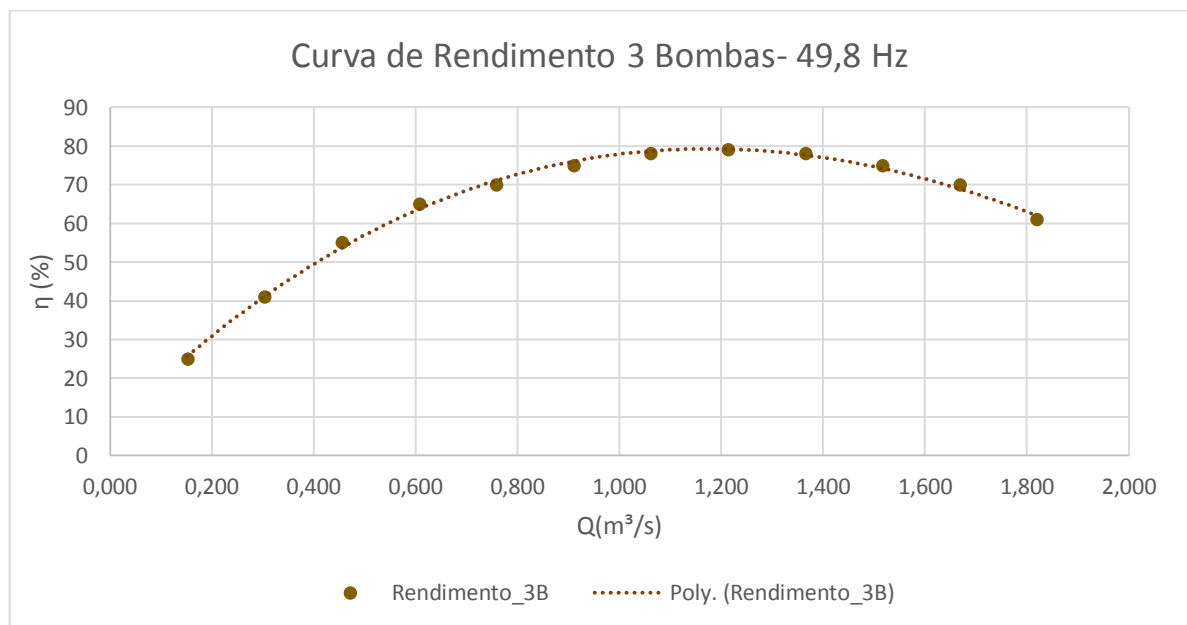


Figura 32 - Curva de Rendimento de 3 Bombas (49,8 Hz)

3.2.2.3. PD^2

O PD^2 é o parâmetro relativo à inércia industrial que se relaciona com o momento de inércia I_0 , de acordo com a expressão (32). Este parâmetro ainda carece de estudo por parte dos fabricantes, pois raramente vem expresso nas folhas de características dos grupos.

Nas folhas de características disponibilizadas pelo fabricante, *Sulzer*, era fornecido o valor do momento de inércia igual a 3,93 kg.m². A partir deste valor e utilizando a equação (32), obtiveram-se os valores descritos na Tabela 3, multiplicando o valor de PD^2 por dois e por três dependendo do regime de funcionamento (duas e três bombas)

Tabela 3 - Valores de PD^2

Número de Bombas em Funcionamento	PD^2 (N.m ²)
1	154
2	308
3	462

3.3.3. RESERVATÓRIO DE AR COMPRIMIDO

Como já foi anteriormente referido, a solução de proteção contra o fenómeno de choque hidráulico utilizada neste sistema elevatório foi um RAC, construído pela empresa *H&H S.A.*, que se apresenta na Figura 33:



Figura 33 - RAC Instalado na Estação Elevatória (Fotografia do Prof. Francisco Piqueiro)

É um RAC sem membrana, com dois compressores que trabalham alternadamente, controlando o volume de ar no interior do equipamento. Um dos dois compressores é apresentado na Figura 34.



Figura 34 - Um dos Compressores Instalados

Existe uma compressão na conexão entre a conduta de ligação e o RAC, que reduz os 600 mm da conduta de ligação para os 250 mm (Figura 35). Na Figura 36 apresenta-se uma fotografia onde é visível essa ligação, assim como as duas válvulas de descarga de fundo existentes.

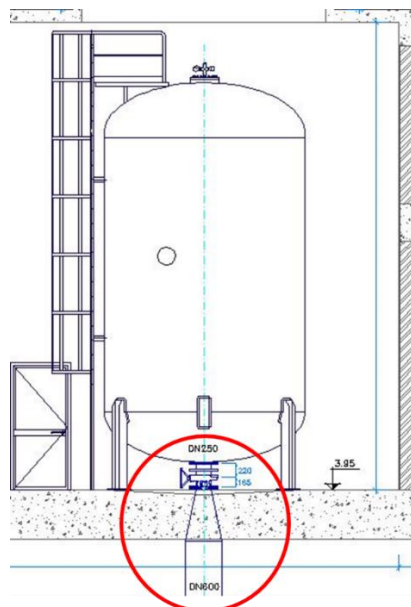


Figura 35 – Esquema do Pormenor de Ligação ao RAC (Cedido pela Entidade Gestora)



Figura 36 – Fotografia do Pormenor de Ligação ao RAC

Na Tabela 4 estão apresentadas as características do RAC instalado no sistema.

Tabela 4 - Características do RAC

Característica	Valor (Unidade)
Diâmetro	3,3 (m)
Altura	6 (m)
Pressão Máxima	4,37 (bar)
Volume Total	46 (m³)
Diâmetro da Conduta de Ligação	0,600 (m)
Comprimento da Conduta de Ligação	6 (m)
Cota do Nível Máximo (Z_RAC_MAX)	10,76 (m)
Cota do Nível Mínimo (Z_RAC_MIN)	4,76 (m)
Cota do Nível em Regime Permanente - 1 Bomba (Z_RAC0)	8,56 (m)
Cota do Nível em Regime Permanente - 2 Bombas (Z_RAC0)	8,96 (m)
Cota do Nível em Regime Permanente - 3 Bombas (Z_RAC0)	9,16 (m)

3.3.4. CONDUTA ELEVATÓRIA

A conduta elevatória deste sistema foi dimensionada para um caudal de 810 L/s e desenvolve-se desde a estação elevatória até à câmara de transição de regime, com um comprimento total de 2974,27 m.

O material selecionado foi Ferro Fundido Dúctil (FFD), de diâmetro igual a 700 mm e com uma pressão máxima de serviço de 1 MPa. Foram aplicadas juntas travadas dada a dificuldade de prever em projeto a ocupação real do subsolo e dos respetivos atravancamentos. Assim, dispensa-se a utilização de maciços de amarração para absorver os impulsos da conduta.

3.3.5. RESERVATÓRIO DE JUSANTE

O reservatório de jusante deste Sistema Elevatório é, como foi referido anteriormente, uma câmara de transição de regime. Serve, portanto, para transformar o escoamento sob pressão em escoamento em superfície livre. É dotado, para este efeito, de um septo que fará o amortecimento dos volumes.

A conduta elevatória descarrega no fundo da câmara de transição, a uma cota de 26,05 m e o septo tem uma cota superior de 26,75 m.

É importante referir que para o cálculo do valor da carga neste reservatório é necessário considerar a lei de vazão do septo, que iria variar consoante o caudal descarregado na câmara, mas como simplificação optou-se por usar um valor fixo para a carga de 27,15 m.

4

METODOLOGIA

4.1. ABORDAGEM

Para a análise do efeito do choque hidráulico no sistema elevatório do “Molhe Sul”, foi utilizado o programa desenvolvido em *software* “Matlab” por Pacheco Figueiredo (2015), cujo algoritmo de cálculo é baseado no Método das Características. Este programa foi disponibilizado nos conteúdos da Unidade Curricular de Sistemas de Abastecimento de Água do ramo de Hidráulica do 5º ano do Mestrado Integrado em Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

A partir de uma folha de dados de “*input*” que será detalhada a seguir, o programa aplica o Método das Características, obtendo-se a envolvente de pressões em forma de gráfico e tabela. O programa fornece também diversos parâmetros como a variação com o tempo da velocidade de rotação, do caudal, das cargas nos diversos pontos dos trechos em que a conduta é dividida na aplicação do método e muitos mais. Note-se que quando é introduzido um RAC, obtém-se ainda o gráfico com as variações do nível de água e do volume de ar no interior do RAC.

Para avaliar a importância da proteção contra o choque hidráulico no sistema elevatório em análise, optou-se por criar os seis ficheiros de dados seguintes:

- 1B – Cálculo de pressões para o funcionamento de uma bomba sem RAC;
- 2B – Cálculo de pressões para o funcionamento de duas bombas sem RAC;
- 3B – Cálculo de pressões para o funcionamento de três bombas sem RAC;
- 1B_RAC – Cálculo de pressões para o funcionamento de uma bomba com RAC;
- 2B_RAC – Cálculo de pressões para o funcionamento de duas bombas com RAC;
- 3B_RAC – Cálculo de pressões para o funcionamento de três bombas com RAC.

Assim, avalia-se teoricamente, para cada caso de funcionamento, o amortecimento de pressões que o RAC introduz no sistema.

De seguida far-se-á a listagem dos dados de “*input*”, tanto fixos como variáveis, introduzidos no programa. Alguns dos parâmetros já foram deduzidos anteriormente, mas serão indicados novamente para mais fácil análise.

4.2. DADOS DE “INPUT” FIXOS

Neste subcapítulo enumeram-se os vários dados e parâmetros que não variam com as diferentes combinações de funcionamento (uma, duas ou três bombas em funcionamento) e, também, os dados comuns aos casos onde se introduz o RAC.

4.2.1. DADOS COMUNS A TODOS OS CASOS AVALIADOS

Estão enumerados, na Tabela 5, os dados comuns a todos os casos avaliados:

Tabela 5 - Dados de “Input” Comuns a Todos os Casos

Parâmetro	Valor (Unidade)
Perfil Longitudinal	Em Anexo
Comprimento da Conduta	2.974,27 (m)
Diâmetro da Conduta	0.700 (m)
Rugosidade	0.4 (mm)
Hmontante	0 (m)
Hjusante	27,15 (m)
Fator de Majoração da Perda de Carga Contínua	1,2 (-)
Viscosidade Cinemática	1.31E-06 (m ² /s)
Celeridade	922,58 (m/s)
Divisão da Conduta (Número de Trechos)	80 (Trechos)

O valor da rugosidade, o fator de majoração da perda de carga contínua e a viscosidade foram estimados, por ser muito difícil conhecer o seu valor real.

A celeridade foi calculada através da equação (29), obtendo-se um valor de 922,58 m/s, a partir dos seguintes valores:

- $\rho - 1.000 \text{ kg/m}^3$,
- $\varepsilon - 2,030 * 10^9 \text{ Pa}$,
- $D - 0,700 \text{ m}$,
- $C_1 - 1$,
- $E - 95 * 10^9 \text{ Pa}$,
- $e - 0,0108 \text{ m}$

Foi introduzido um valor de 80 trechos na divisão da conduta. Quanto maior for este valor mais apurado será o cálculo, mas também mais demorado. Verificou-se que este valor era o que mais equilíbrio oferecia entre precisão e tempo de cálculo.

Um dado que não entra na folha de dados, mas que revela importância na análise dos resultados, é a fase da onda de choque, μ . Esta pode ser determinada utilizando a equação (23). Sendo o valor de L de 2.974,27 m, obtém-se um valor para a fase de 6,45 s.

4.2.2. DADOS COMUNS AOS CASOS COM RAC

Os dados comuns aos três casos em que o RAC foi introduzido são apresentados na Tabela 6:

Tabela 6 - Dados de “Input” Comuns aos Casos com RAC

Parâmetro	Valor (Unidade)
Diâmetro do RAC	3,3 (m)
Cota do Nível Máximo (Z_RAC_MAX)	10,76 (m)
Cota do Nível Mínimo (Z_RAC_MIN)	4,76 (m)
Expoente da Lei de Estado (α)	1,2 (-)
Diâmetro do Tubo de Ligação	0,600 (m)
Diâmetro da Tubeira	0,600 (m)
Comprimento do Tubo de Ligação	6 (m)
Rugosidade do Tubo de Ligação	0,4 (mm)
Coefficiente de Perda de Carga Localizada (Tubo de Ligação)	1 (-)
Secção do Método das Características com RAC	2 (-)
Número de Fases (Tempo de Simulação)	32 (-)

Como foi anteriormente referido, o valor do expoente da lei de estado varia entre 1 e 1,4, mas como a solução real está sempre entre estes dois valores, pois nunca é perfeitamente um processo isotérmico ou adiabático, optou-se por utilizar o valor de 1,2.

Não foi possível confirmar se existe tubeira na instalação. Portanto, optou-se por atribuir o valor do diâmetro da tubeira igual ao da conduta de ligação, o que significa que não há tubeira. Também se optou por utilizar o mesmo valor da rugosidade da conduta no tubo de ligação.

O valor atribuído ao coeficiente de perda de carga localizada do tubo de ligação entre o RAC e a conduta elevatória foi 1. Considera-se aqui um cotovelo de 90° existente no tubo de ligação e a compressão existente à entrada no RAC referida anteriormente.

Utilizou-se o valor de 2 para a secção do Método das Características com RAC pois é a primeira secção onde pode ser introduzido o RAC no programa. Fica na secção imediatamente a seguir dos grupos elevatórios.

Para o número de fases, que irá corresponder a um tempo de simulação, usou-se o valor de 32. Poderia ter sido utilizado um valor inferior, mas assim tem-se uma maior percepção das oscilações do volume de ar e nível de água no interior do RAC.

4.3. DADOS DE “INPUT” VARIÁVEIS

4.3.1. CURVA CARACTERÍSTICA DA BOMBA

Apresentam-se na Tabela 7 as equações das curvas características dos grupos elevatórios, para os três casos de funcionamento obtidas de acordo com o apresentado em 3.2.2.1.

Tabela 7 - CCB's Introduzidas no Programa

Número de Bombas em Funcionamento	CCB ($H_b = AN^2 + BNQ + CQ^2$; H_b : m; Q : m ³ /s)
1	$H_b = (2,9177E - 05)N^2 + (-4,1965E - 02)NQ_b + (-22,5771)Q_b^2$
2	$H_b = (2,9177E - 05)N^2 + (-2,0982E - 02)NQ_b + (-5,6443)Q_b^2$
3	$H_b = (2,9177E - 05)N^2 + (-1,3988E - 02)NQ_b + (-2,5086)Q_b^2$

4.3.2. CURVA DE RENDIMENTO

Assim como a CCB, a Curva de Rendimento também varia com o número de bombas em funcionamento. A dedução exposta em 3.2.2.1. levou às equações da Curva de Rendimento dos grupos elevatórios patentes na Tabela 8.

Tabela 8 - Curvas de Rendimento Introduzidas no Programa

Número de Bombas em Funcionamento	CR ($\eta(\%) = aa * Q^3 + bb * Q^2 + cc * Q + dd$; Q : m ³ /s)
1	$\eta = (260,19)Q_b^3 + (-813,65)Q_b^2 + (458,27)Q_b + 7,2828$
2	$\eta = (20,564)Q_b^3 + (-149,85)Q_b^2 + (196,66)Q_b + 7,2828$
3	$\eta = (6,093)Q_b^3 + (-66,598)Q_b^2 + (131,11)Q_b + 7,2828$

4.3.3. PD²

Os valores de PD² utilizados foram já expostos na Tabela 3, apresentada na secção 3.2.2.3.

4.3.4. COTA DO NÍVEL DE ÁGUA NO RAC EM REGIME PERMANENTE

Este parâmetro aplica-se aos três ficheiros de dados em que o RAC é introduzido e traduz a cota do nível de água no RAC antes de se dar a paragem na bomba. O seu valor varia para cada caso de funcionamento.

Os valores vêm enumerados com o resto das características do RAC na Tabela 4. Para mais fácil análise foram isolados na Tabela 9:

Tabela 9 - Cota do Nível de Água no RAC em Regime Permanente

Número de Bombas em Funcionamento	Z_RAC_0 (m)
1	8,56
2	8,96
3	9,16

4.4. RESULTADOS

Nos subcapítulos seguintes apresentam-se os resultados obtidos da execução do programa com os dados enumerados anteriormente. Note-se que o programa calcula e apresenta o ponto de funcionamento, velocidade média e perda de carga unitária na conduta para cada combinação de funcionamento (uma, duas e três bombas).

Será realizada uma análise para cada combinação de bombas em funcionamento e também a comparação entre o funcionamento sem e com o RAC, respetivamente.

4.4.1. UMA BOMBA EM FUNCIONAMENTO

4.4.1.1. Regime Permanente

Os primeiros dados fornecidos pelo programa, apresentados na Tabela 10 são relativos ao escoamento em regime permanente.

Tabela 10 - Ponto de Funcionamento da Elevatória para 1 Bomba

Parâmetro	Valor (Unidade)
Caudal Elevado	298,53 (L/s)
Altura Manométrica do Grupo Elevatório	30,01 (m)
Velocidade Média na Conduta	0,78(m/s)
Perda de Carga Unitária na Conduta	0,80 (m/km)

O perfil da conduta, assim como a linha piezométrica em regime permanente, estão representados na Figura 37.

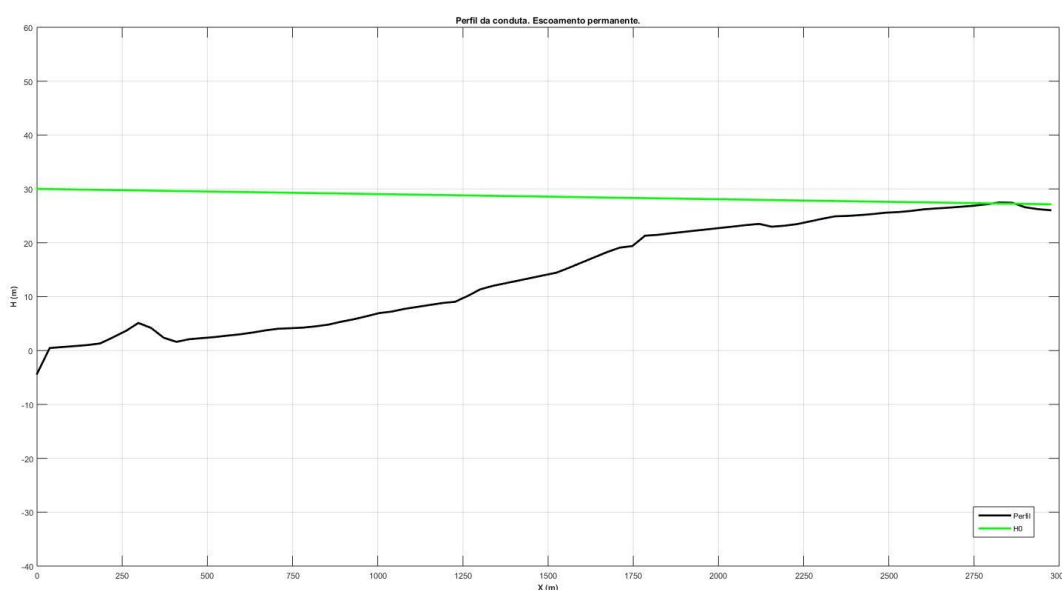


Figura 37 - Linha piezométrica em Regime Permanente para 1 Bomba

Analisando a Figura 37 é visível a existência de pressões negativas no ponto alto da conduta localizado aproximadamente aos 2.850 m. Em qualquer sistema sob pressão, a ocorrência de pressões negativas pode trazer problemas como bolsas de cavitação. Possivelmente, esse efeito poderá ser controlado pela ventosa de triplo efeito instalado nesse mesmo ponto alto.

4.4.1.2. Choque Hidráulico sem Proteção

A simulação do choque hidráulico, sem introduzir a proteção do RAC, permitiu obter a envolvente de pressões máximas e mínimas representada na Figura 38.

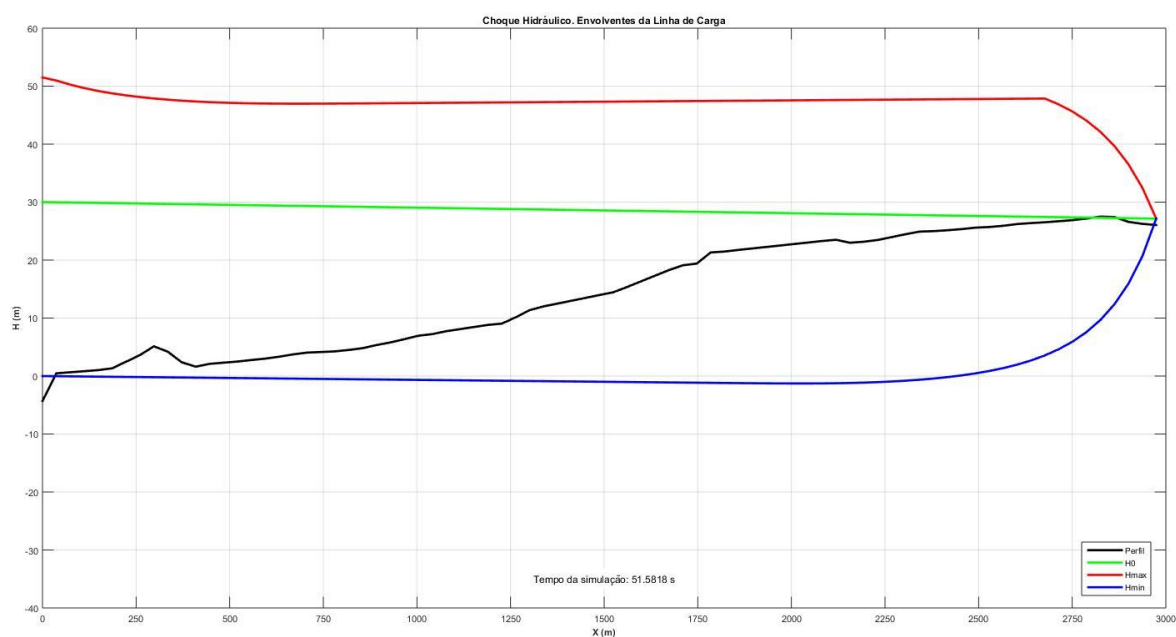


Figura 38 - Envolvente de Pressões sem RAC para 1 Bomba

Na Tabela 11 apresentam-se os principais resultados da aplicação do método.

Tabela 11 - Resultados do Choque Hidráulico sem RAC para 1 Bomba

Parâmetro	Valor (Unidade)
Tempo de Paragem do Grupo Elevatório	7,17 (s)
Pressão Máxima	55,80 (m.c.a.)
Pressão Mínima	-25,55 (m.c.a.)

Analisando o gráfico da Figura 38, percebe-se que na envolvente superior a pressão máxima ocorre na secção das bombas, atingindo o valor de 55,80 m.c.a. A carga mantém-se praticamente constante aproximadamente nos 47 m.c.a. na maior parte da conduta até começar a diminuir a partir dos 2.000 m.

Para o caso da envolvente inferior, das pressões mínimas, percebe-se que se está perante um grave problema de pressões negativas ao longo de praticamente toda a conduta. O seu valor máximo atinge-

se aos 2.342,2 m. Tal como a carga da envolvente superior, a inferior também se mantém constante na maior parte da conduta, aproximadamente com o valor de -1 m.c.a.

4.4.1.3. Choque Hidráulico com Proteção do RAC

Quando é simulada a presença do RAC, prevê-se um amortecimento das pressões, tanto máximas como mínimas. A envolvente de pressões para este caso está representada na Figura 39.

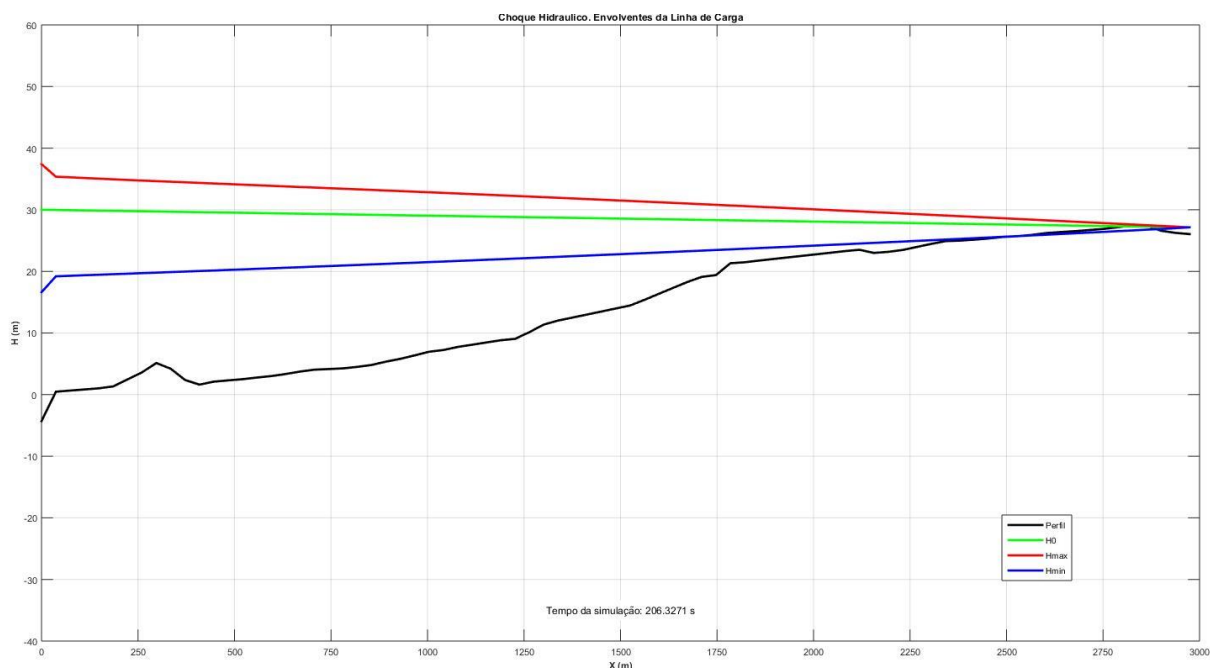


Figura 39 - Envolvente de Pressões com RAC para 1 Bomba

Os dados relativos a esta simulação estão resumidos na Tabela 12:

Tabela 12 - Resultados do Choque Hidráulico com RAC para 1 Bomba

Parâmetro	Valor (Unidade)
Tempo de Paragem do Grupo Elevatório	0,44 (s)
Pressão Máxima	41,70 (m.c.a.)
Pressão Mínima	-0,86 (m.c.a.)

Analisando a Figura 39 percebe-se que o RAC traz benefícios claros na redução dos efeitos de uma paragem de um grupo elevatório no sistema.

O valor da pressão máxima atinge os 41,70 m.c.a. na secção das bombas, mas como o RAC no programa é introduzido na segunda secção, que está a uma distância de 37,2 m das bombas, há uma menor proteção das mesmas. Na realidade a distância entre as bombas e o RAC é de poucos m, portanto o valor da pressão máxima deve ser próximo do valor da secção 2, que é de 34,89 m.c.a.

No que toca às pressões mínimas o único problema é o aparecimento de pressões negativas num troço na região ponto alto referido em 4.4.1.1. As pressões negativas desenvolvem-se ao longo de aproximadamente 300 m e tomam o valor máximo de -0,86 m.c.a. que é cerca de 3% do registado sem proteção do RAC.

As variações dos níveis de água e ar que se dão no interior do RAC estão representadas na Figura 40 e os valores máximos e mínimos são apresentados na Tabela 13.

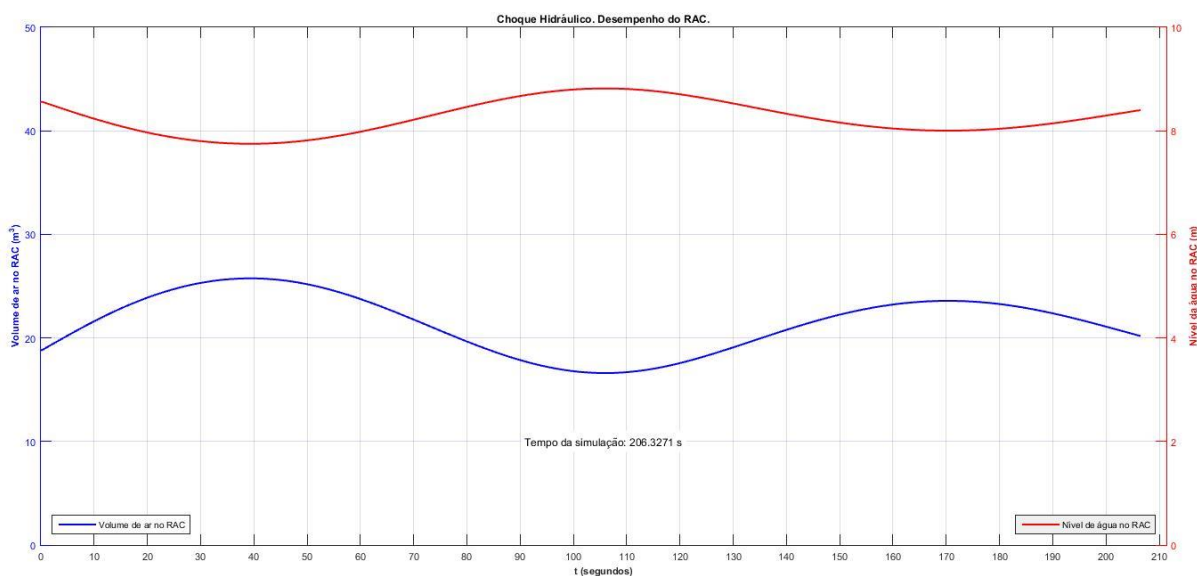


Figura 40 - Desempenho do RAC para 1 Bomba

Tabela 13 - Níveis no Interior do RAC para 1 Bomba

Parâmetro	Valor (Unidade)	Nº de segundos
Volume de Ar Máximo	25,75 (m³)	39,29
Cota do Nível Mínimo de Água	7,75 (m)	
Volume de Ar Mínimo	16,61 (m³)	105,94
Cota do Nível Máximo de Água	8,82 (m)	

4.4.2. DUAS BOMBAS EM FUNCIONAMENTO

4.4.2.1. Regime Permanente

À semelhança do procedimento para uma bomba, também para duas bombas a primeira informação é relativa ao regime permanente. Apresentam-se então na Tabela 14 os correspondentes dados e na Figura 41 o perfil e a linha piezométrica do escoamento em regime permanente.

Tabela 14 - Ponto de Funcionamento da Elevatória para 2 Bombas

Parâmetro	Valor (Unidade)
Caudal Elevado	677,95 (L/s)
Altura Manométrica do Grupo Elevatório	41,42 (m)
Velocidade Média na Conduta	1,76 (m/s)
Perda de Carga Unitária na Conduta	4,00 (m/km)

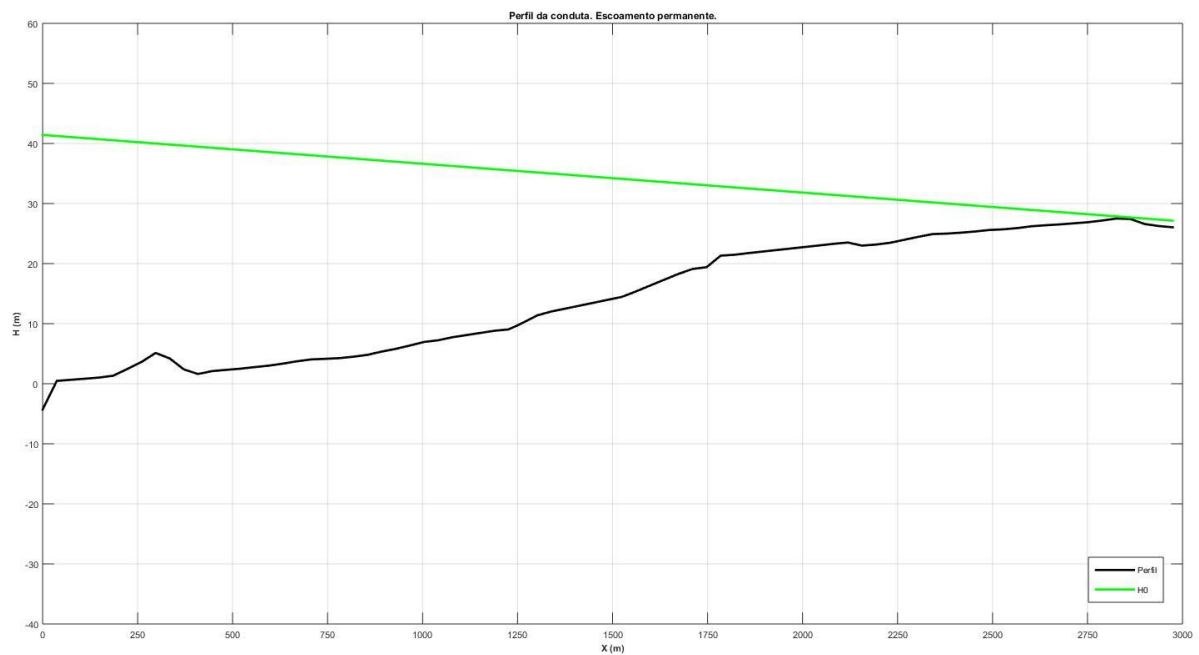


Figura 41 - Linha piezométrica em Regime Permanente para 2 Bombas

Pela análise da Figura 41 verifica-se que para o caso de duas bombas em funcionamento, já não se verificam os problemas de pressões negativas na conduta detetadas para uma bomba.

4.4.2.2. Choque Hidráulico sem Proteção

Simulando o choque hidráulico para este caso obtém-se, à semelhança do ocorrido para uma bomba, o gráfico da envolvente de pressões (representado na Figura 42).

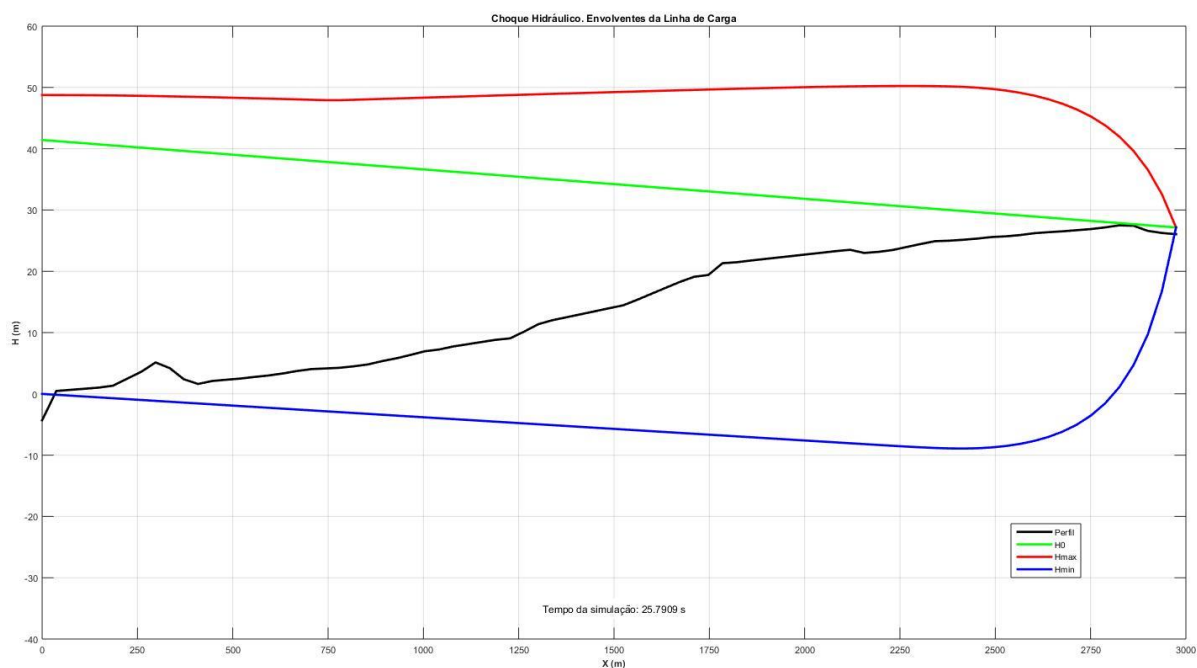


Figura 42 - Envoltória de Pressões sem RAC para 2 Bombas

Listam-se na Tabela 15 alguns resultados da simulação.

Tabela 15 - Resultados do Choque Hidráulico sem RAC para 2 Bombas

Parâmetro	Valor (Unidade)
Tempo de Paragem do Grupo Elevatório	19,46 (s)
Pressão Máxima	53,06 (m.c.a.)
Pressão Mínima	-34,33 (m.c.a.)

No caso de duas bombas em funcionamento é visível um ligeiro agravamento das pressões positivas ao longo da conduta, com uma diminuição da pressão máxima, que se localiza ainda na zona das bombas. Esta redução provavelmente vem do aumento da maior inércia dos grupos.

As pressões negativas sofreram um maior aumento, em especial a “barriga” formada na zona dos 2.500 m.

4.4.2.3. Choque Hidráulico com Proteção do RAC

Introduzindo o RAC na situação de duas bombas em funcionamento obteve-se a nova envoltória, apresentada na Figura 43.

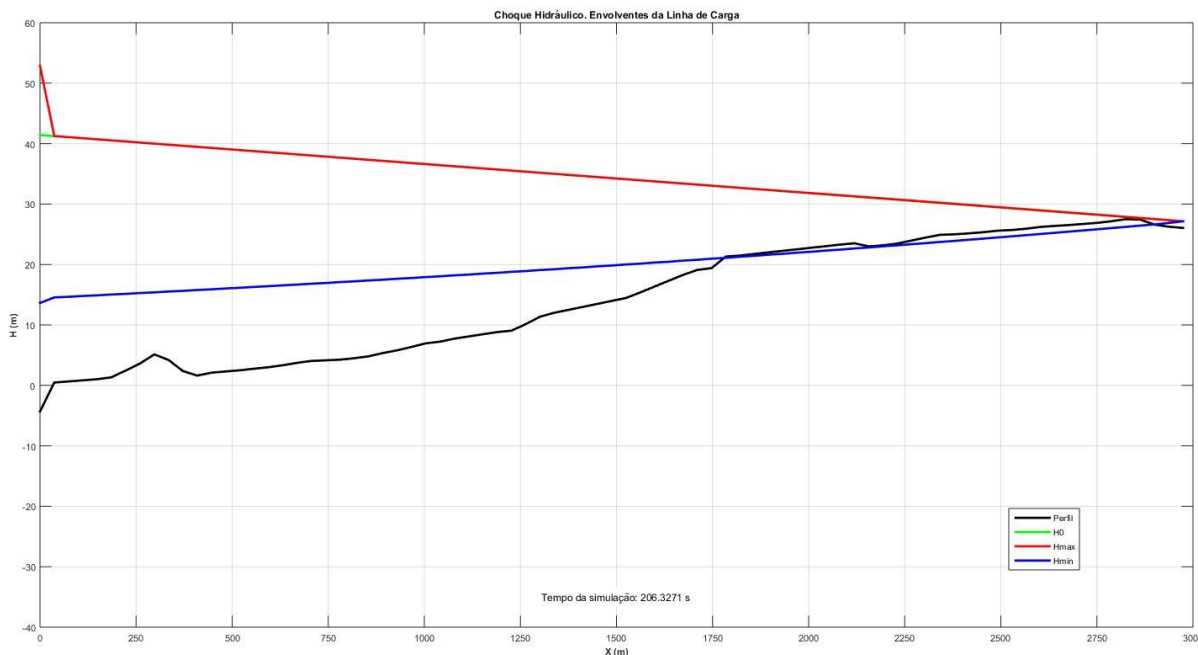


Figura 43 - Envolvente de Pressões com RAC para 2 Bombas

Na Tabela 16 apresentam-se os resultados do choque hidráulico com proteção do RAC:

Tabela 16 - Resultados do Choque Hidráulico com RAC para 2 Bombas

Parâmetro	Valor (Unidade)
Tempo de Paragem do Grupo Elevatório	0,484 (s)
Pressão Máxima	57,187 (m.c.a.)
Pressão Mínima	-1,274 (m.c.a.)

Tal como para o caso de uma bomba, a redução de pressões máximas e mínimas obtidas com a introdução do RAC na simulação da paragem de duas bombas é evidente. Nota-se que a envolvente superior chega a confundir-se com a linha de carga em regime permanente. Percebe-se pelos valores tabelados em anexo (Tabela B. 4 - Envolvente para 2 Bombas com RAC da envolvente superior que esta toma valores ligeiramente superiores ao regime permanente a partir dos 2.000 m, mas apenas na ordem das décimas de metro.

A envolvente inferior mostra uma enorme redução das pressões mínimas, reduzindo o seu valor máximo para apenas 3,7% do que seria sem proteção. Ocorrem pressões negativas desde os 1.785 até os 2.863 m. Estas tomam valores, na maior parte das secções, menores do que -1 m.c.a., o que é um valor significativamente baixo, mas é preciso ter sempre atenção a casos de pressões negativas.

Apresentam-se na Figura 44 as variações do nível de água e volume de ar no interior do RAC durante o choque hidráulico.

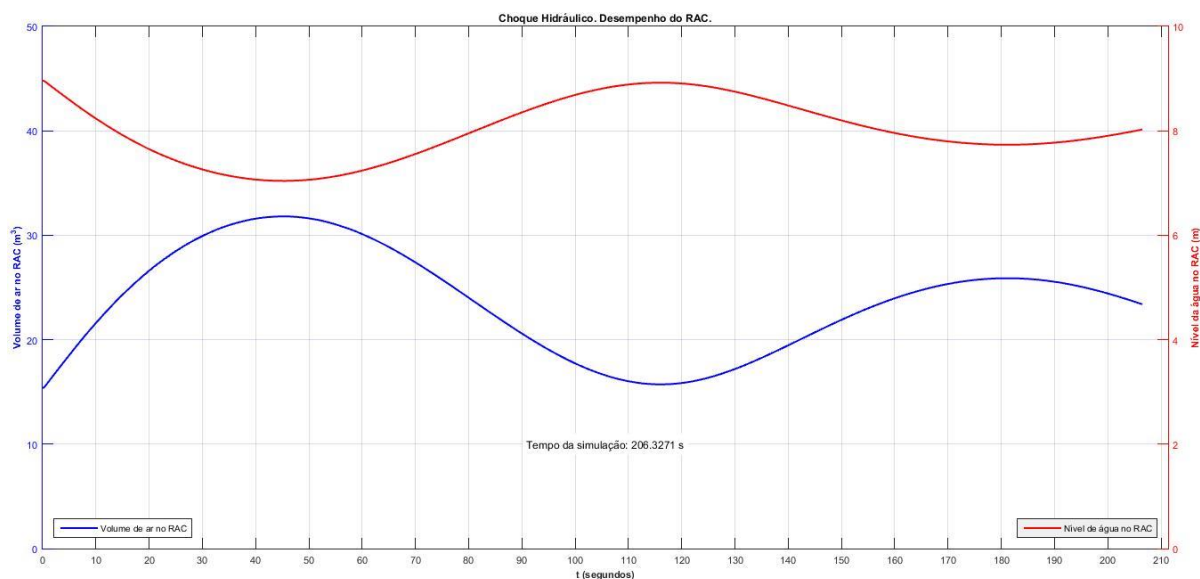


Figura 44 - Desempenho do RAC para 2 Bombas

A Tabela 17 apresenta os valores máximos e mínimos do volume de ar e cota do nível de água no interior do RAC para duas bombas:

Tabela 17 – Níveis no Interior do RAC para 2 Bombas

Parâmetro	Valor (Unidade)	Nº de segundos
Volume de Ar Máximo	31,81 (m³)	45,34
Cota do Nível Mínimo de Água	7,04 (m)	
Volume de Ar Mínimo	15,40 (m³)	0,04
Cota do Nível Máximo de Água	8,96 (m)	

4.4.3. TRÊS BOMBAS EM FUNCIONAMENTO

4.4.3.1. Regime Permanente

A experiência mais relevante na análise das pressões máximas e mínimas causadas pelo choque hidráulico será a das três bombas em funcionamento. Apresentam-se então na Tabela 18 os valores do ponto de funcionamento e na Figura 45 a linha piezométrica em regime permanente.

Tabela 18 - Ponto de Funcionamento da Elevatória para 3 Bombas

Parâmetro	Valor (Unidade)
Caudal Elevado	800,08 (L/s)
Altura Manométrica do Grupo Elevatório	46,95 (m)
Velocidade Média na Conduta	2,08 (m/s)
Perda de Carga Unitária na Conduta	5,55 (m/km)

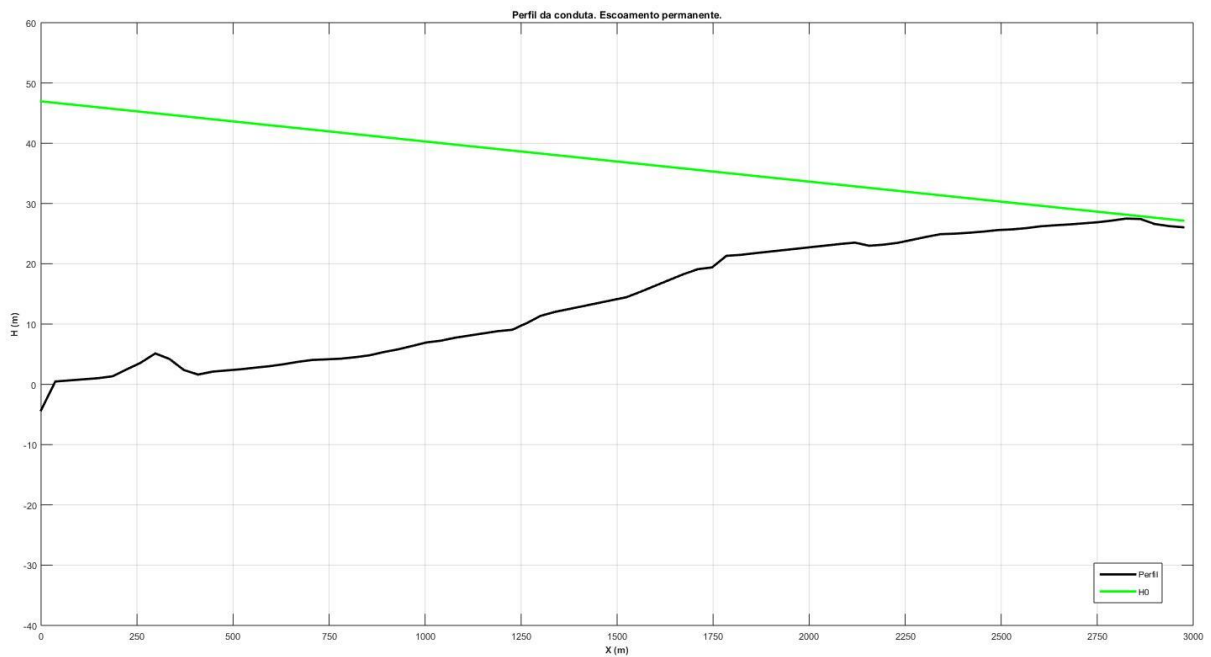


Figura 45 - Linha piezométrica em Regime Permanente para 3 Bombas

Para o caso de três bombas, e como seria de esperar, também não ocorrem pressões negativas em regime permanente.

4.4.3.2. Choque Hidráulico sem Proteção

Apresenta-se na Figura 46 a envolvente de pressões para o choque hidráulico sem proteção do RAC.

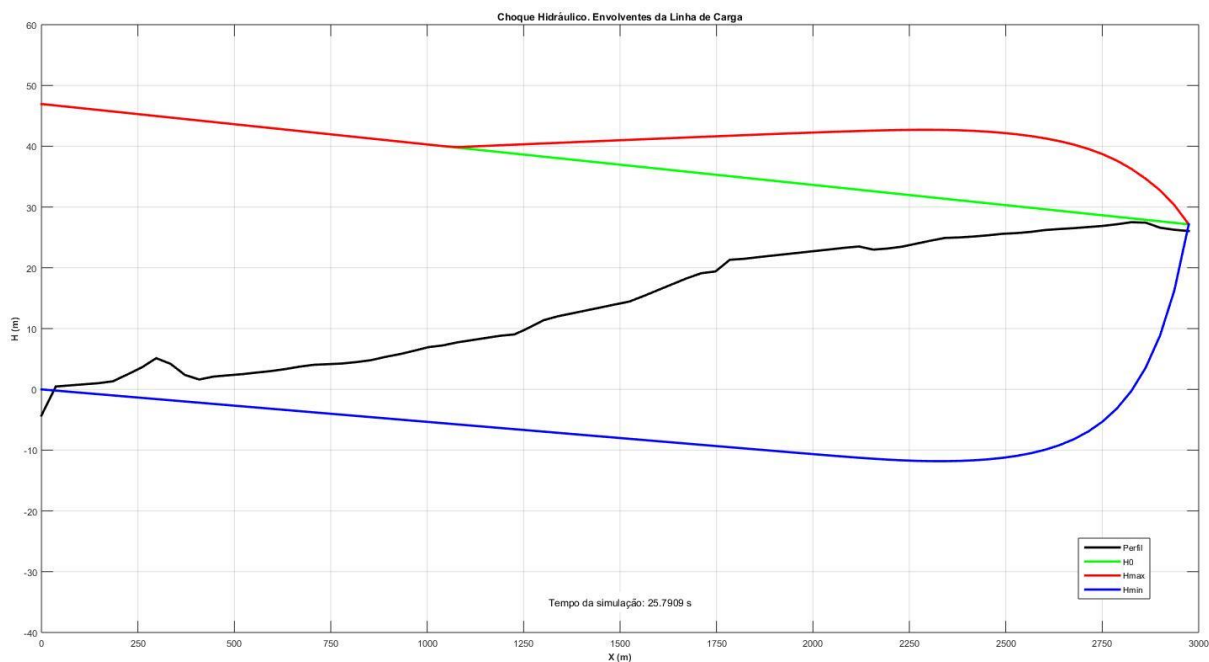


Figura 46 - Envoltória de Pressões sem RAC para 3 Bombas

Na Tabela 19 resumem-se os resultados principais desta simulação:

Tabela 19 - Resultados do Choque Hidráulico sem RAC para 3 Bombas

Parâmetro	Valor (Unidade)
Tempo de Paragem do Grupo Elevatório	19,63 (s)
Pressão Máxima	51,25 (m.c.a.)
Pressão Mínima	-36,87 (m.c.a.)

Contrariamente ao que era expectável, observa-se uma redução acentuada das sobrepressões em relação ao mesmo caso (choque hidráulico sem proteção) para duas bombas e mesmo para uma bomba. A pressão máxima dá-se na zona das bombas e é igual à pressão máxima em regime permanente, aliás, a envoltória superior até à zona dos 1.000 m é igual à linha piezométrica em regime permanente e só depois se destaca desta.

As pressões negativas não são muito superiores às obtidas para duas bombas sem proteção. A pressão mínima atinge os -36,87 m.c.a., não andando muito distante do valor para duas bombas (-34,33 m.c.a.).

4.4.3.3. Choque Hidráulico com Proteção

Aplicando o RAC ao sistema com três bombas em funcionamento, obteve-se a envoltória de pressões, representada na Figura 47. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 20.

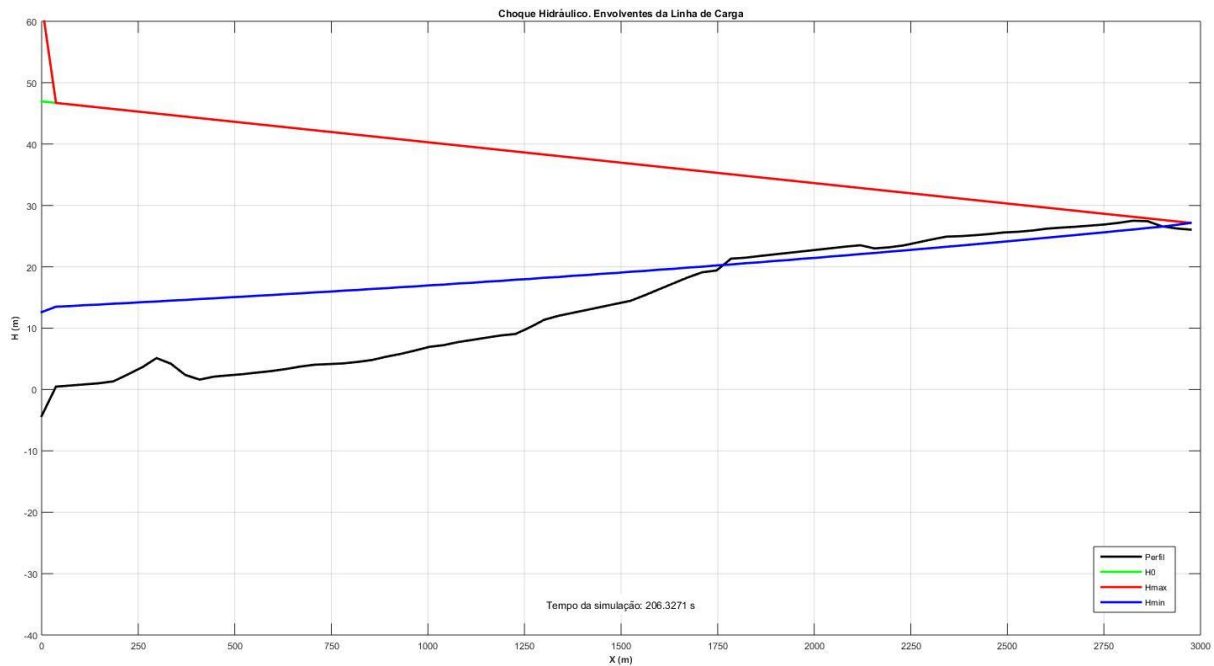


Figura 47 - Envolvente de Pressões com RAC para 3 Bombas

Tabela 20 - Resultados do Choque Hidráulico com RAC para 3 Bombas

Parâmetro	Valor (Unidade)
Tempo de Paragem do Grupo Elevatório	0,48 (s)
Pressão Máxima	67,23 (m.c.a.)
Pressão Mínima	-1,65 (m.c.a.)

Analisando a Figura 47 percebe-se que há uma semelhança óbvia com a envolvente para o caso de duas bombas com RAC (Figura 43). A envolvente de sobrepressões volta a igualar-se à linha piezométrica em regime permanente.

A envolvente inferior também tem um troço com pressões negativas semelhante ao da Figura 43, com um desenvolvimento igual, aumentando apenas um pouco o valor das pressões, com valores na maior parte das secções iguais ou menores a 1,4 m.c.a.

Na Figura 48 podem-se visualizar as variações de níveis que ocorrem no interior do RAC.

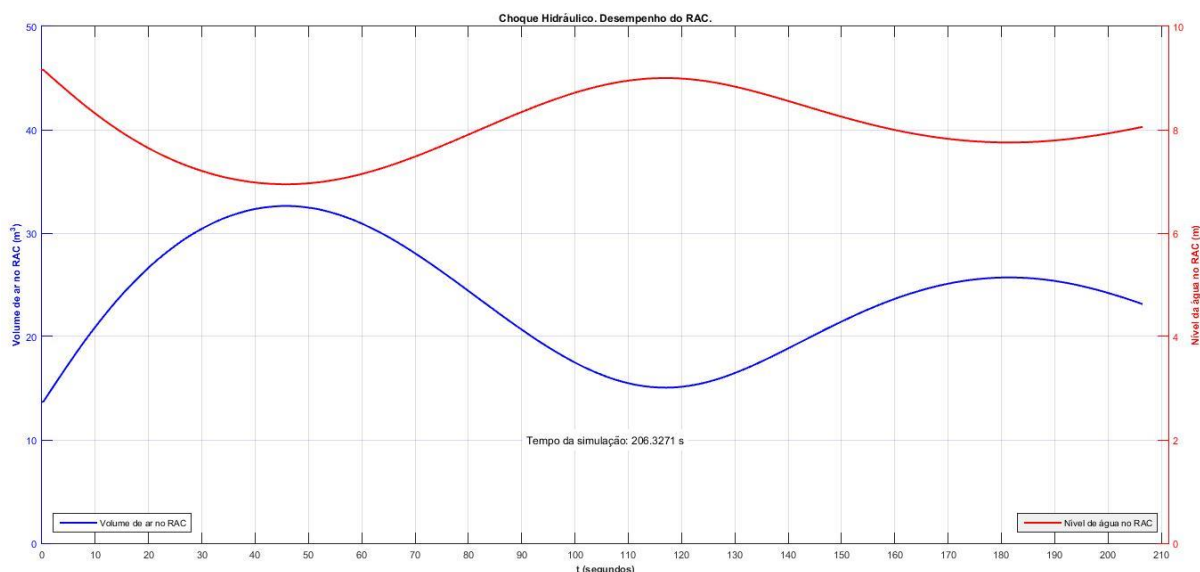


Figura 48 - Desempenho do RAC para 3 Bombas

Apresenta-se finalmente a Tabela 21, que lista os valores máximos e mínimos do volume de ar e nível de água no interior do RAC.

Tabela 21 – Níveis no Interior do RAC para 3 Bombas

Parâmetro	Valor (Unidade)	Nº de segundos
Volume de Ar Máximo	32,63 (m³)	45,82
Cota do Nível Mínimo de Água	6,95 (m)	
Volume de Ar Mínimo	13,68 (m³)	0,040
Cota do Nível Máximo de Água	9,16 (m)	

4.5. ANÁLISE AOS RESULTADOS OBTIDOS

4.5.1. VARIAÇÃO DA COTA DO NÍVEL DE ÁGUA NO INTERIOR DO RAC

Um dos conjuntos de dados cedidos pela entidade gestora contém dados relativos aos níveis do RAC, como nível de água no interior, pressão e caudal bombado. Estes dados são automaticamente armazenados pelo sistema informático de gestão da estação elevatória, minuto a minuto. Esse intervalo de tempo faz com seja difícil fazer uma avaliação mais aprofundada dos níveis que a água atinge no interior do RAC.

Analisando esse ficheiro de dados, que contém registos minuto a minuto desde o dia 16 de Junho até ao dia 23 de Outubro de 2015, podem-se verificar que as cotas mínimas e máximas atingidas pela água no interior do RAC são compatíveis com as obtidas nas três simulações com a presença do RAC. Note-se que há sempre alguma dificuldade de comparação, pois na realidade percebe-se que nunca se passou do caso de três bombas diretamente para zero (como acontece na simulação), mas sim uma redução gradual de funcionamento (de três para duas, de seguida para uma e depois para zero).

É de realçar que os valores medidos no RAC são sempre alvo de imprecisão por se tratar de água residual, pois surge acumulação de gordura nos medidores de nível e no manómetro.

4.5.2. ANÁLISE DAS ENVOLVENTES DE PRESSÃO

Comparando os tempos de paragem das bombas nas três simulações de choque hidráulico sem proteção com a fase da onda de choque, percebe-se que são três casos de manobra lenta. Analisando esses gráficos de envolventes de pressão, é óbvio que o seu aspeto é diferente do que usualmente se considera uma envolvente de manobra lenta. Foi então analisada a variação de diversos parâmetros, chegando-se a uma variação curiosa do caudal e velocidade de rotação das bombas, conforme se apresenta na Figura 49.

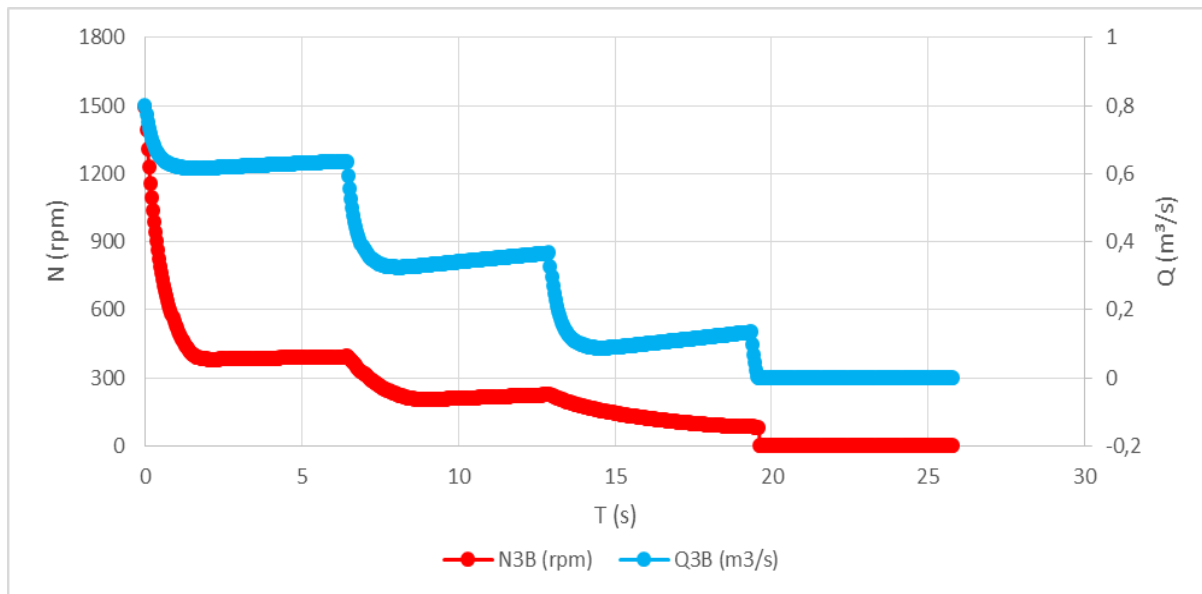


Figura 49 - Variações do Caudal Elevado e Velocidade de Rotação das Bombas: Paragem de 3 Bombas sem Proteção do RAC

Percebe-se que há uma redução “em escada” da velocidade de rotação das bombas e do caudal, o que possivelmente faz com que a envolvente não tenha o aspeto usual de manobra lenta, como apresentado na Figura 4. Esta redução costuma ser muito mais direta e não por troços. A sua explicação vem possivelmente das características da instalação e dos grupos elevatórios. É praticamente impossível determinar a sua origem, visto se tratar de um método iterativo, onde a variação de um parâmetro implica a variação de vários. Neste caso o caudal está relacionado com a velocidade de rotação, relação patente na Lei de Paragem da Bomba, equação (31) e com altura manométrica, que se relaciona com o caudal na curva característica da bomba, equação (33).

Fez-se também uma pequena comparação utilizando outro *software* de análise do choque hidráulico na tentativa de perceber se haveria algum problema do *software* utilizado. O *software* utilizado foi o programa desenvolvido por Piqueiro (2015) em *MS-DOS*. Foram introduzidos os diversos parâmetros requeridos, de realçar que para introduzir a CCB, o programa pede apenas três pontos e faz a regressão a partir desses pontos, havendo aí alguma imprecisão. Não havendo também fator de majoração das perdas de carga contínuas, foi introduzido um valor de perdas de carga localizadas que resultasse num ponto de funcionamento próximo do obtido no primeiro *software*. Obtiveram-se valores de pressões

semelhantes aos da primeira abordagem, o que significa que a forma estranha da envolvente será mesmo consequência da instalação existente.

4.5.3. ANÁLISE DO PERFIL LONGITUDINAL E PRESSÕES NEGATIVAS

Analisando o perfil longitudinal e mais precisamente a zona onde ocorrem mais pressões negativas, localizada no troço do último ponto alto, sensivelmente aos 2.850 m, percebe-se que poderia haver uma solução alternativa, que evitasse a ocorrência de pressões negativas visto que estas aparecem em regime permanente para uma bomba e mesmo com a proteção do RAC para os três casos de funcionamento. Essa solução poderia passar por terminar nesse ponto alto a conduta elevatória, continuando em regime de superfície livre o resto do troço, que é descendente. Fez-se então a análise para o caso de três bombas em funcionamento com RAC, por se tratar do caso de maiores pressões negativas, dentro dos casos em que há proteção.

Utilizaram-se os mesmos valores de dados de “input”, alterando apenas o desenvolvimento da conduta, que passou a ser 2.849,85 m e a cota do nível de água do reservatório de jusante, que passou a ser 29,5 m. Obteve-se a envolvente de pressões representada na Figura 50.

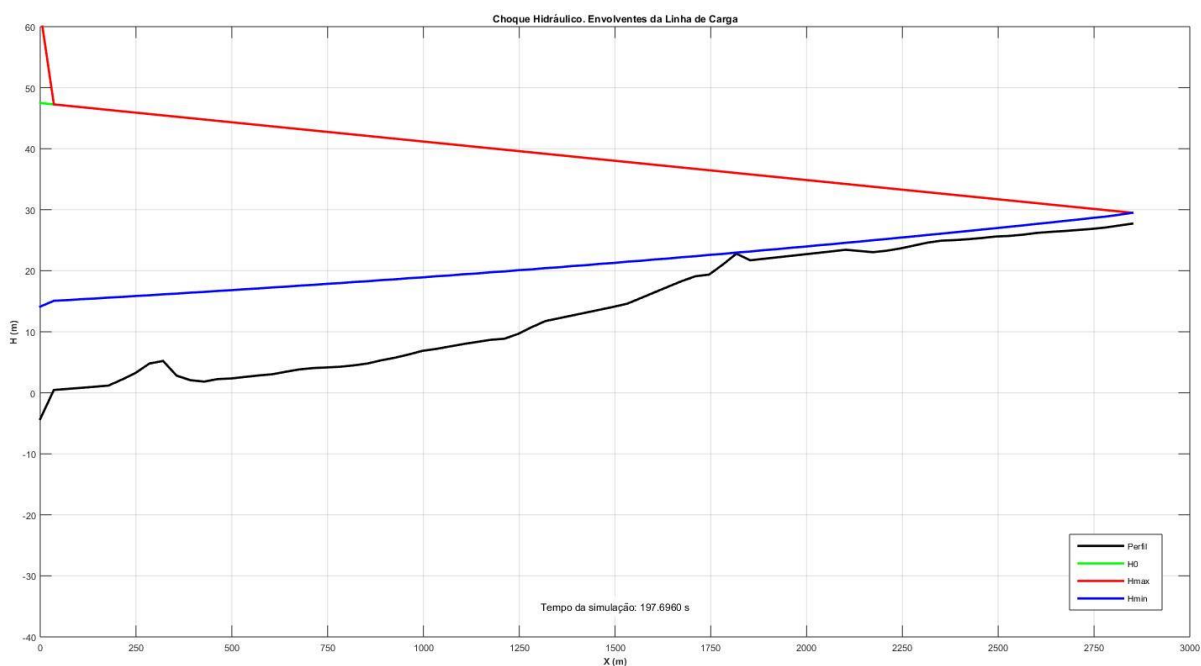


Figura 50 - Envolvente de Pressões com RAC para 3 Bombas: Proposta Alternativa

Como se pode observar na Figura 50 já não se verificam pressões negativas para este caso de funcionamento e muito possivelmente não se irão verificar para os casos da paragem de uma e duas bombas com proteção e de uma bomba em regime permanente. É portanto uma melhor solução, comparando com a existente.

Note-se que em anexo se apresentam todas as envolventes em tabela, para mais fácil análise dos seus valores.

5

CONCLUSÕES

5.1. CONCLUSÕES GERAIS SOBRE O CASO DE ESTUDO

O desenvolvimento da presente dissertação permitiu realizar uma análise teórica a um caso real de um fator importante a ter em conta nos sistemas hidráulicos sob pressão, o choque hidráulico. A especificidade da sua aplicação (a um caso de drenagem de águas residuais) não põe em causa uma possível correlação com possível abordagem a um caso equivalente de abastecimento água, visto não mudarem os principais parâmetros de cálculo das pressões.

É notória a importância que uma solução de proteção contra os efeitos do choque hidráulico com RAC oferece a um sistema elevatório, prevenindo graves problemas aquando da paragem dos grupos elevatórios.

Também se deduz que a não consideração do choque hidráulico no dimensionamento de uma conduta poderá levar a que o sistema falhe. Falha essa que pode danificar equipamentos e colocar vidas e o ambiente em risco.

Este trabalho permitiu também entender a dificuldade de estimar alguns parâmetros essenciais no cálculo das pressões em fase de projeto. Essa dificuldade está patente, por exemplo, no que diz respeito ao parâmetro da inércia industrial, PD^2 . Há uma evidente falta de informação relativa a este mesmo parâmetro, por ser um fator relativamente recente e ainda pouco abordado pela comunidade científica. Os fabricantes ainda têm dificuldades de o avaliar e portanto é raro encontrar em folhas de características de bombas. Quando isso acontece é estimado a partir de relações aproximadas que não consideram a inércia dos propulsores, do veio e da água na estimativa de coeficientes.

Obtiveram-se valores satisfatórios na ótica da redução de pressões máximas, tanto positivas como negativas, mas apesar disso é importante salientar que há um aparente problema de pressões negativas, mesmo com proteção do RAC. É de realçar que estes valores obtidos têm a sua imprecisão, que poderá vir dos dados estimados ou mesmo das adaptações feitas nos grupos elevatórios, que implicaram um cálculo de curvas características e de rendimento que poderá ter algum erro implícito. Esse erro poderá fazer com que não cheguem a haver pressões negativas instaladas na conduta na ocorrência de ondas de choque. Outra hipótese é existirem estas pressões negativas, mas devido à boa qualidade da conduta e como esta ainda só tem cinco anos de atividade ainda não se terem verificado problemas relevantes nem de funcionamento nem estruturais.

Relativamente a possíveis modificações a aplicar no sistema estudado, assim como possíveis trabalhos que complementem a abordagem realizada, são descritos no seguinte subcapítulo.

5.2. SUGESTÕES DE ALTERNATIVAS E DE TRABALHOS FUTUROS

Analisando o perfil longitudinal, é notório que troço final descendente que se desenvolve ao longo de aproximadamente 120 m pode ser um impulsor na ocorrência de pressões negativas, pelo que foi analisada uma solução alternativa em que a conduta terminaria no último ponto alto e em que o restante troço faria parte da conduta gravítica, já que é descendente. Esta alternativa revelou resultados bastante satisfatórios, eliminando as pressões negativas verificadas na solução real. Seria importante aferir se a sua implementação, neste momento, é viável. Caso não seja, seria relevante avaliar a influência e eficácia da ventosa de triplo efeito instalada nesse ponto alto na mitigação dessas pressões negativas.

No seguimento deste caso de estudo, seria também importante abordar a solução existente nas bombas (variadores de frequência), avaliando a sua verdadeira eficácia comparativamente a uma solução “tradicional” em que as bombas trabalham na sua frequência original.

Outra abordagem ainda sobre os grupos elevatórios poderia ser tentar encontrar a razão de haver uma aproximação da envolvente superior de pressões no choque hidráulico sem proteção para a linha de regime permanente à medida que aumenta o número de bombas em funcionamento.

Seria também relevante fazer um estudo mais direcionado a uma possível otimização do RAC, com medições de níveis feitas no local (segundo a segundo, por exemplo), para perceber se os níveis atingidos são recomendáveis após paragem dos grupos e se seria exequível melhorar a solução instalada.

BIBLIOGRAFIA

- ANDERSON, Alexander (1976) - Manabrea's Note on Waterhammer: 1858. Journal of the Hydraulics Division.
- BETÂMIO DE ALMEIDA, A. (1979) - O Golpe de Aríete em Conduitas: Colectânea de Textos. Lisboa: LNEC.
- BETÂMIO DE ALMEIDA, A. (1981) - O Golpe de Aríete em Conduitas Elevatórias: Síntese dos Conhecimentos Actuais. Lisboa: LNEC.
- BETÂMIO DE ALMEIDA, A. (1990) - Protecção Contra o Golpe de Aríete. In Manual de Saneamento Básico. Ministério do Ambiente e dos Recursos Naturais-Direcção Geral dos Recursos Naturais.
- BETÂMIO DE ALMEIDA, A.; MARTINS, S. C. (1999) - Controlo Hidráulico - Operacional de Sistemas Adutores. Lisboa: EPAL - Empresa Portuguesa das Águas Livres S.A.
- CAMARGO, Luiz A. (1989) - O golpe de aríete em tubulações de recalque. Análise simplificada. In XV Encontro de Engenheiros de Assistência Técnica. Joinville: 1989.
- CHAUDHRY, M.H. (1979) - Applied Hydraulic Transients. New York, USA: Van Nostrand Reinhold.
- COSTA, Hugo Daniel Mesquita (2011) - Modelação do funcionamento de um RAC-Reservatório de Ar Comprimido definição de parâmetros de operação. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
- GHIDAOU, M. S.; ZHAO, M.; MCINNIS D. A.; AXWORTHY, D. H. (2005) - A Review of Water Hammer Theory and Practice. Applied Mechanics Reviews. ASME. 58:(January) 49-76.
- MARTINS, João Vítor Gonçalves (2009) - Comportamento dinâmico de sistemas elevatórios. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
- MENDES, Luís Filipe Martins (2011) - Métodos Clássicos de Protecção de Sistemas Elevatórios Contra o Golpe de Aríete. Faculdade de Ciências e Tecnologia- Universidade Nova de Lisboa.
- PACHECO FIGUEIREDO, M.M. (1990) - Choque Hidráulico em Conduitas Elevatórias. Protecção com Reservatórios de Ar Comprimido. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto:
- PACHECO FIGUEIREDO, M.M. (2014) - Método das Características Conduitas Elevatorias. Apointamentos da Unidade Curricular de Sistemas de Abastecimento de Água 2014/2015: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- PACHECO FIGUEIREDO, M.M. (2015) - CH Elevatoria. Conteúdos da Unidade Curricular de Sistemas de Abastecimento de Água: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- PIMENTEL, Cristina Filipa Guerreiro Guimarães (2010) - O efeito de sobrepressões em conduitas. Modelação da sua redução através da utilização de válvulas de escape. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- PIQUEIRO, Francisco M. O. (2014) - Choque Hidráulico. Escoamentos Variáveis sobre Pressão. Apointamentos da Unidade Curricular de Hidráulica Urbana e Ambiental 2014/2015 Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- PIQUEIRO, Francisco M. O. (2015) - Programa de Choque Hidráulico. Conteúdos da Unidade Curricular de Hidráulica Urbana e Ambiental 2015/2016: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

- [1] http://www.eoi.es/blogs/elenapoza/files/2011/12/IMG_5915.jpg. 26/10/2015
- [2] <http://construsel.com.br/wp-content/uploads/2014/04/Chamine-de-equilibrio-no-canal-de-irrigacao-em-Acu-RN.jpg>. 26/10/2015
- [3] <http://fargon.com.br/catalogos/reservatorio.pdf>. 05/11/2015

ANEXOS

ANEXO A: PERFIL LONGITUDINAL

Tabela A. 1 – Perfil Longitudinal

x (m)	z (m)
0	-4,3
0,1	0,33
1,2	0,33
7,8	0,34
13,8	0,35
38,91	0,48
56,02	0,56
75,18	0,66
91,81	0,74
120,61	0,88
135,69	0,96
147,86	1,02
157,79	1,07
165,81	1,11
176,92	1,17
180,67	1,22
183,47	1,26
191,06	1,49
203,58	1,87
215,12	2,22
219,55	2,36
224,35	2,51
232,32	2,75
236,53	2,88
247,33	3,22
264,89	3,76
273,06	4,08
277,81	4,6
279,78	4,66
284,79	4,79
290,78	4,95
301,72	5,24
308,4	5,42
311,88	5,64
313,38	5,74

x (m)	z (m)
331,88	4,4
351,83	2,95
367,57	2,42
386,82	2,22
407,17	1,6
423,97	1,78
430,24	1,87
443,94	2,07
454,94	2,23
459,94	2,24
473,54	2,28
501,82	2,36
523,02	2,52
553,57	2,74
563,39	2,8
574,23	2,87
588,67	2,99
616,83	3,07
627,94	3,27
633,29	3,36
648,07	3,53
657,21	3,63
666,5	3,7
686,92	3,97
690,85	4,02
703,85	4,04
713,8	4,06
728,8	4,1
745,15	4,15
759,18	4,18
773,91	4,22
786,78	4,29
799,23	4,41
810,63	4,48
825,76	4,52
848,9	4,7
874,02	5,15
897,55	5,41
919,45	5,65
944,08	6,03
962,91	6,3
979,6	6,58
1 000,81	6,93

x (m)	z (m)
1 028,61	7,15
1 033,37	7,19
1 036,47	7,21
1 053,78	7,31
1 055,78	7,35
1 060,13	7,43
1 063,91	7,51
1 068,08	7,58
1 074,69	7,7
1 086,04	7,81
1 091,01	7,86
1 101,08	7,96
1 110,24	8,04
1 121,38	8,16
1 129,31	8,23
1 137,36	8,31
1 152,35	8,46
1 164,83	8,58
1 190,53	8,83
1 208,10	8,85
1 216,23	8,87
1 234,39	9,18
1 236,20	9,34
1 243,02	9,53
1 249,84	9,74
1 263,96	10,14
1 278,18	10,61
1 309,13	11,63
1 321,88	11,8
1 346,64	12,13
1 371,40	12,45
1 395,78	12,77
1 417,40	13,05
1 444,72	13,41
1 460,65	13,62
1 484,74	13,94
1 506,30	14,22
1 527,94	14,5
1 555,87	15,22
1 579,40	15,84
1 602,38	16,44
1 627,28	17,09
1 651,90	17,73

x (m)	z (m)
1 683,71	18,55
1 705,14	19
1 725,65	19,42
1 743,40	19,34
1 767,42	19,71
1 801,79	22,94
1 803,76	22,95
1 806,16	22,94
1 818,61	22,78
1 819,81	21,48
1 820,66	21,47
1 838,51	21,62
1 869,84	21,83
1 889,79	21,97
1 912,89	22,13
1 941,29	22,32
1 977,70	22,57
2 002,34	22,74
2 023,43	22,89
2 044,60	23,03
2 071,81	23,22
2 098,03	23,41
2 116,24	23,55
2 134,81	23,28
2 155,13	22,99
2 178,49	23,06
2 213,72	23,32
2 224,32	23,39
2 230,47	23,47
2 283,15	24,17
2 338,17	24,91
2 366,56	24,95
2 368,48	24,96
2 384,50	25,01
2 396,20	25,06
2 401,85	25,09
2 410,19	25,12
2 442,86	25,27
2 465,64	25,42
2 477,45	25,5
2 509,43	25,72
2 539,37	25,7
2 550,08	25,79

x (m)	z (m)
2 609,16	26,27
2 644,29	26,4
2 680,53	26,54
2 687,11	26,57
2 720,68	26,74
2 730,89	26,79
2 766,77	26,97
2 847,50	27,7
2 849,85	27,72
2 853,73	27,63
2 908,29	26,41
2 974,27	26,05

ANEXO B: ENVOLVENTES DE CARGA E PRESSÃO

B.1 : ENVOLVENTE DE CARGA E PRESSÃO PARA 1 BOMBA SEM PROTEÇÃO

Tabela B. 1 - Envolvente para 1 Bomba sem RAC

x(m)	z(m)	Ho(m)	Hmáx(m)	Hmin(m)	Pmáx(m)	Pmin(m)
0,000	-4,300	30,005	51,501	-0,004	55,801	4,296
37,200	0,500	29,969	50,966	-0,028	50,495	-0,499
74,400	0,700	29,933	50,256	-0,052	49,601	-0,708
111,500	0,800	29,898	49,667	-0,077	48,831	-0,913
148,700	1,000	29,862	49,174	-0,101	48,150	-1,126
185,900	1,300	29,826	48,761	-0,126	47,428	-1,459
223,100	2,500	29,791	48,414	-0,150	45,944	-2,620
260,200	3,600	29,755	48,122	-0,175	44,504	-3,792
297,400	5,100	29,719	47,876	-0,199	42,750	-5,325
334,600	4,200	29,684	47,670	-0,224	43,468	-4,426
371,800	2,400	29,648	47,499	-0,248	45,122	-2,624
409,000	1,600	29,612	47,357	-0,273	45,738	-1,892
446,100	2,100	29,577	47,243	-0,297	45,141	-2,399
483,300	2,300	29,541	47,153	-0,321	44,845	-2,629
520,500	2,500	29,505	47,084	-0,346	44,583	-2,847
557,700	2,800	29,470	47,035	-0,370	44,270	-3,135
594,900	3,000	29,434	47,003	-0,395	43,995	-3,402
632,000	3,300	29,398	46,985	-0,419	43,646	-3,758
669,200	3,700	29,362	46,978	-0,444	43,242	-4,179
706,400	4,000	29,327	46,980	-0,468	42,935	-4,513
743,600	4,100	29,291	46,987	-0,492	42,842	-4,638
780,700	4,300	29,255	46,998	-0,517	42,741	-4,774
817,900	4,500	29,220	47,011	-0,541	42,512	-5,040
855,100	4,800	29,184	47,026	-0,566	42,215	-5,377
892,300	5,400	29,148	47,042	-0,590	41,690	-5,942

x(m)	z(m)	Ho(m)	Hmáx(m)	Hmin(m)	Pmáx(m)	Pmin(m)
929,500	5,800	29,113	47,058	-0,614	41,254	-6,419
966,600	6,400	29,077	47,075	-0,639	40,713	-7,001
1003,800	7,000	29,041	47,092	-0,663	40,138	-7,617
1041,000	7,200	29,006	47,109	-0,688	39,873	-7,924
1078,200	7,700	28,970	47,126	-0,712	39,392	-8,446
1115,400	8,100	28,934	47,143	-0,736	39,048	-8,831
1152,500	8,500	28,899	47,160	-0,761	38,699	-9,222
1189,700	8,800	28,863	47,178	-0,785	38,356	-9,607
1226,900	9,100	28,827	47,195	-0,809	38,143	-9,861
1264,100	10,100	28,792	47,212	-0,834	37,068	-10,977
1301,200	11,400	28,756	47,229	-0,858	35,859	-12,228
1338,400	12,000	28,720	47,246	-0,883	35,226	-12,903
1375,600	12,500	28,684	47,263	-0,907	34,758	-13,412
1412,800	13,000	28,649	47,281	-0,931	34,290	-13,921
1450,000	13,500	28,613	47,298	-0,956	33,819	-14,435
1487,100	14,000	28,577	47,315	-0,980	33,344	-14,951
1524,300	14,500	28,542	47,332	-1,004	32,879	-15,457
1561,500	15,400	28,506	47,349	-1,029	31,981	-16,397
1598,700	16,300	28,470	47,367	-1,053	31,023	-17,396
1635,800	17,300	28,435	47,384	-1,077	30,071	-18,390
1673,000	18,300	28,399	47,401	-1,101	29,126	-19,376
1710,200	19,100	28,363	47,418	-1,125	28,314	-20,229
1747,400	19,400	28,328	47,435	-1,149	28,034	-20,551
1784,600	21,300	28,292	47,452	-1,173	26,131	-22,494
1821,700	21,500	28,256	47,470	-1,196	25,991	-22,675
1858,900	21,800	28,221	47,487	-1,218	25,730	-22,974
1896,100	22,000	28,185	47,504	-1,238	25,490	-23,252
1933,300	22,300	28,149	47,521	-1,256	25,255	-23,523
1970,500	22,500	28,114	47,538	-1,270	25,018	-23,791
2007,600	22,800	28,078	47,556	-1,279	24,778	-24,056
2044,800	23,000	28,042	47,573	-1,278	24,541	-24,310
2082,000	23,300	28,006	47,590	-1,267	24,296	-24,561
2119,200	23,500	27,971	47,607	-1,241	24,100	-24,748

x(m)	z(m)	Ho(m)	Hmáx(m)	Hmin(m)	Pmáx(m)	Pmin(m)
2156,300	23,000	27,935	47,624	-1,198	24,631	-24,191
2193,500	23,200	27,899	47,641	-1,135	24,471	-24,306
2230,700	23,500	27,864	47,659	-1,049	24,186	-24,522
2267,900	24,000	27,828	47,676	-0,940	23,709	-24,907
2305,100	24,500	27,792	47,693	-0,802	23,228	-25,267
2342,200	24,900	27,757	47,710	-0,634	22,794	-25,550
2379,400	25,000	27,721	47,727	-0,431	22,733	-25,425
2416,600	25,100	27,685	47,745	-0,187	22,595	-25,337
2453,800	25,300	27,650	47,762	0,104	22,420	-25,238
2491,000	25,600	27,614	47,779	0,452	22,186	-25,141
2528,100	25,700	27,578	47,796	0,867	22,089	-24,840
2565,300	25,900	27,543	47,813	1,364	21,900	-24,550
2602,500	26,200	27,507	47,831	1,961	21,615	-24,255
2639,700	26,400	27,471	47,848	2,681	21,465	-23,702
2676,800	26,500	27,435	47,865	3,555	21,339	-22,971
2714,000	26,700	27,400	46,855	4,625	20,149	-22,081
2751,200	26,900	27,364	45,598	5,947	18,706	-20,945
2788,400	27,200	27,328	44,045	7,598	16,879	-19,567
2825,600	27,500	27,293	42,110	9,689	14,608	-17,813
2862,700	27,400	27,257	39,675	12,377	12,246	-15,052
2899,900	26,600	27,221	36,562	15,900	9,964	-10,697
2937,100	26,300	27,186	32,508	20,626	6,255	-5,627
2974,300	26,100	27,150	27,150	27,150	1,100	1,100

B.2 : ENVOLVENTE DE CARGA E PRESSÃO PARA 1 BOMBA COM RAC

Tabela B. 2 - Envolvente para 1 Bomba com RAC

x(m)	z(m)	Ho(m)	Hmáx(m)	Hmin(m)	Pmáx(m)	Pmin(m)
0,000	-4,300	30,005	37,404	16,615	41,704	20,915
37,200	0,500	29,969	35,365	19,201	34,894	18,730
74,400	0,700	29,933	35,265	19,283	34,609	18,628
111,500	0,800	29,898	35,151	19,377	34,316	18,541

x(m)	z(m)	Ho(m)	Hmáx(m)	Hmin(m)	Pmáx(m)	Pmin(m)
148,700	1,000	29,862	35,052	19,451	34,028	18,427
185,900	1,300	29,826	34,939	19,546	33,606	18,212
223,100	2,500	29,791	34,841	19,621	32,371	17,151
260,200	3,600	29,755	34,740	19,716	31,123	16,099
297,400	5,100	29,719	34,644	19,792	29,518	14,666
334,600	4,200	29,684	34,553	19,888	30,351	15,686
371,800	2,400	29,648	34,457	19,965	32,081	17,588
409,000	1,600	29,612	34,364	20,062	32,745	18,442
446,100	2,100	29,577	34,268	20,139	32,166	18,037
483,300	2,300	29,541	34,175	20,237	31,867	17,929
520,500	2,500	29,505	34,076	20,315	31,575	17,814
557,700	2,800	29,470	33,984	20,414	31,218	17,649
594,900	3,000	29,434	33,883	20,493	30,876	17,485
632,000	3,300	29,398	33,790	20,592	30,452	17,253
669,200	3,700	29,362	33,691	20,672	29,955	16,936
706,400	4,000	29,327	33,604	20,772	29,559	16,727
743,600	4,100	29,291	33,505	20,853	29,360	16,708
780,700	4,300	29,255	33,417	20,954	29,160	16,696
817,900	4,500	29,220	33,317	21,035	28,818	16,536
855,100	4,800	29,184	33,227	21,137	28,416	16,326
892,300	5,400	29,148	33,126	21,220	27,775	15,868
929,500	5,800	29,113	33,035	21,322	27,230	15,517
966,600	6,400	29,077	32,934	21,406	26,571	15,043
1003,800	7,000	29,041	32,840	21,508	25,886	14,554
1041,000	7,200	29,006	32,739	21,594	25,503	14,358
1078,200	7,700	28,970	32,644	21,696	24,910	13,963
1115,400	8,100	28,934	32,542	21,783	24,447	13,688
1152,500	8,500	28,899	32,445	21,887	23,984	13,425
1189,700	8,800	28,863	32,343	21,975	23,521	13,153
1226,900	9,100	28,827	32,245	22,078	23,193	13,027
1264,100	10,100	28,792	32,143	22,168	21,999	12,024
1301,200	11,400	28,756	32,044	22,272	20,674	10,902
1338,400	12,000	28,720	31,941	22,363	19,920	10,342

x(m)	z(m)	Ho(m)	Hmáx(m)	Hmin(m)	Pmáx(m)	Pmin(m)
1375,600	12,500	28,684	31,842	22,468	19,337	9,962
1412,800	13,000	28,649	31,736	22,560	18,746	9,570
1450,000	13,500	28,613	31,638	22,664	18,159	9,185
1487,100	14,000	28,577	31,531	22,758	17,560	8,787
1524,300	14,500	28,542	31,432	22,863	16,979	8,410
1561,500	15,400	28,506	31,324	22,959	15,955	7,591
1598,700	16,300	28,470	31,224	23,064	14,881	6,720
1635,800	17,300	28,435	31,115	23,161	13,802	5,849
1673,000	18,300	28,399	31,015	23,266	12,740	4,991
1710,200	19,100	28,363	30,904	23,366	11,801	4,262
1747,400	19,400	28,328	30,804	23,470	11,403	4,069
1784,600	21,300	28,292	30,693	23,571	9,372	2,250
1821,700	21,500	28,256	30,592	23,677	9,113	2,198
1858,900	21,800	28,221	30,479	23,777	8,723	2,020
1896,100	22,000	28,185	30,378	23,885	8,365	1,871
1933,300	22,300	28,149	30,265	23,985	7,998	1,719
1970,500	22,500	28,114	30,163	24,095	7,643	1,575
2007,600	22,800	28,078	30,049	24,195	7,271	1,418
2044,800	23,000	28,042	29,947	24,307	6,916	1,276
2082,000	23,300	28,006	29,832	24,408	6,538	1,114
2119,200	23,500	27,971	29,729	24,521	6,222	1,013
2156,300	23,000	27,935	29,613	24,622	6,620	1,628
2193,500	23,200	27,899	29,511	24,735	6,340	1,564
2230,700	23,500	27,864	29,394	24,838	5,921	1,365
2267,900	24,000	27,828	29,291	24,952	5,324	0,985
2305,100	24,500	27,792	29,174	25,054	4,709	0,590
2342,200	24,900	27,757	29,070	25,170	4,154	0,255
2379,400	25,000	27,721	28,952	25,274	3,958	0,280
2416,600	25,100	27,685	28,848	25,391	3,698	0,242
2453,800	25,300	27,650	28,730	25,495	3,388	0,154
2491,000	25,600	27,614	28,625	25,615	3,032	0,022
2528,100	25,700	27,578	28,506	25,719	2,799	0,012
2565,300	25,900	27,543	28,401	25,841	2,487	-0,073

x(m)	z(m)	Ho(m)	Hmáx(m)	Hmin(m)	Pmáx(m)	Pmin(m)
2602,500	26,200	27,507	28,282	25,946	2,066	-0,270
2639,700	26,400	27,471	28,176	26,069	1,793	-0,314
2676,800	26,500	27,435	28,057	26,175	1,531	-0,351
2714,000	26,700	27,400	27,951	26,300	1,244	-0,406
2751,200	26,900	27,364	27,831	26,407	0,939	-0,485
2788,400	27,200	27,328	27,724	26,534	0,559	-0,632
2825,600	27,500	27,293	27,605	26,641	0,103	-0,861
2862,700	27,400	27,257	27,498	26,770	0,069	-0,659
2899,900	26,600	27,221	27,378	26,877	0,780	0,280
2937,100	26,300	27,186	27,271	27,010	1,018	0,758
2974,300	26,100	27,150	27,150	27,150	1,100	1,100

B.3 : ENVOLVENTE DE CARGA E PRESSÃO PARA 2 BOMBAS SEM RAC

Tabela B. 3 - Envolvente para 2 Bombas sem RAC

x(m)	z(m)	Ho(m)	Hmáx(m)	Hmin(m)	Pmáx(m)	Pmin(m)
0,000	-4,300	41,424	48,760	-0,011	53,060	4,289
37,200	0,500	41,246	48,754	-0,147	48,283	-0,618
74,400	0,700	41,067	48,749	-0,289	48,093	-0,945
111,500	0,800	40,889	48,734	-0,431	47,898	-1,267
148,700	1,000	40,711	48,713	-0,573	47,689	-1,598
185,900	1,300	40,532	48,692	-0,715	47,358	-2,049
223,100	2,500	40,354	48,663	-0,857	46,193	-3,327
260,200	3,600	40,175	48,629	-0,999	45,012	-4,616
297,400	5,100	39,997	48,589	-1,141	43,463	-6,267
334,600	4,200	39,818	48,545	-1,283	44,343	-5,485
371,800	2,400	39,640	48,501	-1,424	46,124	-3,801
409,000	1,600	39,462	48,452	-1,566	46,833	-3,185
446,100	2,100	39,283	48,400	-1,708	46,298	-3,810
483,300	2,300	39,105	48,345	-1,850	46,038	-4,157
520,500	2,500	38,926	48,289	-1,991	45,788	-4,492
557,700	2,800	38,748	48,230	-2,133	45,465	-4,898
594,900	3,000	38,569	48,170	-2,275	45,163	-5,282

x(m)	z(m)	Ho(m)	Hmáx(m)	Hmin(m)	Pmáx(m)	Pmin(m)
632,000	3,300	38,391	48,109	-2,416	44,770	-5,755
669,200	3,700	38,213	48,048	-2,558	44,312	-6,294
706,400	4,000	38,034	47,985	-2,699	43,940	-6,745
743,600	4,100	37,856	47,922	-2,841	43,777	-6,986
780,700	4,300	37,677	47,915	-2,982	43,658	-7,240
817,900	4,500	37,499	47,986	-3,124	43,487	-7,623
855,100	4,800	37,320	48,056	-3,265	43,245	-8,076
892,300	5,400	37,142	48,127	-3,407	42,775	-8,759
929,500	5,800	36,964	48,197	-3,548	42,392	-9,353
966,600	6,400	36,785	48,267	-3,690	41,904	-10,052
1003,800	7,000	36,607	48,336	-3,831	41,382	-10,785
1041,000	7,200	36,428	48,405	-3,972	41,169	-11,208
1078,200	7,700	36,250	48,474	-4,113	40,741	-11,847
1115,400	8,100	36,071	48,543	-4,255	40,448	-12,350
1152,500	8,500	35,893	48,612	-4,396	40,150	-12,858
1189,700	8,800	35,715	48,680	-4,537	39,858	-13,359
1226,900	9,100	35,536	48,748	-4,678	39,696	-13,730
1264,100	10,100	35,358	48,815	-4,819	38,672	-14,963
1301,200	11,400	35,179	48,883	-4,960	37,513	-16,331
1338,400	12,000	35,001	48,950	-5,102	36,929	-17,122
1375,600	12,500	34,822	49,016	-5,243	36,511	-17,748
1412,800	13,000	34,644	49,082	-5,384	36,092	-18,374
1450,000	13,500	34,466	49,148	-5,525	35,669	-19,004
1487,100	14,000	34,287	49,213	-5,666	35,242	-19,637
1524,300	14,500	34,109	49,278	-5,807	34,825	-20,260
1561,500	15,400	33,930	49,343	-5,947	33,975	-21,316
1598,700	16,300	33,752	49,407	-6,088	33,064	-22,431
1635,800	17,300	33,573	49,471	-6,229	32,158	-23,542
1673,000	18,300	33,395	49,534	-6,370	31,259	-24,645
1710,200	19,100	33,217	49,596	-6,511	30,492	-25,614
1747,400	19,400	33,038	49,658	-6,652	30,257	-26,053
1784,600	21,300	32,860	49,719	-6,792	28,398	-28,113
1821,700	21,500	32,681	49,779	-6,933	28,299	-28,412

x(m)	z(m)	Ho(m)	Hmáx(m)	Hmin(m)	Pmáx(m)	Pmin(m)
1858,900	21,800	32,503	49,837	-7,074	28,080	-28,830
1896,100	22,000	32,324	49,894	-7,214	27,880	-29,228
1933,300	22,300	32,146	49,949	-7,355	27,682	-29,621
1970,500	22,500	31,968	50,001	-7,495	27,480	-30,016
2007,600	22,800	31,789	50,049	-7,636	27,271	-30,414
2044,800	23,000	31,611	50,094	-7,776	27,062	-30,808
2082,000	23,300	31,432	50,133	-7,917	26,840	-31,210
2119,200	23,500	31,254	50,168	-8,057	26,660	-31,564
2156,300	23,000	31,075	50,196	-8,196	27,202	-31,190
2193,500	23,200	30,897	50,218	-8,335	27,047	-31,506
2230,700	23,500	30,719	50,232	-8,471	26,759	-31,944
2267,900	24,000	30,540	50,238	-8,603	26,271	-32,570
2305,100	24,500	30,362	50,232	-8,725	25,768	-33,189
2342,200	24,900	30,183	50,212	-8,828	25,296	-33,744
2379,400	25,000	30,005	50,168	-8,899	25,174	-33,893
2416,600	25,100	29,826	50,089	-8,919	24,939	-34,069
2453,800	25,300	29,648	49,959	-8,871	24,618	-34,213
2491,000	25,600	29,470	49,765	-8,738	24,172	-34,331
2528,100	25,700	29,291	49,492	-8,507	23,784	-34,214
2565,300	25,900	29,113	49,128	-8,160	23,214	-34,074
2602,500	26,200	28,934	48,658	-7,675	22,443	-33,891
2639,700	26,400	28,756	48,066	-7,022	21,683	-33,405
2676,800	26,500	28,577	47,325	-6,157	20,799	-32,682
2714,000	26,700	28,399	46,402	-5,018	19,696	-31,725
2751,200	26,900	28,221	45,250	-3,521	18,358	-30,413
2788,400	27,200	28,042	43,805	-1,540	16,639	-28,706
2825,600	27,500	27,864	41,976	1,107	14,474	-26,395
2862,700	27,400	27,685	39,635	4,698	12,206	-22,731
2899,900	26,600	27,507	36,594	9,670	9,997	-16,927
2937,100	26,300	27,328	32,573	16,739	6,320	-9,514
2974,300	26,100	27,150	27,150	27,150	1,100	1,100

B.4 : ENVOLVENTE DE CARGA E PRESSÃO PARA 2 BOMBAS COM RAC

Tabela B. 4 - Envolvente para 2 Bombas com RAC

x(m)	z(m)	Ho(m)	Hmáx(m)	Hmin(m)	Pmáx(m)	Pmin(m)
0,000	-4,300	41,424	52,887	13,640	57,187	17,940
37,200	0,500	41,246	41,246	14,554	40,775	14,083
74,400	0,700	41,067	41,067	14,656	40,412	14,000
111,500	0,800	40,889	40,889	14,796	40,053	13,960
148,700	1,000	40,711	40,711	14,897	39,686	13,872
185,900	1,300	40,532	40,532	15,038	39,199	13,704
223,100	2,500	40,354	40,354	15,141	37,884	12,671
260,200	3,600	40,175	40,175	15,282	36,558	11,665
297,400	5,100	39,997	39,997	15,388	34,871	10,262
334,600	4,200	39,818	39,818	15,529	35,616	11,328
371,800	2,400	39,640	39,640	15,639	37,264	13,263
409,000	1,600	39,462	39,462	15,781	37,842	14,161
446,100	2,100	39,283	39,283	15,894	37,181	13,792
483,300	2,300	39,105	39,105	16,035	36,797	13,728
520,500	2,500	38,926	38,926	16,152	36,425	13,651
557,700	2,800	38,748	38,748	16,294	35,983	13,529
594,900	3,000	38,569	38,569	16,413	35,562	13,406
632,000	3,300	38,391	38,391	16,556	35,052	13,217
669,200	3,700	38,213	38,213	16,675	34,477	12,940
706,400	4,000	38,034	38,034	16,822	33,989	12,777
743,600	4,100	37,856	37,856	16,941	33,711	12,796
780,700	4,300	37,677	37,677	17,092	33,420	12,834
817,900	4,500	37,499	37,499	17,211	33,000	12,712
855,100	4,800	37,320	37,320	17,365	32,509	12,554
892,300	5,400	37,142	37,142	17,485	31,790	12,133
929,500	5,800	36,964	36,964	17,642	31,159	11,838
966,600	6,400	36,785	36,785	17,763	30,423	11,400
1003,800	7,000	36,607	36,607	17,923	29,653	10,969
1041,000	7,200	36,428	36,428	18,045	29,192	10,809
1078,200	7,700	36,250	36,250	18,208	28,516	10,475

x(m)	z(m)	Ho(m)	Hmáx(m)	Hmin(m)	Pmáx(m)	Pmin(m)
1115,400	8,100	36,071	36,071	18,331	27,976	10,236
1152,500	8,500	35,893	35,893	18,498	27,431	10,036
1189,700	8,800	35,715	35,715	18,621	26,893	9,799
1226,900	9,100	35,536	35,536	18,791	26,484	9,740
1264,100	10,100	35,358	35,358	18,916	25,214	8,772
1301,200	11,400	35,179	35,179	19,089	23,809	7,719
1338,400	12,000	35,001	35,001	19,214	22,980	7,194
1375,600	12,500	34,822	34,822	19,392	22,317	6,887
1412,800	13,000	34,644	34,644	19,518	21,654	6,528
1450,000	13,500	34,466	34,466	19,699	20,987	6,220
1487,100	14,000	34,287	34,287	19,826	20,316	5,855
1524,300	14,500	34,109	34,109	20,009	19,656	5,556
1561,500	15,400	33,930	33,930	20,138	18,562	4,770
1598,700	16,300	33,752	33,752	20,322	17,409	3,979
1635,800	17,300	33,573	33,573	20,455	16,261	3,142
1673,000	18,300	33,395	33,395	20,641	15,120	2,366
1710,200	19,100	33,217	33,217	20,777	14,113	1,673
1747,400	19,400	33,038	33,038	20,964	13,637	1,563
1784,600	21,300	32,860	32,860	21,104	11,539	-0,217
1821,700	21,500	32,681	32,681	21,292	11,202	-0,187
1858,900	21,800	32,503	32,503	21,436	10,746	-0,321
1896,100	22,000	32,324	32,333	21,625	10,319	-0,388
1933,300	22,300	32,146	32,153	21,772	9,886	-0,494
1970,500	22,500	31,968	31,983	21,964	9,463	-0,557
2007,600	22,800	31,789	31,803	22,114	9,025	-0,664
2044,800	23,000	31,611	31,634	22,307	8,602	-0,724
2082,000	23,300	31,432	31,452	22,461	8,158	-0,833
2119,200	23,500	31,254	31,283	22,656	7,775	-0,852
2156,300	23,000	31,075	31,099	22,813	8,105	-0,180
2193,500	23,200	30,897	30,930	23,010	7,759	-0,161
2230,700	23,500	30,719	30,745	23,171	7,272	-0,302
2267,900	24,000	30,540	30,576	23,367	6,608	-0,600
2305,100	24,500	30,362	30,389	23,535	5,925	-0,930

x(m)	z(m)	Ho(m)	Hmáx(m)	Hmin(m)	Pmáx(m)	Pmin(m)
2342,200	24,900	30,183	30,220	23,731	5,304	-1,185
2379,400	25,000	30,005	30,033	23,903	5,038	-1,091
2416,600	25,100	29,826	29,863	24,100	4,714	-1,050
2453,800	25,300	29,648	29,675	24,278	4,333	-1,064
2491,000	25,600	29,470	29,505	24,474	3,913	-1,119
2528,100	25,700	29,291	29,316	24,659	3,609	-1,049
2565,300	25,900	29,113	29,147	24,855	3,233	-1,059
2602,500	26,200	28,934	28,957	25,045	2,741	-1,171
2639,700	26,400	28,756	28,787	25,241	2,404	-1,142
2676,800	26,500	28,577	28,597	25,436	2,071	-1,090
2714,000	26,700	28,399	28,427	25,634	1,720	-1,072
2751,200	26,900	28,221	28,236	25,828	1,344	-1,063
2788,400	27,200	28,042	28,065	26,033	0,900	-1,133
2825,600	27,500	27,864	27,874	26,227	0,373	-1,274
2862,700	27,400	27,685	27,704	26,438	0,275	-0,991
2899,900	26,600	27,507	27,512	26,632	0,915	0,035
2937,100	26,300	27,328	27,342	26,874	1,089	0,621
2974,300	26,100	27,150	27,150	27,150	1,100	1,100

B.5 : ENVOLVENTE DE CARGA E PRESSÃO PARA 3 BOMBAS SEM RAC

Tabela B. 5 - Envolvente para 3 Bombas sem RAC

x(m)	x(m)	Ho(m)	Hmáx(m)	Hmin(m)	Pmáx(m)	Pmin(m)
0,000	-4,300	46,950	46,950	-0,009	51,250	4,291
37,200	0,500	46,703	46,703	-0,204	46,232	-0,675
74,400	0,700	46,455	46,455	-0,403	45,800	-1,059
111,500	0,800	46,208	46,208	-0,602	45,372	-1,438
148,700	1,000	45,960	45,960	-0,801	44,936	-1,825
185,900	1,300	45,713	45,713	-1,000	44,379	-2,333
223,100	2,500	45,465	45,465	-1,199	42,995	-3,669
260,200	3,600	45,218	45,218	-1,398	41,601	-5,015
297,400	5,100	44,970	44,970	-1,597	39,844	-6,723
334,600	4,200	44,723	44,723	-1,796	40,521	-5,998

x(m)	x(m)	Ho(m)	Hmáx(m)	Hmin(m)	Pmáx(m)	Pmin(m)
371,800	2,400	44,475	44,475	-1,995	42,099	-4,371
409,000	1,600	44,228	44,228	-2,193	42,609	-3,813
446,100	2,100	43,980	43,980	-2,392	41,878	-4,494
483,300	2,300	43,733	43,733	-2,591	41,425	-4,899
520,500	2,500	43,485	43,485	-2,790	40,984	-5,290
557,700	2,800	43,238	43,238	-2,988	40,473	-5,753
594,900	3,000	42,990	42,990	-3,187	39,983	-6,194
632,000	3,300	42,743	42,743	-3,385	39,404	-6,724
669,200	3,700	42,495	42,495	-3,584	38,759	-7,320
706,400	4,000	42,248	42,248	-3,782	38,203	-7,827
743,600	4,100	42,000	42,000	-3,981	37,855	-8,126
780,700	4,300	41,753	41,753	-4,179	37,496	-8,436
817,900	4,500	41,505	41,505	-4,377	37,006	-8,876
855,100	4,800	41,258	41,258	-4,575	36,447	-9,387
892,300	5,400	41,010	41,010	-4,774	35,658	-10,125
929,500	5,800	40,763	40,763	-4,972	34,958	-10,776
966,600	6,400	40,515	40,515	-5,170	34,153	-11,532
1003,800	7,000	40,268	40,268	-5,368	33,314	-12,322
1041,000	7,200	40,020	40,020	-5,566	32,784	-12,802
1078,200	7,700	39,773	39,854	-5,764	32,120	-13,498
1115,400	8,100	39,525	39,955	-5,962	31,860	-14,057
1152,500	8,500	39,278	40,056	-6,160	31,594	-14,622
1189,700	8,800	39,030	40,157	-6,358	31,335	-15,180
1226,900	9,100	38,783	40,257	-6,556	31,205	-15,607
1264,100	10,100	38,535	40,357	-6,753	30,214	-16,897
1301,200	11,400	38,288	40,457	-6,951	29,087	-18,321
1338,400	12,000	38,040	40,557	-7,149	28,537	-19,169
1375,600	12,500	37,793	40,656	-7,346	28,151	-19,851
1412,800	13,000	37,545	40,756	-7,544	27,765	-20,534
1450,000	13,500	37,298	40,854	-7,741	27,375	-21,220
1487,100	14,000	37,050	40,953	-7,939	26,982	-21,910
1524,300	14,500	36,803	41,051	-8,136	26,598	-22,589
1561,500	15,400	36,555	41,149	-8,334	25,781	-23,702

x(m)	x(m)	Ho(m)	Hmáx(m)	Hmin(m)	Pmáx(m)	Pmin(m)
1598,700	16,300	36,308	41,247	-8,531	24,904	-24,874
1635,800	17,300	36,060	41,344	-8,728	24,031	-26,041
1673,000	18,300	35,813	41,441	-8,926	23,166	-27,200
1710,200	19,100	35,565	41,537	-9,123	22,433	-28,227
1747,400	19,400	35,318	41,632	-9,320	22,231	-28,721
1784,600	21,300	35,070	41,727	-9,517	20,406	-30,838
1821,700	21,500	34,823	41,821	-9,714	20,342	-31,193
1858,900	21,800	34,575	41,914	-9,911	20,158	-31,668
1896,100	22,000	34,328	42,006	-10,107	19,993	-32,121
1933,300	22,300	34,080	42,096	-10,304	19,830	-32,570
1970,500	22,500	33,833	42,185	-10,499	19,664	-33,019
2007,600	22,800	33,585	42,270	-10,693	19,492	-33,470
2044,800	23,000	33,338	42,353	-10,884	19,321	-33,915
2082,000	23,300	33,090	42,431	-11,070	19,137	-34,364
2119,200	23,500	32,843	42,505	-11,248	18,997	-34,755
2156,300	23,000	32,595	42,571	-11,413	19,578	-34,406
2193,500	23,200	32,348	42,629	-11,558	19,458	-34,729
2230,700	23,500	32,100	42,674	-11,677	19,201	-35,150
2267,900	24,000	31,853	42,702	-11,763	18,735	-35,730
2305,100	24,500	31,605	42,707	-11,811	18,242	-36,275
2342,200	24,900	31,358	42,682	-11,816	17,767	-36,732
2379,400	25,000	31,110	42,625	-11,773	17,631	-36,767
2416,600	25,100	30,863	42,529	-11,674	17,380	-36,824
2453,800	25,300	30,615	42,392	-11,512	17,050	-36,854
2491,000	25,600	30,368	42,207	-11,274	16,614	-36,867
2528,100	25,700	30,120	41,969	-10,944	16,261	-36,652
2565,300	25,900	29,873	41,668	-10,503	15,754	-36,416
2602,500	26,200	29,625	41,293	-9,923	15,077	-36,139
2639,700	26,400	29,378	40,830	-9,169	14,447	-35,552
2676,800	26,500	29,130	40,260	-8,192	13,734	-34,718
2714,000	26,700	28,883	39,558	-6,928	12,851	-33,634
2751,200	26,900	28,635	38,692	-5,283	11,800	-32,175
2788,400	27,200	28,388	37,618	-3,128	10,452	-30,293

x(m)	x(m)	Ho(m)	Hmáx(m)	Hmin(m)	Pmáx(m)	Pmin(m)
2825,600	27,500	28,140	36,278	-0,271	8,777	-27,772
2862,700	27,400	27,893	34,648	3,575	7,220	-23,854
2899,900	26,600	27,645	32,749	8,855	6,152	-17,742
2937,100	26,300	27,398	30,315	16,298	4,063	-9,955
2974,300	26,100	27,150	27,150	27,150	1,100	1,100

B.6 : ENVOLVENTE DE CARGA E PRESSÃO PARA 3 BOMBAS COM RAC

Tabela B. 6 - Envolvente para 3 Bombas com RAC

x(m)	z(m)	Ho(m)	Hmáx(m)	Hmin(m)	Pmáx(m)	Pmin(m)
0,000	-4,300	46,950	62,927	12,617	67,227	16,917
37,200	0,500	46,703	46,703	13,493	46,232	13,022
74,400	0,700	46,455	46,455	13,596	45,800	12,940
111,500	0,800	46,208	46,208	13,746	45,372	12,910
148,700	1,000	45,960	45,960	13,840	44,936	12,816
185,900	1,300	45,713	45,713	13,991	44,379	12,658
223,100	2,500	45,465	45,465	14,089	42,995	11,619
260,200	3,600	45,218	45,218	14,240	41,601	10,623
297,400	5,100	44,970	44,970	14,342	39,844	9,216
334,600	4,200	44,723	44,723	14,493	40,521	10,291
371,800	2,400	44,475	44,475	14,599	42,099	12,223
409,000	1,600	44,228	44,228	14,750	42,609	13,131
446,100	2,100	43,980	43,980	14,861	41,878	12,759
483,300	2,300	43,733	43,733	15,012	41,425	12,705
520,500	2,500	43,485	43,485	15,128	40,984	12,627
557,700	2,800	43,238	43,238	15,279	40,473	12,514
594,900	3,000	42,990	42,990	15,394	39,983	12,387
632,000	3,300	42,743	42,743	15,550	39,404	12,211
669,200	3,700	42,495	42,495	15,666	38,759	11,930
706,400	4,000	42,248	42,248	15,826	38,203	11,781
743,600	4,100	42,000	42,000	15,942	37,855	11,796
780,700	4,300	41,753	41,753	16,107	37,496	11,850
817,900	4,500	41,505	41,505	16,223	37,006	11,723

x(m)	z(m)	Ho(m)	Hmáx(m)	Hmin(m)	Pmáx(m)	Pmin(m)
855,100	4,800	41,258	41,258	16,392	36,447	11,581
892,300	5,400	41,010	41,010	16,509	35,658	11,157
929,500	5,800	40,763	40,763	16,682	34,958	10,878
966,600	6,400	40,515	40,515	16,800	34,153	10,437
1003,800	7,000	40,268	40,268	16,977	33,314	10,024
1041,000	7,200	40,020	40,020	17,096	32,784	9,860
1078,200	7,700	39,773	39,773	17,278	32,039	9,544
1115,400	8,100	39,525	39,525	17,397	31,430	9,302
1152,500	8,500	39,278	39,278	17,584	30,816	9,122
1189,700	8,800	39,030	39,030	17,704	30,208	8,882
1226,900	9,100	38,783	38,783	17,896	29,731	8,844
1264,100	10,100	38,535	38,535	18,017	28,392	7,874
1301,200	11,400	38,288	38,288	18,213	26,918	6,843
1338,400	12,000	38,040	38,040	18,335	26,020	6,315
1375,600	12,500	37,793	37,793	18,536	25,288	6,030
1412,800	13,000	37,545	37,545	18,659	24,555	5,669
1450,000	13,500	37,298	37,298	18,862	23,819	5,383
1487,100	14,000	37,050	37,050	18,989	23,079	5,018
1524,300	14,500	36,803	36,803	19,194	22,350	4,741
1561,500	15,400	36,555	36,555	19,325	21,187	3,957
1598,700	16,300	36,308	36,308	19,531	19,965	3,188
1635,800	17,300	36,060	36,060	19,667	18,747	2,354
1673,000	18,300	35,813	35,813	19,876	17,538	1,601
1710,200	19,100	35,565	35,565	20,016	16,461	0,912
1747,400	19,400	35,318	35,318	20,226	15,916	0,825
1784,600	21,300	35,070	35,070	20,370	13,749	-0,951
1821,700	21,500	34,823	34,823	20,583	13,344	-0,896
1858,900	21,800	34,575	34,575	20,732	12,818	-1,025
1896,100	22,000	34,328	34,328	20,946	12,314	-1,067
1933,300	22,300	34,080	34,080	21,100	11,814	-1,166
1970,500	22,500	33,833	33,833	21,317	11,312	-1,204
2007,600	22,800	33,585	33,585	21,475	10,807	-1,303
2044,800	23,000	33,338	33,338	21,692	10,306	-1,340

x(m)	z(m)	Ho(m)	Hmáx(m)	Hmin(m)	Pmáx(m)	Pmin(m)
2082,000	23,300	33,090	33,090	21,857	9,796	-1,437
2119,200	23,500	32,843	32,843	22,074	9,335	-1,433
2156,300	23,000	32,595	32,595	22,247	9,601	-0,747
2193,500	23,200	32,348	32,348	22,463	9,177	-0,708
2230,700	23,500	32,100	32,100	22,643	8,627	-0,830
2267,900	24,000	31,853	31,853	22,860	7,885	-1,107
2305,100	24,500	31,605	31,605	23,048	7,140	-1,417
2342,200	24,900	31,358	31,358	23,265	6,442	-1,651
2379,400	25,000	31,110	31,110	23,459	6,116	-1,535
2416,600	25,100	30,863	30,863	23,677	5,713	-1,473
2453,800	25,300	30,615	30,615	23,878	5,273	-1,464
2491,000	25,600	30,368	30,368	24,096	4,775	-1,497
2528,100	25,700	30,120	30,120	24,306	4,413	-1,402
2565,300	25,900	29,873	29,873	24,524	3,959	-1,390
2602,500	26,200	29,625	29,625	24,736	3,409	-1,480
2639,700	26,400	29,378	29,378	24,960	2,995	-1,423
2676,800	26,500	29,130	29,130	25,172	2,604	-1,354
2714,000	26,700	28,883	28,883	25,405	2,176	-1,301
2751,200	26,900	28,635	28,635	25,617	1,743	-1,275
2788,400	27,200	28,388	28,388	25,860	1,222	-1,306
2825,600	27,500	28,140	28,140	26,072	0,638	-1,430
2862,700	27,400	27,893	27,893	26,323	0,464	-1,105
2899,900	26,600	27,645	27,645	26,535	1,048	-0,062
2937,100	26,300	27,398	27,398	26,825	1,145	0,572
2974,300	26,100	27,150	27,150	27,150	1,100	1,100

B.7 : ENVOLVENTE DE CARGA E PRESSÃO PARA 3 BOMBAS COM RAC (PROPOSTA ALTERNATIVA)

Tabela B. 7 - Envolvente para 3 Bombas com RAC. Proposta Alternativa

x(m)	z(m)	Ho(m)	Hmáx(m)	Hmin(m)	Pmáx(m)	Pmin(m)
0,000	-4,300	47,483	62,489	14,122	66,789	18,422
35,600	0,500	47,258	47,258	15,082	46,795	14,619
71,200	0,600	47,033	47,033	15,183	46,393	14,544

x(m)	z(m)	Ho(m)	Hmáx(m)	Hmin(m)	Pmáx(m)	Pmin(m)
106,900	0,800	46,808	46,808	15,342	45,995	14,529
142,500	1,000	46,583	46,583	15,443	45,590	14,450
178,100	1,200	46,359	46,359	15,603	45,173	14,417
213,700	2,200	46,134	46,134	15,708	43,956	13,530
249,400	3,300	45,909	45,909	15,869	42,627	12,587
285,000	4,800	45,684	45,684	15,978	40,889	11,182
320,600	5,200	45,459	45,459	16,138	40,243	10,922
356,200	2,800	45,235	45,235	16,252	42,433	13,450
391,900	2,100	45,010	45,010	16,413	42,943	14,346
427,500	1,800	44,785	44,785	16,530	42,955	14,700
463,100	2,200	44,560	44,560	16,691	42,311	14,442
498,700	2,400	44,336	44,336	16,814	41,984	14,463
534,300	2,600	44,111	44,111	16,975	41,509	14,373
570,000	2,800	43,886	43,886	17,101	41,044	14,258
605,600	3,000	43,661	43,661	17,263	40,623	14,225
641,200	3,500	43,436	43,436	17,389	39,985	13,938
676,800	3,800	43,212	43,212	17,557	39,375	13,720
712,500	4,100	42,987	42,987	17,683	38,930	13,625
748,100	4,200	42,762	42,762	17,856	38,606	13,699
783,700	4,300	42,537	42,537	17,981	38,264	13,708
819,300	4,500	42,313	42,313	18,159	37,810	13,656
855,000	4,800	42,088	42,088	18,285	37,279	13,477
890,600	5,300	41,863	41,863	18,467	36,530	13,134
926,200	5,800	41,638	41,638	18,594	35,884	12,840
961,800	6,300	41,413	41,413	18,780	35,129	12,496
997,400	6,900	41,189	41,189	18,909	34,314	12,034
1033,100	7,200	40,964	40,964	19,099	33,776	11,912
1068,700	7,600	40,739	40,739	19,229	33,148	11,638
1104,300	8,000	40,514	40,514	19,424	32,526	11,436
1139,900	8,300	40,290	40,290	19,554	31,954	11,219
1175,600	8,700	40,065	40,065	19,754	31,380	11,070
1211,200	8,900	39,840	39,840	19,886	30,982	11,028
1246,800	9,600	39,615	39,615	20,090	29,968	10,444

x(m)	z(m)	Ho(m)	Hmáx(m)	Hmin(m)	Pmáx(m)	Pmin(m)
1282,400	10,800	39,390	39,390	20,223	28,640	9,473
1318,100	11,700	39,166	39,166	20,432	27,417	8,683
1353,700	12,200	38,941	38,941	20,566	26,720	8,345
1389,300	12,700	38,716	38,716	20,778	26,031	8,093
1424,900	13,100	38,491	38,491	20,916	25,342	7,766
1460,500	13,600	38,266	38,266	21,129	24,648	7,511
1496,200	14,100	38,042	38,042	21,271	23,953	7,183
1531,800	14,600	37,817	37,817	21,487	23,218	6,887
1567,400	15,500	37,592	37,592	21,633	22,068	6,109
1603,000	16,500	37,367	37,367	21,851	20,910	5,393
1638,700	17,400	37,143	37,143	22,001	19,757	4,615
1674,300	18,300	36,918	36,918	22,221	18,611	3,914
1709,900	19,100	36,693	36,693	22,376	17,595	3,279
1745,500	19,400	36,468	36,468	22,598	17,095	3,225
1781,200	21,000	36,243	36,243	22,758	15,243	1,757
1816,800	22,800	36,019	36,019	22,982	13,215	0,178
1852,400	21,700	35,794	35,794	23,147	14,081	1,434
1888,000	22,000	35,569	35,569	23,373	13,611	1,415
1923,600	22,200	35,344	35,344	23,543	13,142	1,341
1959,300	22,400	35,120	35,120	23,770	12,676	1,326
1994,900	22,700	34,895	34,895	23,945	12,206	1,257
2030,500	22,900	34,670	34,670	24,173	11,733	1,236
2066,100	23,200	34,445	34,445	24,356	11,265	1,175
2101,800	23,400	34,220	34,220	24,583	10,782	1,144
2137,400	23,200	33,996	33,996	24,774	10,752	1,531
2173,000	23,000	33,771	33,771	25,001	10,727	1,957
2208,600	23,300	33,546	33,546	25,199	10,264	1,917
2244,300	23,700	33,321	33,321	25,427	9,668	1,774
2279,900	24,100	33,097	33,097	25,633	8,970	1,507
2315,500	24,600	32,872	32,872	25,860	8,267	1,255
2351,100	24,900	32,647	32,647	26,075	7,719	1,146
2386,700	25,000	32,422	32,422	26,302	7,403	1,282
2422,400	25,200	32,197	32,197	26,525	7,021	1,349

x(m)	z(m)	Ho(m)	Hmáx(m)	Hmin(m)	Pmáx(m)	Pmin(m)
2458,000	25,400	31,973	31,973	26,752	6,603	1,382
2493,600	25,600	31,748	31,748	26,975	6,137	1,364
2529,200	25,700	31,523	31,523	27,210	5,816	1,504
2564,900	25,900	31,298	31,298	27,434	5,388	1,524
2600,500	26,200	31,073	31,073	27,678	4,874	1,478
2636,100	26,400	30,849	30,849	27,901	4,479	1,531
2671,700	26,500	30,624	30,624	28,154	4,118	1,648
2707,400	26,700	30,399	30,399	28,377	3,727	1,704
2743,000	26,900	30,174	30,174	28,639	3,324	1,788
2778,600	27,100	29,950	29,950	28,862	2,873	1,785
2814,200	27,400	29,725	29,733	29,162	2,334	1,763
2849,800	27,700	29,500	29,500	29,500	1,780	1,780

