

O EFEITO DE SOBREPRESSÕES EM CONDUTAS. MODELAÇÃO DA SUA REDUÇÃO ATRAVÉS DA UTILIZAÇÃO DE VÁLVULAS DE ESCAPE.

CRISTINA FILIPA GUERREIRO GUIMARÃES PIMENTEL

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

Orientador: Professor Doutor José Carlos Tentúgal Valente

Co-Orientador: Professor Doutor Francisco Manuel de Oliveira
Piqueiro

JULHO DE 2010

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2009/2010

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 - 2009/2010 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2009.*

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

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

Aos meus Pais

Quanto maiores forem as dificuldades a vencer, maior será a satisfação.

Cícero

AGRADECIMENTOS

A realização deste projecto contou com a colaboração e contributo de algumas pessoas a quem desejo manifestar o meu agradecimento.

Em primeiro lugar agradeço aos meus orientadores, Professor Doutor José Carlos Tentúgal Valente e Professor Doutor Francisco Manuel de Oliveira Piqueiro, pela disponibilidade, críticas e sugestões. Ao Professor Francisco Piqueiro agradeço ainda os programas disponibilizados para a realização deste trabalho.

A todos os docentes do ramo de especialização de Hidráulica pelo saber por eles transmitido que estou certa ser-me-á valioso ao longo da minha vida profissional.

Aos meus amigos da Faculdade que acompanharam todo o meu percurso académico, que sempre estiveram presentes nos momentos certos e que me apoiaram ao longo dos anos.

Ao Rui Costa pela sua preciosa ajuda em tudo o que se refere a programação.

Ao Tiago Rocha e à Susana Lopes pela amizade demonstrada, pela compreensão, paciência e estímulo dado. Estiveram sempre presentes com uma palavra de incentivo e disponíveis para auxiliar no que fosse preciso.

Ao meu pai, a quem devo tudo. A palavra obrigada subestima e não chega para agradecer todo o carinho, toda a compreensão e todo o incentivo transmitidos.

O contributo de todos tornou esta etapa um pouco mais fácil.

RESUMO

Os regimes transitórios, em hidráulica, ocorrem quando decorrem alterações às condições de funcionamento de uma conduta. Se estas alterações influenciarem as características elásticas da conduta e do líquido podem originar variações de pressão de grandeza significativa em relação aos valores referentes ao regime permanente. A este fenómeno dá-se o nome de choque hidráulico ou golpe de aríete.

Este trabalho tenta sintetizar os malefícios oriundos da ocorrência deste fenómeno em condutas e apresentar modos de atenuar os efeitos do mesmo.

Com este propósito foi feita uma pesquisa na bibliografia existente sobre este tema para se compreender o que sucede a uma conduta quando sujeita a tais variações de pressão. De seguida elencaram-se dispositivos existentes para atenuação dos efeitos deste fenómeno.

Neste trabalho dá-se maior relevo à Válvula de Descarga Automática (também denominada de Válvula de Escape ou Válvula de Alívio) visto ser um dispositivo ainda pouco usado e sobre o qual não se dispõe de tanta informação.

O último passo deste trabalho consistiu na modelação do comportamento deste tipo de dispositivo quando instalado numa conduta, tanto do tipo gravítica como elevatória e avaliar se é um dispositivo adequado ou se outros dispositivos mais frequentemente usados são melhores. Também permite verificar se existe qualquer tipo de restrições ao uso da válvula de alívio.

PALAVRAS-CHAVE: choque hidráulico, subpressões, sobrepressões, cavitação, válvula de descarga automática.

ABSTRACT

The transitory regimes, in hydraulics, occur when there are changes to the operating conditions of a conduct. If these changes influence the elastic characteristics of the conduct and the fluid they might cause pressure variations of significant value in comparison with those of the permanent regime. This phenomenon is called waterhammer.

This work tries to synthesize the harm arising from the occurrence of this phenomenon in conducts and to present ways to mitigate the effects of the same.

For this purpose a search was made in the existing literature on the subject in study which allowed to know exactly what happens to a conduct when subjected to these variation of pressure. After this a study was made about the existing means to mitigate the effects of this phenomenon.

In this work the Automatic Flush Valve takes greater emphasis than the other existing means due to the lack of use and information on the subject.

The last step of this work was precisely to model the behaviour of this device when installed in a conduct whether the gravitational type or the elevator one and see if it really is a suitable device or if other ones often used are better. It also allows to verify if there are any kind of restrictions to the valve's use.

KEYWORDS: waterhammer, uplift pressure, overpressure, cavitation, Automatic Flush Valve.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
1. INTRODUÇÃO	1
2. O FENÓMENO DO CHOQUE HIDRÁULICO	3
2.1.ESCOAMENTOS VARIÁVEIS SOBRE PRESSÃO	3
2.2.FUNDAMENTOS TEÓRICOS	4
2.3.QUANTIFICAÇÃO DOS ESCOAMENTOS VARIÁVEIS	6
2.3.1. MÉTODOS EXPEDITOS	6
2.3.1.1. Métodos Expeditos Aplicados a Conduas Gravíticas	6
2.3.1.2. Métodos Expeditos Aplicados a Conduas Elevatórias	10
2.3.2. MÉTODOS NUMÉRICOS	13
2.3.2.1. Condições Fronteira	14
2.3.2.2. Método das Características	14
2.3.2.3. Integração das Perdas de Carga	18
2.3.2.4. Condição Fronteira no Reservatório	21
2.3.2.5. Condição Fronteira do Grupo Elevatório	22
2.3.2.6. Equação Diferencial das Massas Girantes	23
2.3.2.7. Aplicação do Método das Características a Conduas Elevatórias	25
2.3.2.8. Aplicação do Método das Características a Conduas Gravíticas	26
3. EFEITOS DO CHOQUE HIDRÁULICO EM CONDUTAS	27
3.1. COTAS PIEZOMÉTRICAS EXTREMAS. SIMBOLOGIA E NOMENCLATURA	27
3.2. EFEITOS DAS SUBPRESSÕES	28
3.2.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS	28
3.2.2. CAVITAÇÃO. ROTURA DA VEIA LÍQUIDA	28
3.3. EFEITOS DAS SOBREPRESSÕES	32
3.3.1. SOBREPRESSÕES APÓS ROTURA DA VEIA LÍQUIDA	32
3.3.2. SOBREPRESSÕES POR EXPULSÃO DO AR	33

3.3.3. SOBREPRESSÕES DEVIDAS ÀS VARIAÇÕES DE PRESSÃO CAUSADAS PELO CHOQUE HIDRÁULICO.	34
3.4. FENÓMENOS DE RESSONÂNCIA	34

4. DISPOSITIVOS DE PROTECÇÃO CONTRA O CHOQUE HIDRÁULICO

37

4.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS	37
4.2. RESERVATÓRIO DE AR COMPRIMIDO, RAC.....	38
4.3. CHAMINÉ DE EQUILÍBRIO	41
4.4. VOLANTE DE INÉRCIA	44
4.5. VÁLVULA DE ESCAPE OU ALÍVIO	45

5. MODELAÇÃO DA REDUÇÃO DAS SOBREPRESSÕES RECORRENDO A UMA VÁLVULA DE ESCAPE

53

5.1. DESCRIÇÃO DO PROGRAMA USADO PARA A MODELAÇÃO DO CHOQUE HIDRÁULICO	53
5.2. DESCRIÇÃO DAS CONDUTAS USADAS PARA O ESTUDO DO FUNCIONAMENTO DA VÁLVULA. 53	53
5.2.1. CONDOTA GRAVÍTICA.	53
5.2.1.1. Localização da Conduita	53
5.2.1.2. A Necessidade de Protecção	57
5.2.1.3. Aplicação do Programa à Conduita em Estudo	59
5.2.2. CONDOTA ELEVATÓRIA.....	62
5.2.2.1. Localização da Conduita	62
5.2.2.2. Dimensionamento Hidráulico.....	63
5.2.2.3. Estudo do Choque Hidráulico.....	63
5.2.2.4. Cálculo da Válvula a Usar	64
5.2.2.5. Aplicação do Programa à Conduita em Estudo	65

6. CONCLUSÕES.....

67

BIBLIOGRAFIA.....

69

ANEXOS

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 2.1. – Esquema Simplificado de Uma Conduita Gravítica	7
Fig. 2.2. – Evolução da Propagação da Perturbação no Tempo	7
Fig. 2.3. – Evolução Temporal da Pressão na Secção da Válvula	7
Fig. 2.4. – Envolvente de Pressões Numa Conduita Gravítica Para o Caso de Manobra Instantânea ...	8
Fig. 2.5. – Envolvente de Pressões Numa Conduita Gravítica Para o Caso de Manobra Rápida.....	9
Fig. 2.6. – Envolvente de Pressões Numa Conduita Gravítica Para o Caso de Manobra Lenta	9
Fig. 2.7. – Envolvente de Pressões Numa Conduita Elevatória Para o Caso de Manobra Instantânea	12
Fig. 2.8. – Envolvente de Pressões Numa Conduita Elevatória Para o Caso de Manobra Rápida	12
Fig. 2.9. – Envolvente de Pressões Numa Conduita Elevatória Para o Caso de Manobra Lenta	13
Fig. 2.10. – Linhas Características no Plano (x, t)	17
Fig. 2.11. – Mudança de Inclinação na Conduita.....	20
Fig. 2.12. – Carga no Reservatório	22
Fig. 2.13. Possível Configuração para a Parábola e para a recta	23
Fig. 3.1. - Tipos de Cavitação Existentes: a) Rotura da Veia Líquida; b) Escoamento Bolhoso	30
Fig. 3.2. – Modelação da Rotura da Veia Líquida Com Cavidade no Topo da Coluna	31
Fig. 3.3. – Saída de Ar por um Orifício de uma Conduita Sob Pressão.	33
Fig. 3.4. – Ventosa. A) Saída de Ar. b) Sobrepressão Após Obturação.....	34
Fig. 4.1. – Esquema da Instalação de Um RAC Numa Conduita Elevatória.....	38
Fig. 4.2. – Escoamentos Possíveis na Tubeira.....	40
Fig. 4.3. – Fases de Funcionamento do RAC	40
Fig. 4.4. – Principais Tipos de Chaminés de Equilíbrio.....	42
Fig. 4.5. - Esquema de uma Chaminé de Equilíbrio com Estrangulamento na Base.....	42
Fig. 4.6. - Ábaco para a determinação do coeficiente de transmissão, s, em função da relação de secções (adaptado de Bernhart, 1976).....	43
Fig. 4.7. – Representação de um Volante de Inércia.....	44
Fig. 4.8. – Representação de uma Válvula de Alívio	45
Fig. 4.9. – Lei de Abertura da Válvula ($t_2 \gg t_1$)	47
Fig. 4.10. – Curva Característica Teórica da Válvula.....	48
Fig. 4.11. – Curva Característica Real da Válvula Fornecida por um Fabricante.....	49
Fig. 4.12. – Imagem de uma Válvula de Alívio.....	49
Fig. 4.13. – Válvula de Alívio Instalada numa Conduita Estando em Repouso	50

Fig. 4.14. – Primeira Imagem de uma Válvula de Alívio Instalada numa Conduto Quando em Funcionamento	50
Fig. 4.15. – Segunda Imagem de uma Válvula de Alívio Instalada numa Conduto Quando em Funcionamento	51
Fig. 4.16. – Terceira Imagem de uma Válvula de Alívio Instalada numa Conduto Quando em Funcionamento	51
Fig. 5.1. – Fotografias Aéreas do Local de Implantação da Conduto	54
Fig. 5.2. – Representação do Perfil Longitudinal da Conduto Gravítica	55
Fig. 5.3. – Indicação dos Comprimentos dos Vários Troços da Conduto.....	60
Fig. 5.4. – Indicação das Características da Conduto e do Choque Hidráulico	60
Fig. 5.5. – Indicação do Tempo de Manobra do Grupo.....	61
Fig. 5.6. – Fotografias Aéreas do Local de Implantação da Conduto	63
Fig.5.7. – Aplicação Gráfica do Método das Características na Secção Inicial e numa Secção Intermédia de uma Conduto Elevatória	65

ÍNDICE DE QUADROS (OU TABELAS)

Quadro 2.1. – Quadro para a determinação dos coeficientes c e K.....	10
Quadro 2.2. – Quadro dos Coeficientes a, b e c.....	11
Quadro 4.1. – Quadro com a Legenda da Figura 4.8.	47
Quadro 5.1. – Comparação dos valores obtidos para a conduta sem e com válvula	61
Quadro 5.2. – Variação das Sobrepressão e Subpressão Máximas depois da Aplicação da Válvula de Alívio.....	61

SÍMBOLOS

a – celeridade [m/s]

B – bomba

C – coeficiente experimental obtido através da relação entre a altura manométrica e o comprimento da conduta

C_c – coeficiente de contracção

C_R – número de Courant

C_1 – influência da forma de fixação da conduta na propagação das ondas de choque

C^+ , C^- – linhas características

d – diâmetro da tubeira [m]

D – diâmetro da conduta [m]

D_1 – diâmetro da conduta que faz ligação entre o RAC e a conduta principal [m]

D_n – diâmetro nominal da conduta [m]

e – espessura da conduta [m]

E – módulo de elasticidade do material constituinte [GPa]

E_C – energia cinética da coluna líquida [J]

E_G – energia cinética das massas girantes [J]

f_E – coeficiente correspondente à perda de carga total em regime permanente e uniforme

f_R – coeficiente de resistência

g – aceleração da gravidade [m/s²]

H – cota piezométrica / carga [m]

H_b – altura de elevação da bomba [m]

H_{bM} e H_{bm} – cotas piezométrica extremas [m]

H_{bo} – cota piezométrica inicial na secção imediatamente a jusante da bomba [m]

H_g – altura geométrica [m]

H_{man} – altura manométrica [m]

H_v – carga na válvula [m]

i – relação entre a altura manométrica e o comprimento da conduta [%]

I – momento de inércia [kg.m²]

I_0 – momento de inércia das massas girantes relativamente ao eixo de rotação [kg.m²]

K – coeficiente experimental que representa o efeito de inércia no grupo electrobomba

K_b – rugosidade da fórmula de Prandtl-Colebrook [mm]

L – comprimento da conduta [m]

- M_0 – momento actuante sobre as massas girantes da bomba [N.m]
 M_m – momento motor [N.m]
 M_r – momento resistente ou retardador [N.m]
 N – velocidade de rotação da bomba em r.p.m.
 P – pressão instantânea na secção [N/m²]
 P_b – potência no eixo da bomba [W]
 P_E – pressão correspondente ao esmagamento da conduta por acção da pressão extrema [N/m²]
 P_M – pressão máxima admissível [N/m²]
 P_s – pressão de saturação dos gases dissolvidos [N/m²]
 P_v – pressão de vaporização da água [N/m²]
 PD^2 – parâmetro de inércia industrial [N.m²]
 Q – caudal [m³/s]
 $Q_{\text{água}}$ – caudal de água escoado [m³/s]
 Q_{ar} – caudal do ar presente na conduta [m³/s]
 Q_b – caudal bombeado [m³/s]
 Q_{md} – valor máximo do caudal instantâneo [m³/s]
 R – reservatório
 S – secção líquida [m²]
 S_C – secção contraída [m²]
 S_R – secção da conduta de ligação do RAC à conduta principal [m²]
 T_{man} – tempo de manobra [s]
 T_p – tempo de paragem [s]
 U – velocidade média [m/s]
 U_{ar} – velocidade do ar na conduta [m/s]
 U_r – velocidade média numa secção da conduta de ligação do RAC à conduta principal [m/s]
 U_o – velocidade inicial do escoamento [m/s]
 U_1 e U_2 – módulos das velocidades das duas interfaces que limitam a cavidade de vapor [m/s]
 VR – válvula de retenção
 W – frequência angular [rad/s]
 Z – cota topográfica do eixo da conduta [m]
 Z_v – cota da válvula [m]
 \bar{Z} – impedância hidráulica

α – coeficiente de Coriolis

α' – coeficiente de quantidade de movimento

α_b – aceleração angular das massas girantes da bomba [rad/s^2]

Δ_v – variação da velocidade induzida no escoamento [m/s]

ε – módulo de elasticidade da água [GPa]

Υ – peso volúmico da água [N/m^3]

λ – coeficiente de compensação energética

η – rendimento do grupo [%]

μ – fase [s]

τ – tensão tangencial média na parcela da conduta [N/m^2]

ρ – massa volúmica do fluido [kg/m^3]

$\bar{\rho}$ – parâmetro da conduta

θ – ângulo do eixo com a horizontal [°]

θ_1 – tempo de percurso de onda de sobrepressão até à válvula de descarga [s]

ω – velocidade angular [rad/s]

ω_b – velocidade angular da bomba [rad/s]

ABREVIATURAS

DEC - Departamento de Engenharia Civil

EPAL – Empresa Portuguesa das Águas Livres, Sa

FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

IHRH – Instituto de Hidráulica e Recursos Hídricos

IPE – Investimento e Participações Empresariais – Águas de Portugal

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

RAC – Reservatório de Ar Comprimido

r.p.m. – rotações por minuto

1

INTRODUÇÃO

Quando se alteram as condições de funcionamento de uma conduta, o escoamento nela existente apresenta, durante um certo intervalo de tempo, um regime variável. Se estas alterações influenciarem as características elásticas da conduta e do líquido e originarem variações de pressão de grandeza significativa em relação aos valores referentes ao regime permanente, ocorre o fenómeno do choque hidráulico ou golpe de aríete.

A ocorrência deste fenómeno pode levar a graves problemas nas instalações hidráulicas, do ponto de vista estrutural, o que obriga a um estudo pormenorizado de cada caso para definir as características resistentes da estrutura e caso necessário proceder-se à escolha do dispositivo de protecção mais adequado e ao seu respectivo dimensionamento.

Com este trabalho pretende-se realizar uma síntese da informação existente sobre este fenómeno, particularmente sobre os seus efeitos nas conduitas aquando a sua ocorrência, métodos de análise e dispositivos de protecção existentes, recorrendo para isso à bibliografia existente, particularmente à do Professor Betânio de Almeida.

Esta dissertação dá maior ênfase aos efeitos das sobrepressões e no modo como uma Válvula de Escape (Válvula de Descarga Automática) atenua as variações de pressão decorrentes do choque hidráulico sendo que para esse efeito se recorre aos programas desenvolvidos pelo Professor Doutor Francisco Manuel de Oliveira Piqueiro que permitem a observação do comportamento da onda de pressão ao longo da conduta quando se dá o choque hidráulico. Sendo que o maior objectivo é saber se este dispositivo pode ser usado em detrimento dos dispositivos correntemente mais utilizados.

Posto isto, o trabalho agora apresentado está dividido em seis capítulos os quais são descritos de seguida.

O primeiro capítulo consiste na introdução na qual se apresentam os objectivos da dissertação e a sua estrutura.

No segundo capítulo descreve-se o fenómeno do choque hidráulico e apresentam-se os vários métodos existentes para a sua análise dando particular ênfase ao Método das Características visto que este é a base do programa usado para a modelação feita.

No terceiro capítulo focam-se os principais efeitos que as variações de pressão decorrentes do fenómeno podem ter, dando particular ênfase, como já foi dito, ao efeito das sobrepressões, ou seja, das pressões máximas atingidas nas conduitas.

O quarto capítulo descreve os meios existentes para a protecção contra os efeitos do fenómeno estudado, como por exemplo o RAC ou o Volante de Inércia. Dá-se particular atenção à Válvula de

Escape pois é um dispositivo ainda pouco usado para este efeito e sobre o qual ainda não existe grande informação.

No quinto capítulo trata-se da modelação propriamente dita, da aplicação de uma Válvula de Escape instalada numa conduita gravítica e numa elevatória de modo a ser possível verificar em que caso a aplicação deste dispositivo é mais adequada e se há alguma restrição ao seu funcionamento. Neste capítulo descrevem-se ainda as características das conduitas estudadas, como a sua localização ou o seu dimensionamento hidráulico.

No último capítulo apresentam-se as conclusões obtidas sendo feita a comparação do comportamento da válvula quando instalada nos dois tipos de conduita.

Acrescentando a isto tem-se também alguma informação sobre os dispositivos de protecção e as características das conduitas que são apresentadas em anexo.

2

O FENÓMENO DO CHOQUE HIDRÁULICO

2.1. ESCOAMENTOS VARIÁVEIS SOB PRESSÃO

Os escoamentos variáveis sob pressão são caracterizados pela mudança da velocidade média e da pressão, ao longo do tempo, em qualquer secção. Estes escoamentos podem ser provocados por inúmeros factores sendo os de maior relevo as manobras das válvulas ou as variações do regime de funcionamento de turbinas ou bombas.

Os escoamentos variáveis que garantem a passagem de um regime permanente para o outro intitulam-se transitórios.

É necessário diferenciar dois tipos de escoamento variáveis sob pressão, consoante a compressibilidade do líquido e a deformabilidade das paredes da conduita exerçam ou não influência fundamental dos processos em jogo.

O tipo de escoamento variável que ocorre numa conduita forçada ou numa conduita elevatória, e no qual é fundamental não só a compressibilidade do líquido como também da deformabilidade das paredes da conduita é denominado choque hidráulico que pode ocorrer, por exemplo, numa conduita com um dos extremos ligado a um reservatório e com o outro extremo ligado a um órgão regulador do caudal.

O escoamento variável sob pressão que se processa sem a influência da compressibilidade do líquido ou da deformabilidade da conduita não dá lugar a oscilação de nível ocorrendo, por exemplo, num reservatório de pequenas dimensões ligado a uma conduita com saída para a atmosfera. A superfície livre no reservatório vai diminuindo lentamente, ou seja, a aceleração do movimento na conduita é pequena e, em cada instante, o escoamento pode ser tratado como se fosse um escoamento em regime permanente. Este tipo de escoamento é denominado de escoamento quase-permanente.

Na análise dos movimentos variáveis, tanto em condutas forçadas como em condutas elevatórias, é de grande interesse a determinação das pressões extremas atingíveis. Estas serão usadas para o dimensionamento estrutural das condutas pois estas terão de ter capacidade resistente suficiente para aguentar as variações de pressão previstas de ocorrerem.

Como já foi dito o fenómeno do choque hidráulico é a manifestação do escoamento transitório que ocorre quando existe a transição entre regimes permanentes. Este regime transitório decorre de acções

como o arranque ou a paragem dos grupos, no caso de uma conduta elevatória, ou, no caso geral, bloqueios ou roturas dos circuitos hidráulicos.

Estas acções decorrem de modificações no comportamento das fronteiras do escoamento. A forma como estas alterações se manifestam ao longo das condutas é ditada pela celeridade, a , que simboliza a velocidade de propagação das ondas de pressão. Este parâmetro é um dos mais importantes no que diz respeito à análise do choque hidráulico.

$$a = \sqrt{\frac{1}{\rho \left(\frac{1}{\varepsilon} + \frac{D_n \times C_1}{E \times e} \right)}} \quad (2.1.1)$$

Na equação anterior ρ representa a massa volúmica do fluido, ε o módulo de elasticidade do fluido (valor usual para a água é de 2030MPa), D_n o diâmetro nominal da conduta, C_1 a influência da forma da fixação da conduta na propagação das ondas de choque, E o módulo de elasticidade do material constituinte e o e indica a espessura da conduta.

Outro parâmetro importante para o estudo deste fenómeno é a fase, μ , em que, sendo L o comprimento da conduta, se expressa como:

$$\mu = \frac{2L}{a} \quad (2.1.2)$$

2.2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

A análise do choque hidráulico é baseada em fundamentos que advêm da aplicação dos princípios do equilíbrio dinâmico e da conservação da matéria a um trecho de escoamento entre duas secções da conduta.

O sistema de equações diferenciais que constitui a base teórica adoptada para o estudo deste fenómeno fundamenta-se nas seguintes hipóteses:

- «O escoamento é considerado unidimensional, sendo as equações válidas dum ponto de vista global. Nesta conformidade, admite-se em cada secção da conduta e em cada instante, uma distribuição uniforme para a pressão e para a velocidade;
- Os coeficientes correctivos α e α' (coeficientes de Coriolis e de quantidade de movimento respectivamente) consideram-se constantes e iguais à unidade;
- O fluido é homogéneo e monofásico durante todo o regime variável. As características de compressibilidade do fluido podem ser expressas por um único parâmetro: o coeficiente de compressibilidade volumétrica ou o seu inverso, o módulo de elasticidade volumétrica;
- Ausência de trocas de caudal com o exterior através do envólucro lateral das condutas o qual é considerado perfeitamente impermeável;
- As perdas de carga são iguais às que se verificariam em cada instante, num regime uniforme tangente e permanente (hipótese de quase-estacionaridade);
- A variação da massa volúmica do fluido durante o regime variável pode ser desprezada em face dos valores das variações de outras grandezas. Igualmente não se têm em consideração eventuais variações de temperatura que ocorram durante o regime variável.

Para além destas últimas hipóteses referentes ao comportamento do escoamento e do fluido há ainda as referentes ao comportamento da conduta durante o choque hidráulico:

- Imobilidade do eixo da conduita apesar de esta estar submetida a solicitações dinâmicas;
- O envólucro da conduita tem um comportamento elástico, caracterizado pelos respectivos módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson sendo, contudo, pouco deformável;
- Em cada trecho elementar, a conduita é considerada como uniforme, não sendo tomadas em consideração as forças de inércia do envólucro.» [2]

Considerando todas as hipóteses acima referidas, o sistema de equações globais que caracteriza o fenómeno do choque hidráulico ao longo da conduita, independentemente das condições iniciais e de fronteira, é constituído por duas equações diferenciais: a equação da continuidade de massa e outra que exprime o comportamento das forças actuantes, incluindo as de inércia. Esta última equação pode ser baseada nos conceitos de energia (Teorema de Bernoulli) ou de quantidade de movimento (Lei de Newton).

Adoptando o conceito de quantidade do movimento, as equações indefinidas que constituem o modelo elástico do regime variável em pressão, são as seguintes:

Equação da continuidade

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{Q}{S} \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{a^2}{g \times S} \frac{\partial Q}{\partial x} - \frac{Q}{S} \operatorname{sen} \theta = 0 \quad (2.2.1)$$

Equação da dinâmica

$$\frac{1}{S} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{Q}{S^2} \frac{\partial Q}{\partial x} + g \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{4\tau}{\rho \times D} = 0 \quad (2.2.2)$$

Onde Q representa o caudal, H a cota piezométrica, S a secção líquida, D o diâmetro, a a celeridade das ondas elásticas, θ o ângulo do eixo com a horizontal, ρ a massa volúmica do fluido e τ a tensão tangencial média na parcela da conduita.

No cálculo dos valores das tensões tangenciais, é admitido que, considerando válida a hipótese da quase-estacionaridade, estes são iguais aos obtidos, em regime permanente e uniforme, com velocidade média, U, igual à instantânea, ou seja, utilizando coeficientes adimensionais (de Darcy-Weisbach). Então:

$$\tau = \rho U |U| f_r / 8 \quad (2.2.3)$$

Sendo f_r um coeficiente de resistência que se admite igual ao coeficiente f_E correspondente à perda de carga total em regime permanente e uniforme.

Como foi dito o regime transitório corresponde a uma variação no tempo das características do escoamento da conduita. Para entender essas variações é preciso saber como as variáveis independentes espaço, x, e tempo, t, em que se pode dizer que a variável espaço corresponde ao eixo do circuito, se relacionam. Se for feito um corte longitudinal da conduita tem-se a representação da “abscissa” ao longo do circuito no tempo. Com esta informação é por fim possível saber como o caudal e a carga na conduita variam ao longo da conduita e no tempo.

As equações apresentadas em cima, juntamente com as condições fronteira, serão integradas o que permitirá obter as funções $Q(x,t)$ e $H(x,t)$ e conseqüentemente resolver o problema da análise do choque hidráulico.

2.3. QUANTIFICAÇÃO DOS ESCOAMENTOS VARIÁVEIS

O estudo dos escoamentos variáveis tem como principal objectivo a quantificação do caudal, Q e da carga, H ao longo do tempo, t e do desenvolvimento da conduta, x . Isto é conseguido através de processos gráficos ou numéricos, procurando chegar às funções $Q(x,t)$ e $H(x,t)$.

A concretização deste objectivo poderá ser realizada pela aplicação de distintos métodos referidos de seguida.

2.3.1. MÉTODOS EXPEDITOS

Este tipo de métodos apenas permite definir a envolvente e não acompanhar o choque hidráulico ao longo do tempo.

Para se poder aplicar estes métodos é necessário caracterizar o escoamento variável e definir a sua evolução temporal.

2.3.1.1. Métodos Expeditos Aplicados a Conduas Gravíticas

No caso de se estar perante uma conduta gravítica ter-se-á como condição fronteira de jusante uma válvula, havendo que definir as respectivas Leis de Manobra (sejam elas manobras de fecho ou abertura, quer totais ou parciais) da mesma.

Classificação das manobras da válvula:

- Quanto à variação do caudal podem ser de abertura ou fecho;
- Quanto à magnitude da variação podem ser totais ou parciais;
- Quanto à duração estas podem ser instantâneas ($T_{man}=0$), rápidas ($T_{man}<\mu$) ou lentas ($T_{man}>\mu$).

Este tipo de dispositivo é modelado, hidraulicamente, como um orifício com a lei de vazão dada por:

$$Q = C \times S \times \sqrt{2g \times (H_v - Z_v)} \quad (2.3.1.1.)$$

Em que Q representa o caudal, H_v a carga na válvula e Z_v a cota da válvula.

Os valores de sobrepressões e subpressões que ocorrem ao longo do choque hidráulico, avaliados pela aplicação dos métodos expeditos, só são considerados pela forma e grandeza da Envolvente de Carga ao longo da conduta.

A envolvente depende da celeridade e da variação da velocidade induzida no escoamento, ΔU e a sua forma deriva da relação entre o tempo de manobra e a fase.

Apresentam-se de seguida alguns esquemas elucidativos da evolução temporal da propagação da perturbação causada pelo choque hidráulico nas condutas gravíticas bem como os diagramas tipo da envolvente de pressões para os três tipos de manobra.

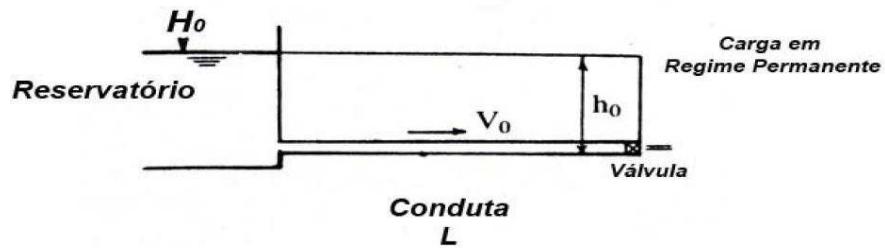


Fig.2.1. – Esquema Simplificado de Uma Conduita Gravítica. [10]

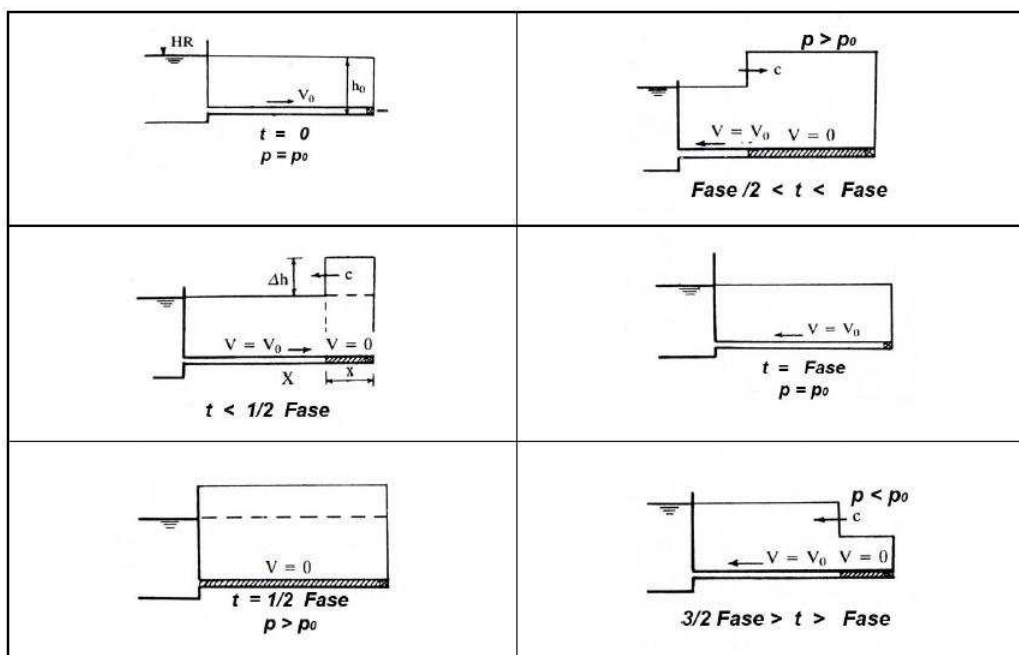


Fig.2.2. – Evolução da Propagação da Perturbação no Tempo [10]

A variação temporal da pressão na secção da válvula terá o seguinte aspecto:

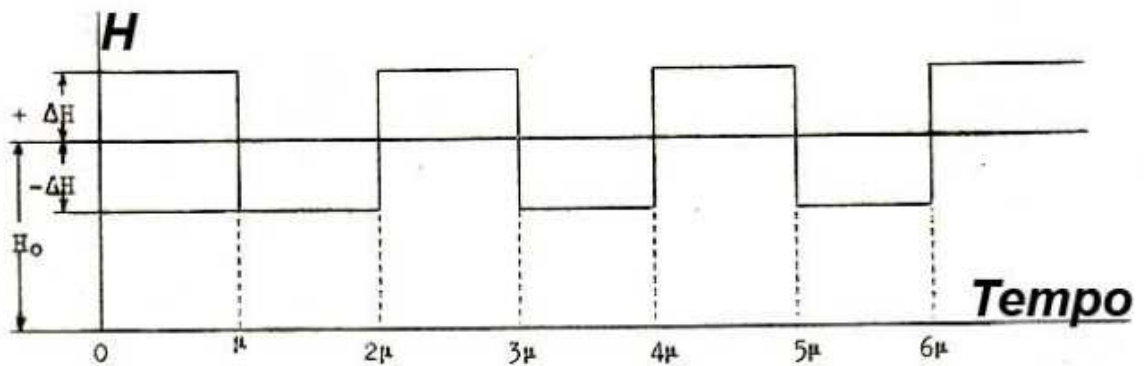


Fig.2.3. – Evolução Temporal da Pressão na Secção da Válvula [10]

Apresentam-se também, de seguida, os diagramas elucidativos das envolventes de pressão numa conduta gravítica, sendo T_p o tempo de paragem da válvula, ou seja, o tempo que a válvula demora a concluir a manobra.

- Manobra Instantânea: $T_p=0$. Neste tipo de manobras o acréscimo de pressão é dado pela equação (2.3.1.2.) e a envolvente de pressões terá a forma apresentada na figura 2.4.

$$\Delta H = \frac{a \times \Delta U}{g} \quad (2.3.1.2.)$$

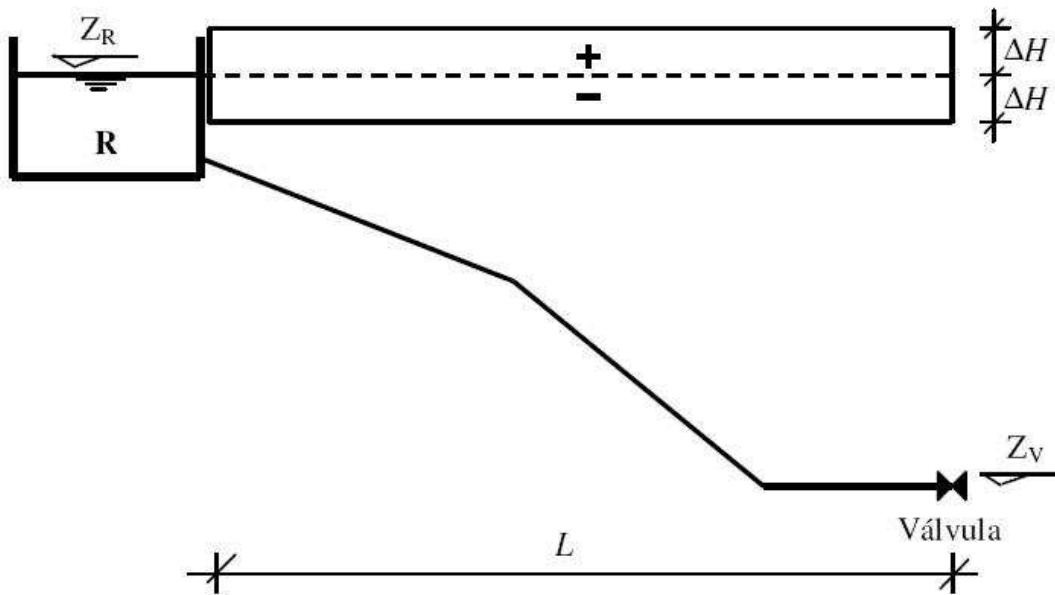


Fig.2.4. – Envolvente de Pressões Numa Condução Gravítica Para o Caso de Manobra Instantânea [10]

- Manobra Rápida: $T_p < \mu$. Nestas manobras o acréscimo ΔH é dado pela equação (2.3.1.3.) e a envolvente de pressões terá a forma apresentada na figura 2.5.

$$\Delta H = \frac{a \times \Delta U}{g} \quad (2.3.1.3.)$$

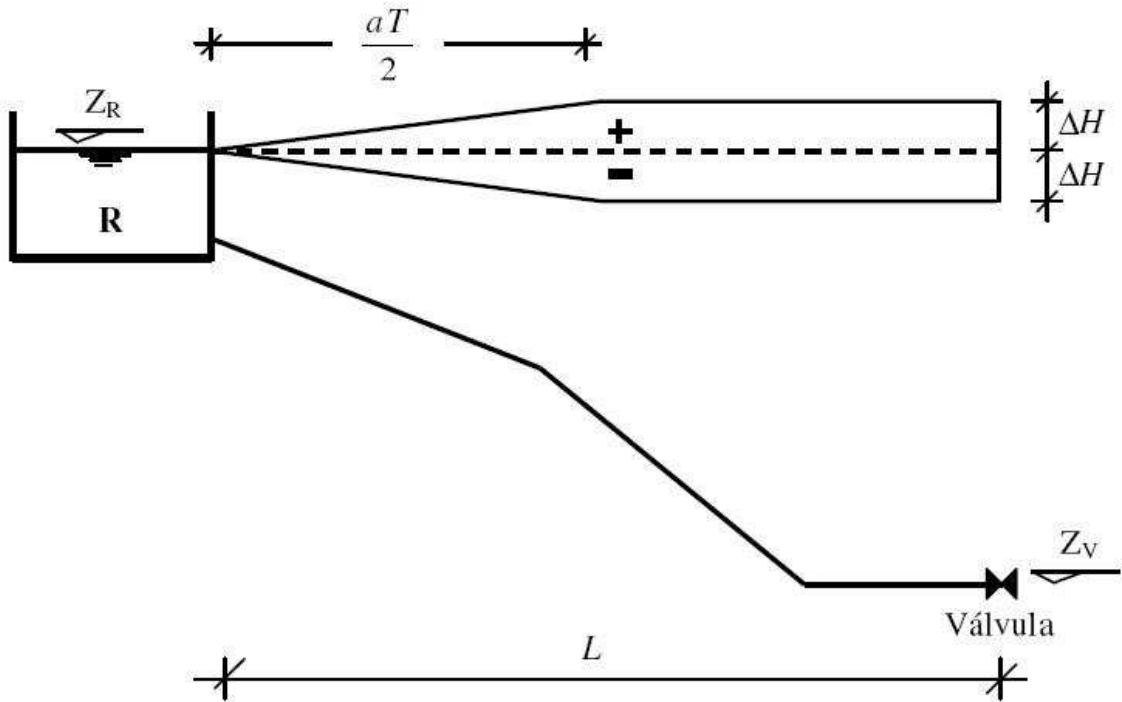


Fig.2.5. – Envolvente de Pressões Numa Conduita Gravítica Para o Caso de Manobra Rápida [10]

- Manobra Lenta: $T_p > \mu$. Nestas manobras o acréscimo ΔH é dado pela equação (2.3.1.4.) e a envolvente de pressões terá a forma apresentada na figura 2.6.

$$\Delta H = \frac{a \times V_0}{g} \frac{\mu}{T_p} \quad (2.3.1.4.)$$

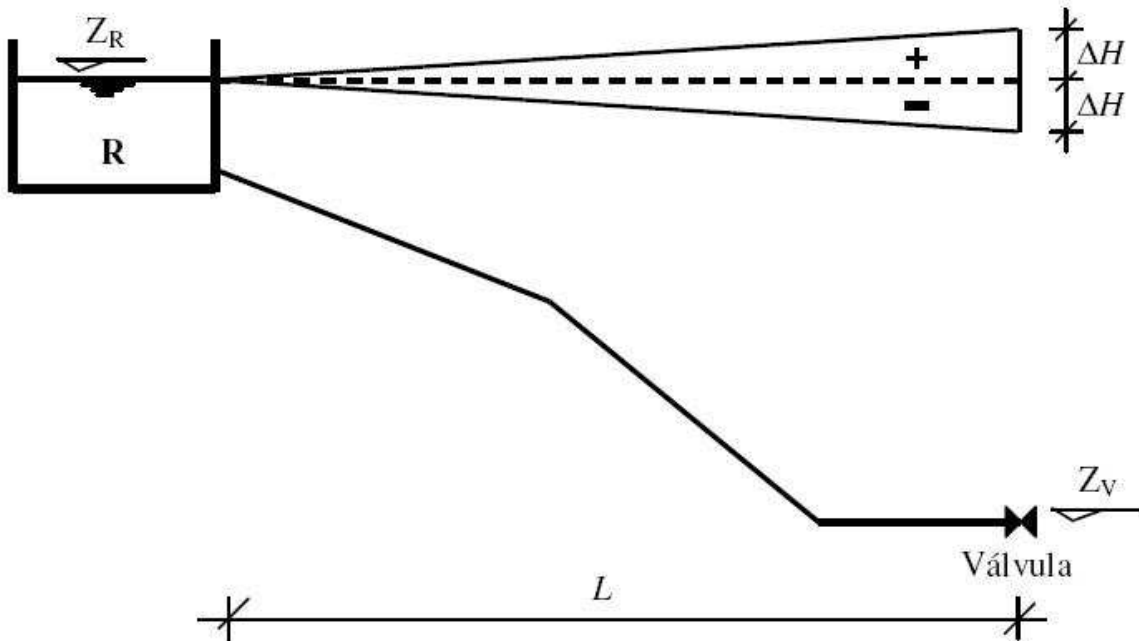


Fig.2.6. – Envolvente de Pressões Numa Conduita Gravítica Para o Caso de Manobra Lenta [10]

2.3.1.2. Métodos Expeditos Aplicados a Conduas Elevatórias

No caso de conduas elevatórias, o estudo do choque hidráulico prende-se com a caracterização da condição fronteira responsável pela ocorrência do fenómeno que consiste no grupo elevatório.

Num sistema elevatório o fenómeno do choque hidráulico, aquando de um disparo do grupo, desenvolve primeiro uma onda de depressão que se propaga para jusante a partir do grupo. A aplicação dos métodos expeditos a este tipo de condua leva à consideração de alterações à envolvente das depressões em relação à evolução da linha de carga para a situação de regime permanente.

Nas conduas elevatórias o choque hidráulico é influenciado pelo comportamento da estrutura e pela Lei de Paragem do Escoamento, a qual está directamente relacionada com a Lei de Paragem dos Grupos Elevatórios, ou seja, o modo como estes reagem no caso de falha da sua força motriz. Além disto, a Lei de Paragem do Escoamento estará também relacionada com a inércia do fluido.

Para a definição do tempo de paragem podem ser usadas as expressões de ROSICH ou do professor Betânio de Almeida.

Pelo processo de Rosich o tempo de paragem é dado por:

$$T_p = C + \frac{K \times L \times U_0}{g \times H_{man}} \quad (2.3.1.5.)$$

Em que T_p é o tempo de paragem, L é o comprimento da condua, U_0 é a velocidade inicial do escoamento, H_{man} é a altura manométrica, C é um coeficiente experimental obtido através do conhecimento de i que consiste na relação entre H_{man} e L . K é um coeficiente experimental que representa o efeito da inércia do grupo. Os valores dos coeficientes c e K encontram-se tabelados.

Quadro 2.1. – Quadro para a determinação dos coeficientes c e K

$i(\%)$	C	$L(m)$	K
≤ 20	1.0	< 500	2.0
25	0.8	500	1.75
30	0.6	$500 > L > 1500$	1.5
35	0.4	1500	1.25
> 40	0	> 1500	1.0

No processo proposto pelo professor Betânio de Almeida o tempo de paragem é dado por:

$$T_p = \frac{2}{3} (\eta \times \lambda + 1) \frac{L \times U_0}{g \times H_{man}} \quad (2.3.1.6.)$$

Em que η representa o rendimento do grupo e λ o coeficiente de compensação energética.

O coeficiente λ é dado através da seguinte relação:

$$\lambda = \frac{E_G}{E_c} \quad (2.3.1.7.)$$

Em que E_G é a energia cinética das massas girantes e E_c é a energia cinética da coluna líquida. As expressões que quantificam estas grandezas são as seguintes:

$$E_G = \frac{1}{2} I \times \omega^2 \quad (2.3.1.8.)$$

$$E_C = \gamma \times L \times S \frac{U_0^2}{2g} \quad (2.3.1.9.)$$

Em que ω consiste na velocidade angular e I na inércia do grupo electrobomba.

Os valores caracterizadores da inércia do grupo (bomba + veio + água + motor) são fornecidos pelos próprios fabricantes dos grupos. O parâmetro de inércia industrial, PD^2 , relaciona-se com o momento de inércia, I, pela seguinte expressão:

$$PD^2 = 4 \times g \times I \quad (2.3.1.10.)$$

O parâmetro PD^2 pode ser estimado recorrendo à seguinte equação:

$$PD^2 = a + bP_B + cP_B^2 \quad (2.3.1.11.)$$

É preciso ter em conta que esta relação se trata apenas de uma aproximação em que os valores dos coeficientes a, b e c estão relacionados com a velocidade de rotação, n e encontram-se tabelados. A falta de consideração da inércia dos propulsores, do veio e da água na estimativa destes coeficientes pode levar à obtenção de tempos de paragem inferiores aos que realmente ocorrem.

Apresenta-se de seguida o quadro que permite a determinação dos valores aproximados dos coeficientes a, b e c.

Quadro 2.2. – Quadro dos valores dos coeficientes a, b e c

Velocidade de rotação n (rpm)	a	b	C
750	2,95	1,176	0,00873
1000	5,02	0,658	0,00626
1500	2,21	0,517	0,00219
3000	-9,72	0,605	0,000183

A forma e a grandeza da Envolvente das Pressões serão obtidas considerando como principal parâmetro o Tempo de Paragem do Escoamento e adaptando o método ao funcionamento do sistema elevatório (manobra instantânea, rápida ou lenta).

Apresentam-se de seguida esquemas de envolventes para situações típicas dos três tipos de manobra:

- Manobra Instantânea: $T_p=0$. Neste tipo de manobras o acréscimo de pressão é dado pela equação (2.3.1.12.) e a envolvente de pressões terá a forma apresentada na figura 2.7.

$$\Delta H = \frac{a \times U_0}{g} \quad (2.3.1.12.)$$

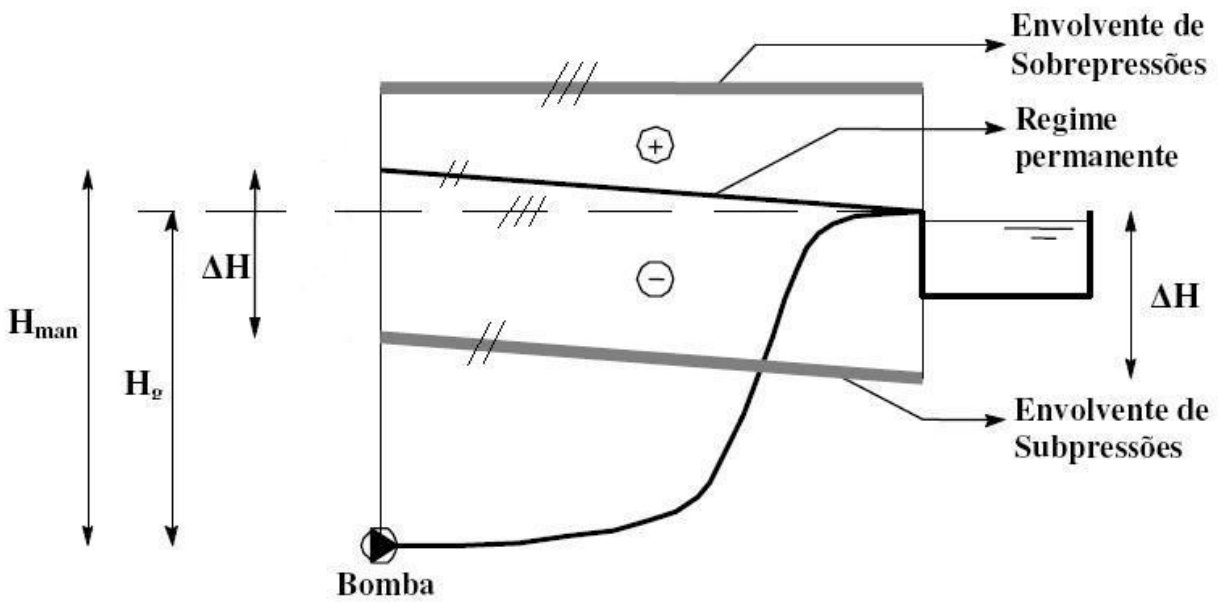


Fig.2.7. – Envoltório de Pressões Numa Condução Elevatória Para o Caso de Manobra Instantânea [10]

- Manobra Rápida: $T_p < \mu$. Nestas manobras o acréscimo ΔH é dado pela equação (2.3.1.13.) e a envoltório de pressões terá a forma apresentada na figura 2.8.

$$\Delta H = \frac{a \times \Delta U}{g} \quad (2.3.1.13.)$$

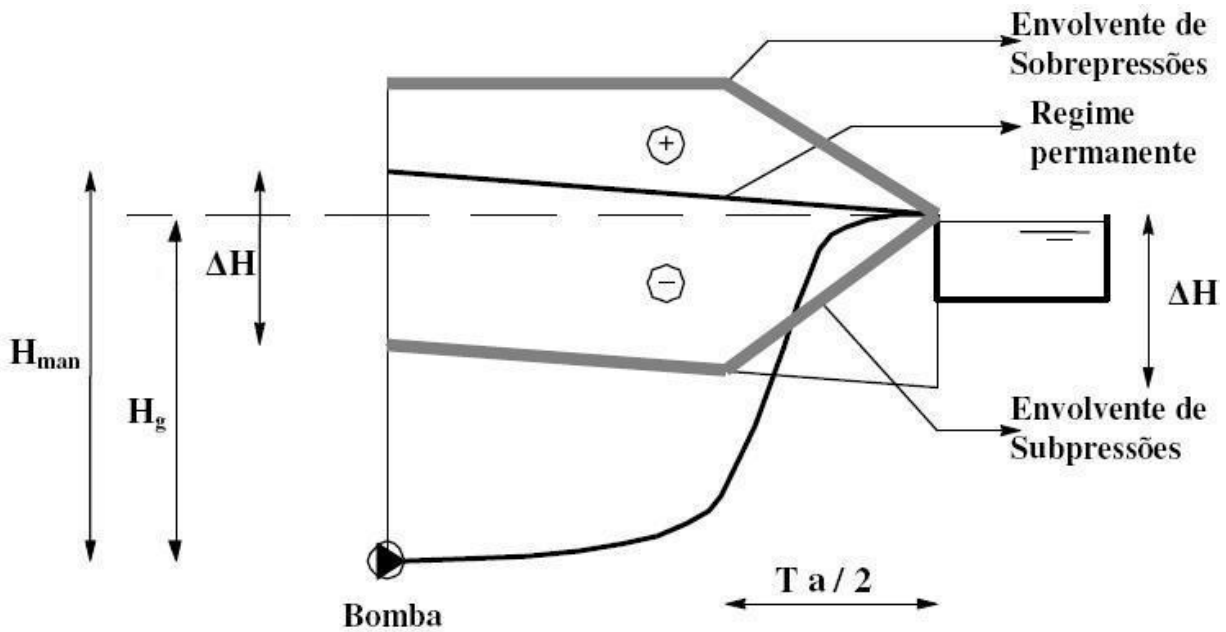


Fig.2.8. – Envoltório de Pressões Numa Condução Elevatória Para o Caso de Manobra Rápida [10]

- Manobra Lenta: $T_p > \mu$. Nestas manobras o acréscimo ΔH é dado pela equação (2.3.1.14.) e a envoltório de pressões terá a forma apresentada na figura 2.9.

$$\Delta H = \frac{a \times \Delta U}{g} \frac{\mu}{T_p} \quad (2.3.1.14.)$$

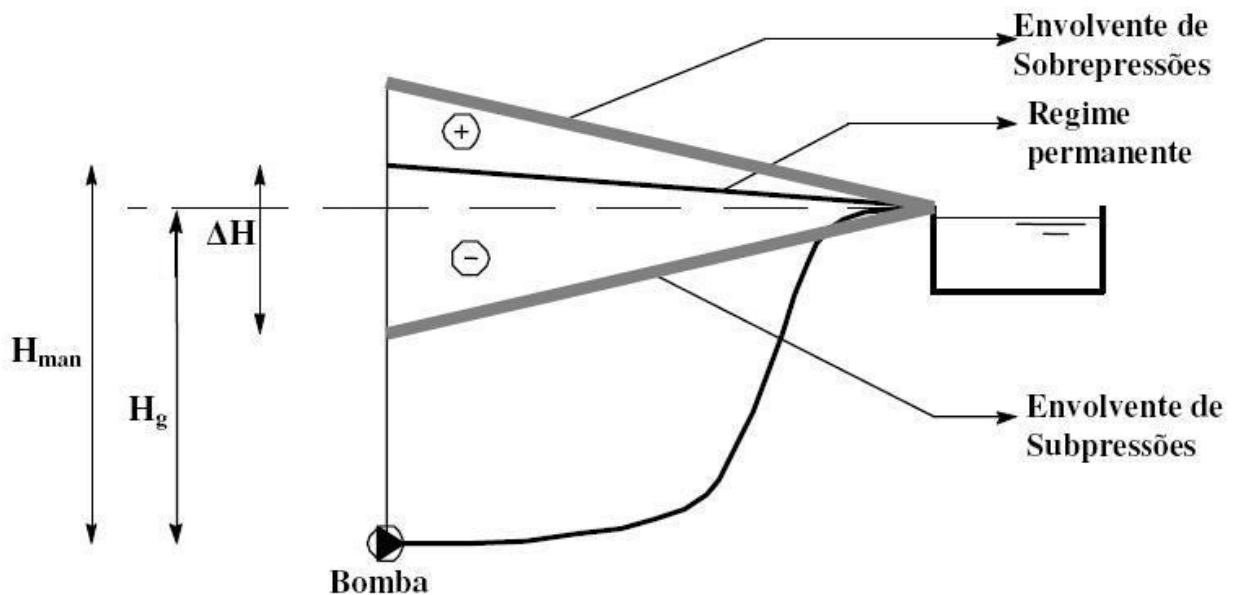


Fig.2.9. – Envoltório de Pressões Numa Condução Elevatória Para o Caso de Manobra Lenta [10]

2.3.2. MÉTODOS NUMÉRICOS

Como foi dito previamente o estudo dos regimes variáveis é comandado pelas equações do equilíbrio dinâmico e da conservação de massa. Estas equações formam um sistema de equações diferenciais do tipo hiperbólico, cuja solução exacta não pode ser obtida. Desenvolveram-se assim vários métodos de modo a se resolverem estas equações.

O elevado tipo de problemas e a chegada do cálculo computacional levaram ao desenvolvimento de métodos numéricos mais complexos tais como os indicados a seguir:

- Método das Diferenças Finitas (explícito ou implícito);
- Método das Características;
- Método dos Elementos Finitos;
- Método Espectral;
- Método dos Elementos de Contorno.

Sendo os mais utilizados o das Diferenças Finitas e o das Características. Estes métodos ultrapassaram os métodos algébricos ou gráficos devido à menor aproximação que estes apresentavam, sendo de notar que “ não devem ser utilizados para análise de grandes sistemas ou sistemas tendo condições de contorno complexas” (MENDONÇA, 1986, como retirado de [3]).

Os métodos computacionais possuem o benefício de se poderem utilizar para a análise de sistemas mais complexos com maior rigor e para um menor intervalo de tempo. Esses métodos foram desenvolvidos e aperfeiçoados, sendo actualmente o cálculo computacional uma ferramenta indispensável para a concepção hidráulica da instalação.

O Método das Características tornou-se famoso devido à sua eficiência e ao facto de as condições fronteira poderem ser as mais diversas.

Neste método são conhecidas as condições fronteiras e conhecem-se as equações diferenciais.

Nesta dissertação deu-se maior ênfase ao Método das Características visto permitir a visualização do choque hidráulico ao longo do tempo, possibilitando a avaliação do caudal e da carga em qualquer secção e instante.

2.3.2.1. Condições Fronteira

A caracterização das condições fronteira é de grande importância no estudo do fenómeno porque o regime transitório que virá a ocorrer é ditado pela sua natureza e resposta. Num sistema elevatório podem ser várias as condições fronteiras e é necessário, em primeiro lugar, identificá-las. Estas podem ser, por exemplo, uma válvula de retenção, um reservatório ou uma bomba.

Combinando as condições fronteira e as equações diferenciais, também chamadas de equações indefinidas, é possível obter a solução analítica.

- Condições Fronteira no Reservatório:

Como a conduita descarrega para uma superfície livre ou para o interior da água a carga vai ser sempre constante, para qualquer caudal.

- Condições Fronteira na Bomba:

Esta condição é expressa pela curva característica da bomba que consiste na relação entre a carga e o caudal em associação para o caso de uma bomba rotativa, com a equação das massas girantes. É normalmente a bomba que origina o regime transitório e é nela que existem mais problemas.

A bomba pode ter dois tipos de comportamento no regime transitório:

- Comportamento passivo: quando a relação entre a altura manométrica e o caudal se mantém e acontece o regime transitório devido a causas estranhas à bomba como válvulas e reservatórios de ar comprimido.

- Comportamento activo: em que a bomba é a causa principal da variação de escoamento. Isto deve-se à variação da velocidade de rotação da bomba ou da entrada ou saída de serviço da bomba.

O estudo do choque hidráulico é, usualmente, feito para a paragem da bomba aquando do corte súbito da força motriz visto ser este o caso de maior interesse. Assim, para este caso, a bomba representa uma condição fronteira dinâmica regida por duas equações:

- Equação diferencial que estabelece a relação dinâmica entre a cinemática do movimento de rotação das massas girantes e o momento actuante sobre as mesmas.
- Equação da curva característica da bomba.

2.3.2.2. Método das Características

O Método das Características, desenvolvido no século XIX por Rieman (retirado de [2]), tem sido considerado o mais adequado para o estudo dos regimes transitórios em pressão.

No Método das Características o fenómeno adopta uma lei de propagação de ondas que associa o tempo, t , com a abcissa x , definida ao longo do comprimento com tubulação através da celeridade. As equações indefinidas formam um sistema de equações parciais hiperbólicas quasi-linear.

Neste método, as equações de derivadas parciais são transformadas em equações diferenciais ordinárias integráveis pelo método das Diferenças Finitas. Nesta aplicação do método são considerados desprezáveis os termos convectivos, o que leva a que se obtenha uma versão simplificada das equações de derivadas parciais. As equações apresentadas de seguida foram retiradas do livro do Professor Manuel Pacheco Figueiredo da FEUP [7].

$$L_1 = 0 \Leftrightarrow \frac{\partial Q}{\partial t} + gS \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\lambda Q|Q|}{2DS} = 0 \quad (2.3.2.1.)$$

$$L_2 = 0 \Leftrightarrow gS \frac{\partial h}{\partial t} + a^2 \frac{\partial Q}{\partial x} - gQ \operatorname{sen} \theta = 0 \quad (2.3.2.2.)$$

Tendo em conta que L_1 e L_2 são iguais a zero, então qualquer combinação linear das duas também é nula.

$$L = L_1 + \beta L_2 = 0 \quad (2.3.2.3.)$$

Ou seja,

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gS \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\lambda Q|Q|}{2DS} + \beta(gS \frac{\partial H}{\partial t} + a^2 \frac{\partial Q}{\partial x} - gQ \operatorname{sen} \theta) = 0 \quad (2.3.2.4.)$$

O que é equivalente a:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \beta a^2 \frac{\partial Q}{\partial x} + \beta gS \left(\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{1}{\beta} \frac{\partial H}{\partial x} \right) + F|Q|Q - \beta gQ \operatorname{sen} \theta = 0 \quad (2.3.2.5.)$$

Apenas desde que se considere:

$$F = \frac{\lambda}{2DS} \quad (2.3.2.6.)$$

Logo, a cada valor de β escolhido corresponde uma equação diferencial, pelo que, a um par de valores de β ($A_1=0$ e $A_2=0$) corresponderão duas equações diferenciais equivalentes a (2.3.2.1.) e (2.3.2.2.):

$$A_1 = L_1 + \beta_1 L_2 = 0 \quad (2.3.2.7.)$$

$$A_2 = L_1 + \beta_2 L_2 = 0 \quad (2.3.2.8.)$$

Com o objectivo de encontrar as equações diferenciais ordinárias, tem interesse escolher dois valores para β que produzam esse efeito, o que se fará de seguida.

Considerem-se os diferenciais totais das variáveis dependentes Q e H:

$$dQ = \frac{\partial Q}{\partial t} dt + \frac{\partial Q}{\partial x} dx \quad (2.3.2.9.)$$

$$dH = \frac{\partial H}{\partial t} dt + \frac{\partial H}{\partial x} dx \quad (2.3.2.10.)$$

Dividindo estas equações por dt tem-se:

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} \frac{dx}{dt} \quad (2.3.2.11.)$$

$$\frac{dH}{dt} = \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial H}{\partial x} \frac{dx}{dt} \quad (2.3.2.12.)$$

Se agora se tomar:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{1}{\beta} \text{ e } \frac{dx}{dt} = \beta a^2 \quad (2.3.2.13.) \text{ e } (2.3.2.14.)$$

E se verifique o efeito produzido na combinação linear das equações diferenciais (2.3.2.5.) tem-se:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{dx}{dt} \frac{\partial Q}{\partial x} + \beta g S \left(\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{dx}{dt} \frac{\partial H}{\partial x} \right) + F|Q|Q - \beta g Q \sin \theta = 0 \quad (2.3.2.15.)$$

Ou, se forem tidas em conta as equações (2.3.2.9.) e (2.3.2.10.):

$$\frac{dQ}{dt} + \beta g S \frac{dH}{dt} + F|Q|Q - \beta g Q \sin \theta = 0 \quad (2.3.2.16.)$$

Encontra-se assim, uma nova versão para a combinação linear que é válida para:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{1}{\beta} = \beta a^2 \quad (2.3.2.17.)$$

Esta condição tem duas consequências: a fixação do valor de β e a definição de uma relação entre as variáveis independentes x e t , para a qual é válida a equação (2.3.2.16.). Da equação (2.3.2.18.) pode-se deduzir que:

$$\frac{1}{\beta} = \beta a^2 \Rightarrow \beta = \pm \frac{1}{a} \quad (2.3.2.18.)$$

Do conhecimento de β resulta a relação entre x e t :

$$\frac{dx}{dt} = +a \quad \text{para} \quad \beta = +\frac{1}{a} \quad (2.3.2.19.)$$

Ou

$$\frac{dx}{dt} = -a \quad \text{para} \quad \beta = -\frac{1}{a} \quad (2.3.2.20.)$$

Assim, a cada valor de β corresponde uma equação diferencial ordinária e uma relação entre x e t , gerando-se dois conjuntos de equações:

- Para $\beta = +\frac{1}{a}$ tem-se um conjunto de equações C^+ ;

$$\frac{dQ}{dt} + \frac{g}{a} S \frac{dH}{dt} + F|Q|Q - \frac{g}{a} Q \sin \theta = 0 \quad (2.3.2.21.)$$

$$\frac{dx}{dt} = +a \quad (2.3.2.22.)$$

- Para $\beta = -\frac{1}{a}$ tem-se um conjunto de equações C^- .

$$\frac{dQ}{dt} - \frac{g}{a} S \frac{dH}{dt} + F|Q|Q + \frac{g}{a} Q \sin \theta = 0 \quad (2.3.2.23.)$$

$$\frac{dx}{dt} = -a \quad (2.3.2.24.)$$

Se se considerar uma representação cartesiana das variáveis x e t (figura 2.10.), na qual cada ponto é representativo de uma dada secção (x) em determinado instante (t). Tendo em conta o facto de a celeridade a , ser constante para uma determinada conduta, a integração de (2.3.2.22.) e (2.3.2.24.) leva então respectivamente a:

$$x_P - x_A = a(t_P - t_A) \quad (2.3.2.25.)$$

$$x_P - x_B = -a(t_P - t_B) \quad (2.3.2.26.)$$

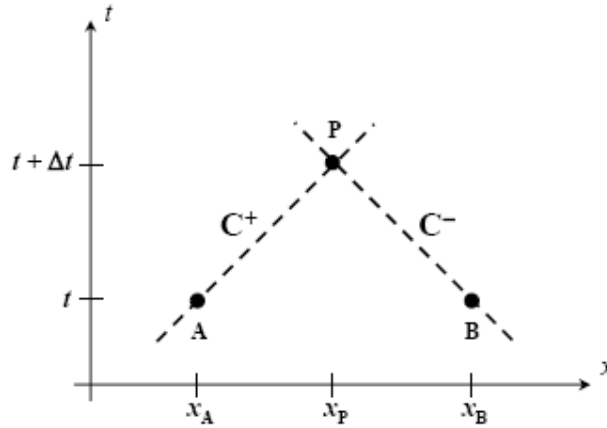


Fig.2.10. – Linhas Características no Plano (x,t) [7]

São equações de rectas no plano (x,t), designadas por linhas características, ao longo das quais as equações características (2.3.2.21.) e (2.3.2.23.) são válidas. A estas equações corresponde uma integração em ordem ao tempo. Equações equivalentes, integráveis em ordem ao espaço, podem também ser obtidas. Para isso, começa-se por dividir por dx as equações (2.3.2.9.) e (2.3.2.10.) tendo então:

$$\frac{dQ}{dx} = \frac{\partial Q}{\partial t} \frac{dt}{dx} + \frac{\partial Q}{\partial x} \quad (2.3.2.27.)$$

$$\frac{dH}{dx} = \frac{\partial H}{\partial t} \frac{dt}{dx} + \frac{\partial H}{\partial x} \quad (2.3.2.28.)$$

Considerando novamente a equação (2.3.2.17.) conclui-se que:

$$\frac{dt}{dx} = \beta = \frac{1}{\beta a^2} \quad (2.3.2.29.)$$

O que, atendendo também a (2.3.2.27.) e (2.3.2.28.) leva a que a combinação linear das equações diferenciais fique:

$$\frac{dQ}{dx} + \frac{gS}{\beta a^2} \frac{dH}{dx} + \frac{F|Q|Q}{\beta a^2} - \frac{g}{a^2} Q \text{sen} \theta = 0 \quad (2.3.2.30.)$$

Então, os dois novos conjuntos de equações são escritos do seguinte modo:

- Para equações C⁺ ($\beta = +\frac{1}{a}$);

$$\frac{dH}{dx} + \frac{a}{gS} \frac{dQ}{dx} + \frac{F|Q|Q}{gS} - \frac{Q}{aS} \text{sen} \theta = 0 \quad (2.3.2.31.)$$

$$\frac{dx}{dt} = +a \quad (2.3.2.32.)$$

- Para equações C⁻ ($\beta = -\frac{1}{a}$).

$$\frac{dH}{dx} - \frac{a}{gS} \frac{dQ}{dx} + \frac{F|Q|Q}{gS} + \frac{Q}{aS} \text{sen}\theta = 0 \quad (2.3.2.33.)$$

$$\frac{dx}{dt} = -a \quad (2.3.2.34.)$$

Embora as equações (2.3.2.31.) e (2.3.2.33.) sejam equivalentes a, respectivamente, (2.3.2.21.) e (2.3.2.23.), estão mais próximas da forma final adequada à integração. De facto, é fácil deduzir que:

$$C^+: \frac{dH}{dx} + \frac{a}{gS} \frac{dQ}{dx} + \frac{F|Q|Q}{gS} - \frac{Q}{aS} \text{sen}\theta = 0 \quad (2.3.2.35.)$$

$$C^-: \frac{dH}{dx} - \frac{a}{gS} \frac{dQ}{dx} + \frac{F|Q|Q}{gS} + \frac{Q}{aS} \text{sen}\theta = 0 \quad (2.3.2.36.)$$

Integrando (2.3.2.35.) entre os pontos A e P e (2.3.2.36.) entre os pontos B e P, tem-se:

$$C^+: H_p - H_A + \frac{a}{gS} (Q_p - Q_A) + I^+ = 0 \quad (2.3.2.37.)$$

$$C^-: H_p - H_A - \frac{a}{gS} (Q_p - Q_A) + I^- = 0 \quad (2.3.2.38.)$$

Sendo

$$I^+ = \int_{x_A}^{x_P} \left(\frac{F|Q|Q}{gS} - \frac{Q}{aS} \text{sen}\theta \right) dx \quad (2.3.2.39.)$$

$$I^- = \int_{x_A}^{x_P} \left(\frac{F|Q|Q}{gS} + \frac{Q}{aS} \text{sen}\theta \right) dx \quad (2.3.2.40.)$$

Correspondentes à integração das perdas de carga e do efeito produzido pela inclinação da conduta.

2.3.2.3. Integração das Perdas de Carga

A integração de (2.3.2.39.) e (2.3.2.40.) obriga ao recurso a um método numérico aproximado. Considerando o integral da função genérica f(x):

$$I = \int_{x_1}^{x_2} f(x) dx \approx f(x_1 + K\Delta x) \Delta x \quad (2.3.2.41.)$$

Sendo $\Delta x = x_2 - x_1$, enquanto K representa o factor de ponderação. Admitindo um comportamento linear para f(x) no intervalo de integração, é possível escrever:

$$f(x_1 + K\Delta x) = (1 - K)f(x_1) + Kf(x_2) \quad (2.3.2.42.)$$

Pelo que o integral fica agora com o aspecto:

$$I = \int_{x_1}^{x_2} f(x) dx \approx [(1 - k)f(x_1) + Kf(x_2)](x_2 - x_1) \quad (2.3.2.43.)$$

Aplicando esta formação a (2.3.2.39.) e (2.3.2.40.) obtém-se respectivamente:

$$I^+ = (1-K) \left[\frac{\lambda_A |Q_A| Q_A}{2gDS^2} - \frac{Q_A \text{sen} \theta_A}{aS} \right] (x_p - x_A) + K \left[\frac{\lambda_p |Q_p| Q_p}{2gDS^2} - \frac{Q_p \text{sen} \theta_p}{aS} \right] (x_p - x_A) \quad (2.3.2.44.)$$

$$I^- = (1-K) \left[\frac{\lambda_B |Q_B| Q_B}{2gDS^2} - \frac{Q_B \text{sen} \theta_B}{aS} \right] (x_p - x_B) + K \left[\frac{\lambda_p |Q_p| Q_p}{2gDS^2} - \frac{Q_p \text{sen} \theta_p}{aS} \right] (x_p - x_B) \quad (2.3.2.45.)$$

Definindo para uma dada secção da conduta os parâmetros:

$$R = \frac{\lambda}{2gDS^2} \Delta x \quad (2.3.2.46.)$$

e

$$T = \frac{\text{sen} \theta}{aS|Q|} \Delta x \quad (2.3.2.47.)$$

As expressões dos integrais I^+ e I^- podem ser reescritas de forma mais sintética:

$$I^+ = (1-K)(R_A - T_A)|Q_A|Q_A + K(R_p - T_p)|Q_p|Q_p \quad (2.3.2.48.)$$

$$I^- = -(1-K)(R_B - T_B)|Q_B|Q_B - K(R_p - T_p)|Q_p|Q_p \quad (2.3.2.49.)$$

Sendo que a troca de sinal em (2.3.2.49.) é devida a:

$$x_p - x_B = -\Delta x \quad (2.3.2.50.)$$

Visto que, x_B é maior do que x_p .

As equações características são agora escritas do seguinte modo:

$$C^+ : H_p + [A + K(R_p - T_p)|Q_p|]Q_p - C_A = 0 \quad (2.3.2.51.)$$

$$C^- : H_p - [A + K(R_p + T_p)|Q_p|]Q_p - C_B = 0 \quad (2.3.2.52.)$$

Desde que seja considerado que:

$$A = \frac{a}{gS} \quad (2.3.2.53.)$$

$$C_A = H_A + [A + K(R_A - T_A)|Q_A|]Q_A \quad (2.3.2.54.)$$

$$C_B = H_B - [A + K(R_B + T_B)|Q_B|]Q_B \quad (2.3.2.55.)$$

Caso sejam conhecidos os valores de Q e H nas secções A e B, as equações características (2.3.2.51.) e (2.3.2.52.) formam um sistema de equações cujas incógnitas são Q_p e H_p .

Antes de se avançar com o tratamento deste problema é de salientar a necessidade de se proceder ao desdobramento do parâmetro relativo à inclinação da conduta, em particular quando se refere à secção P. Quando se verifica uma mudança de inclinação da conduta em P, o parâmetro T adopta valores diferentes à esquerda e à direita (ver figura 2.11.).

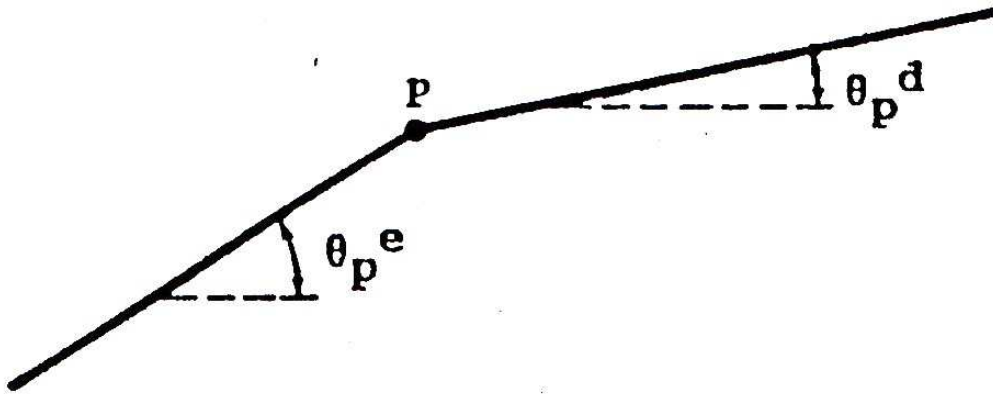


Fig.2.11. – Mudança de Inclinação da Conduita [7]

$$T_p^e = \frac{\text{sen } \theta_p^e}{aS|Q_p|} \Delta x \quad (2.3.2.56.)$$

$$T_p^d = \frac{\text{sen } \theta_p^d}{aS|Q_p|} \Delta x \quad (2.3.2.57.)$$

Retomando a determinação de Q_p e H_p ao adicionar ordenadamente as equações características (2.3.2.51.) e (2.3.2.52.) e considerando o anteriormente exposto no que diz respeito ao parâmetro T .

$$2H_p - KT_p^e|Q_p|Q_p - KT_p^d|Q_p|Q_p - C_A - C_B = 0 \quad (2.3.2.58.)$$

O que, resolvendo em ordem a H_p resulta em:

$$H_p = \frac{K(T_p^e + T_p^d)|Q_p|Q_p + C_A + C_B}{2} \quad (2.3.2.59.)$$

Da subtração ordenada das equações características resulta:

$$K(2R_p + T_p^d - T_p^e)|Q_p|Q_p + 2AQ_p - C_A + C_B = 0 \quad (2.3.2.60.)$$

Trata-se de uma equação do tipo:

$$a|x|x + bx + c = 0 \quad (2.3.2.61.)$$

Em que a e b são não negativos. É possível demonstrar que existe apenas uma solução para a equação anterior (2.3.2.61.) que é expressa por:

$$x = -\frac{2c}{b + \sqrt{b^2 + 4a|c|}} \quad (2.3.2.62.)$$

Para que a equação (2.3.2.60.) satisfaça as condições da equação (2.3.2.61.) é preciso que:

$$2R_p + T_p^d - T_p^e \geq 0 \quad (2.3.2.63.)$$

e

$$A \geq 0 \quad (2.3.2.64.)$$

Enquanto que esta última condição é automaticamente verificada, o mesmo pode não acontecer com a equação (2.3.2.63.). No entanto, na maioria dos casos, a grandeza relativa de R e T ($R > T$) e o facto de os parâmetros T à direita e à esquerda se subtraírem asseguram o cumprimento da referida condição. Então, a equação (2.3.2.60.) resolvida em ordem ao caudal vem:

$$Q_p = \frac{C_A - C_B}{A_1} \quad (2.3.2.65.)$$

Sendo

$$A_1 = A + \sqrt{A^2 + 2KR_p |C_A - C_B|} \quad (2.3.2.66.)$$

As equações (2.3.2.59.) e (2.3.2.65.) possibilitam a determinação dos valores do caudal e da carga na secção P, mas apenas se forem previamente conhecidos em secções e instantes adequadamente relacionados pelas equações das linhas características (2.3.2.25.) e (2.3.2.26.). Assim, para determinar Q e H num instante t e numa dada secção x da conduta é preciso conhecer os valores das referidas variáveis em duas secções ($x - \Delta x$, $x + \Delta x$) no instante $t - \Delta t$, sendo:

$$\Delta x = a \Delta t \quad (2.3.2.67.)$$

Resta ultrapassar a dificuldade apresentada pela presença do parâmetro da perda de carga na equação resolvente do caudal (2.3.2.65.), dado que R_p tal como definido em (2.3.2.46.) é dependente do caudal. Alguns autores ultrapassam este problema admitindo que o escoamento apresenta características de escoamento turbulento rugoso, pelo que a perda de carga depende apenas da rugosidade da conduta.

$$\lambda = \lambda \left(\frac{K}{D} \right) \quad (2.3.2.68.)$$

Mas tomando o valor de Q_p no instante anterior obtém-se uma primeira aproximação ao valor de R_p o que possibilitará dar início a um processo iterativo que converge para valores de Q_p e R_p compatíveis. Resolvida deste modo a equação (2.3.2.65.), determina-se a carga H_p recorrendo à equação (2.3.2.59.)

Finalmente refere-se a conveniência de usar o factor de ponderação $K=0.5$, que corresponde a uma integração numérica que valoriza de igual modo a perda de carga e a inclinação da conduta nos extremos dos intervalos de integração $[x_A, x_P]$ ou $[x_P, x_B]$.

2.3.2.4. Condição Fronteira no Reservatório

No reservatório a carga é constante e idêntica à cota topográfica da superfície livre da água, ou da extremidade da conduta, caso esta descarregue para a atmosfera (ver figura 2.12.).

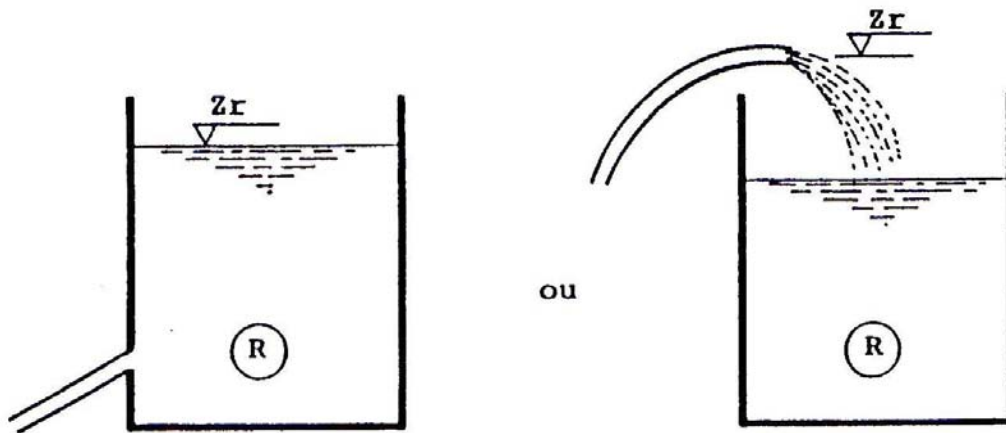


Fig.2.12. – Carga no Reservatório [7]

A definição das equações resolventes do caudal e da carga na secção do reservatório passa pela substituição da equação característica C^- por uma condição fronteira apropriada. Sendo assim, a carga imediatamente a montante da extremidade da conduta é expressa por:

$$H_p = Z_R + K_L |Q_p| Q_p \quad (2.3.2.69.)$$

Sendo que a segunda parcela do segundo membro desta equação representa a ocasional perda de carga localizada na extremidade da conduta. Considerando (2.3.2.69.) na expressão da equação característica C^+ (2.3.2.51.) resulta:

$$(K_L + KR_p - KT_p^e) Q_p |Q_p| + A Q_p - C_A + Z_R = 0 \quad (2.3.2.70.)$$

É novamente uma equação do tipo da (2.3.2.61.), apenas se:

$$K_L + KR_p - KT_p^e \geq 0 \quad (2.3.2.71.)$$

E então a solução é exprimida por:

$$Q_p = \frac{2(C_A - Z_R)}{A_2} \quad (2.3.2.72.)$$

Sendo

$$A_2 = A + \sqrt{A^2 + 4(K_L + KR_p - KT_p^e) Z_R - C_A} \quad (2.3.2.73.)$$

O valor de H_p é adquirido por substituição do caudal assim determinado em (2.3.2.51.) e (2.3.2.69.). Quando for possível desprezar a perda de carga localizada o valor de K_L é tido como nulo.

2.3.2.5. Condição Fronteira do Grupo Elevatório

Nesta secção, a equação característica C^+ é substituída pela curva característica da bomba expressa por:

$$H_p = DN^2 + BNQ_p - CQ_p^2 \quad (2.3.2.74.)$$

Sendo a velocidade angular N definida pela lei de paragem da bomba. O parâmetro D surge para evitar confusão com o parâmetro A que foi definido em (2.3.2.53.).

Introduzindo a equação (2.3.2.74.) na equação característica C- (2.3.2.52.) tem-se:

$$DN^2 + BNQ_p - CQ_p^2 - [A + K(R_p - T_p^d)]Q_p \Big| Q_p - C_B = 0 \quad (2.3.2.75.)$$

Ou ainda

$$-CQ_p^2 - K(R_p + T_p^d)Q_p \Big| Q_p + BNQ_p - AQ_p + DN^2 - C_B = 0 \quad (2.3.2.76.)$$

Com a finalidade de simplificar a resolução desta equação convém optar pelo valor do factor de ponderação correspondente à integração numérica explícita ($K=0$), tendo-se agora:

$$-CQ_p^2 + (BN - A)Q_p + DN^2 - C_B = 0 \quad (2.3.2.77.)$$

E cuja raiz positiva é dada por:

$$Q_p = \frac{BN - A}{2C} + \frac{1}{2C} \sqrt{(BN - A)^2 + 4C(DN^2 - C_B)} \quad (2.3.2.78.)$$

Válida para $C_B \leq DN^2$. Se pelo contrário $C_B \geq DN^2$ e $A > BN$ (em geral $A \gg BN$), então deve-se tomar $Q_p=0$ devido à presença da válvula de retenção imediatamente a jusante da bomba.

É de salientar que as raízes de (2.3.2.77.) traduzem a intersecção da curva característica com a recta da equação.:

$$H_p = AQ_p + C_B \quad (2.3.2.79.)$$

Resultante de se fazer $K=0$ em (2.3.2.52.). A figura que se apresenta de seguida tenta representar uma das possíveis configurações, tanto para a parábola como para a recta.

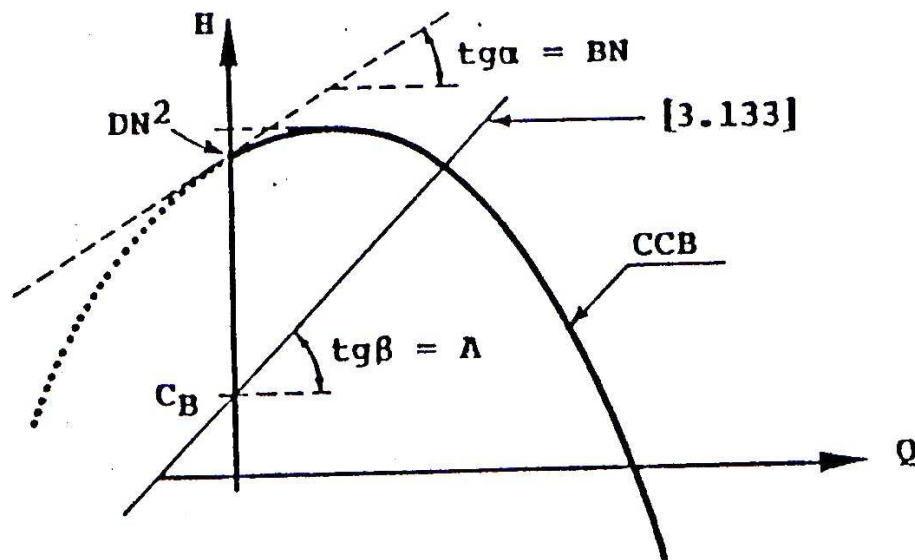


Fig.2.13. – Possível Configuração para a Parábola e para a recta. De notar que a equação da recta marcada como (3.133.) é de facto a equação (2.3.2.79.) [7]

Finalmente, a carga H_p é calculada pela introdução do valor de Q_p na equação (2.3.2.79.)

2.3.2.6. Equação Diferencial das Massas Girantes

Considerando que as massas girantes da bomba são rígidas, a equação diferencial será escrita do seguinte modo:

$$M_0 = M_M - M_r = \alpha_b I_0 \quad (2.3.2.80.)$$

Em que M_0 é o momento actuante sobre as massas girantes da bomba, M_M é o momento motor, M_r o momento resistente ou retardador, α_b é a aceleração angular das massas girantes da bomba e I_0 é o momento de inércia das massas girantes relativamente ao eixo de rotação.

Admitindo que a aceleração angular α_b se trata da derivada em ordem ao tempo da velocidade angular da bomba ω_b ter-se-á:

$$\alpha_b = \frac{d\omega_b}{dt} \quad (2.3.2.81.)$$

E exprimindo esta em rotações por minuto (r.p.m.) pela variável N , tem-se que:

$$\omega_b = \frac{2\pi N}{60} \quad (2.3.2.82.)$$

Neste caso a equação diferencial (2.3.2.80.) tomará o seguinte aspecto:

$$M_0 = M_M - M_r = \frac{2\pi}{60} I_0 \frac{dN}{dt} \quad (2.3.2.83.)$$

A interrupção do fornecimento de energia à bomba implica a anulação do momento motor, ou seja:

$$M_m = 0 \quad (2.3.2.84.)$$

Pelo que a equação diferencial (2.3.2.82.) ficará igual a:

$$M_r = -\frac{2\pi}{60} I_0 \frac{dN}{dt} \quad (2.3.2.85.)$$

O momento resistente, M_r , está dependente da altura de elevação H_b , do caudal Q_b e da velocidade de rotação da bomba N . Na zona de bombagem normal, e para valores do caudal diferentes de zero, o momento resistente pode ser expresso de forma aproximada por:

$$M_r = \frac{P_b}{\omega_b} \quad (2.3.2.86.)$$

Sendo P_b a potência no eixo da bomba.

Atendendo a que, num movimento de rotação, a potência desenvolvida por um binário é definida pelo produto deste pela velocidade angular.

A potência no eixo da bomba é calculada recorrendo à seguinte expressão:

$$P_b = \frac{\gamma Q_b H_b}{\eta} \quad (2.3.2.87.)$$

Em que γ é o peso volúmico do fluido e η é o rendimento da bomba.

Substituindo (2.3.2.87.) e (2.3.2.82.) na equação (2.3.2.86.) tem-se que:

$$M_r = \frac{60}{2\pi N} \frac{\gamma Q_b H_b}{\eta} \quad (2.3.2.88.)$$

Introduzindo (2.3.2.88.) em (2.3.2.85.) a equação diferencial das massas girantes terá como aspecto final o seguinte:

$$\frac{dN}{dt} = -\frac{900\gamma Q_b H_b}{\pi^2 I_0 N \eta} \quad (2.3.2.89.)$$

Integrando a equação apresentada anteriormente entre os instantes t_1 e t_{1+1} , vem que:

$$\int_{N_i}^{N_{i+1}} dN = -\frac{900\gamma}{\pi^2 I_0} \int_{t_i}^{t_{i+1}} \frac{Q_b H_b}{N \eta} dt \quad (2.3.2.90.)$$

A integração numérica de (2.3.2.90.) recorrendo a uma técnica de diferenças finitas permite escrever:

$$N_{i+1} - N_i = -\frac{900\gamma}{\pi^2 I_0} \left[\frac{Q_b H_b}{N \eta} \right]_{t_i+k\Delta t}^{t_{i+1}-t_i} \quad (2.3.2.91.)$$

Em que $\Delta t = t_{i+1} - t_i$.

Para evitar a necessidade de um processo iterativo é conveniente adoptar a integração explícita (K=0):

$$N_{i+1} - N_i = -\frac{900\gamma}{\pi^2 I_0} \left[\frac{Q_b H_b}{N \eta} \right]_{t_i+k\Delta t} \Delta t \quad (2.3.2.92.)$$

Esta equação, resultante da integração da equação diferencial das massas girantes, é conhecida como a lei de paragem da bomba.

Por último importa conhecer o valor do momento de inércia, I_0 . É usual considerar-se o parâmetro PD^2 referenciado anteriormente, relacionado com I_0 pela equação (2.3.1.10.) sendo o parâmetro PD^2 expresso em $N.m^2$.

2.3.2.7. Aplicação do Método das Características a Conduas Elevatórias

O estudo do choque hidráulico pelo Método das Características começa pela definição da malha de pontos do plano (x, t) a estudar, ou seja, pela selecção dos intervalos Δt e Δx de acordo com os critérios já referidos. De seguida definem-se as condições iniciais do problema, principalmente nos pontos da malha do método. Enquanto que o caudal é constante em toda a conduta, a carga diminui com o sentido do escoamento sendo necessário calcular o valor inicial de H para todos os pontos.

Sendo assim, o cálculo de Q e H em cada secção x da conduta e ao fim do primeiro Δt e seguintes, resulta do uso das equações (2.3.2.65.) e (2.3.2.59.) e do conhecimento das referidas variáveis no instante anterior e em duas secções distanciadas de Δx para cada lado da secção em estudo.

Nas fronteiras do domínio (neste caso as extremidades da conduta), uma das equações características é substituída pela equação que traduz a respectiva condição (como por exemplo reservatórios e bombas) tal como foi discriminado em 2.3.2.4. e 2.3.2.5.

A aplicação deste método obriga à definição do comportamento dos grupos electrobomba ao longo do tempo. É também necessário, em função da Paragem do Grupo Electrobomba, definir a Lei de Paragem do Escoamento. Esta Lei terá em conta a inércia do grupo que representa a energia cinética de que o grupo está animado, ou energia cinética das massas girantes.

Como já foi dito este método usa as propriedades das linhas características definidas no plano físico (x,t) e altera as equações às derivadas parciais para equações diferenciais totais, válidas ao longo das linhas características C^+ e C^- . A resolução é feita usando técnicas explícitas de diferenças finitas de primeira ou segunda ordem, aplicadas a uma malha de cálculo.

A principal desvantagem encontra-se na imposição do passo de cálculo, definido pelo tempo Δt e pelo incremento de espaço Δx .

A precisão da solução encontrada pode ser perturbada caso não sejam cumpridas as condições de convergência, de consistência e de estabilidade das aproximações por diferenças finitas. Estas condições são garantidas pelo critério de Courant-Frisdrich-Lewy ($\Delta x \geq a\Delta t$).

No caso de a celeridade ser constante, as linhas características são rectas, condição que é muitas vezes verificada em escoamentos em pressão em conduas em aço ou em betão. Nos canais de adução, ou seja, em escoamentos com superfície livre, tal não se verifica pois a celeridade vem em função da altura do escoamento. Assim sendo, as linhas características só podem ser tidas como rectas na integração das equações de Saint-Venant, aceitando a aproximação numérica de se fixar o valor da celeridade em cada passo de cálculo, Δt , sendo preciso, depois de se proceder ao cálculo, actualizar os coeficientes angulares das linhas características ao longo do canal. No entanto, em esquemas de cálculo em que o número de Courant, C_r , é menor que a unidade será preciso efectuar interpolações que introduzem efeitos de dispersão e atenuação numéricas, que podem vir a influenciar os resultados obtidos.

$$C_r = a \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad (2.3.2.3.)$$

2.3.2.8. Aplicação do Método das Características a Conduas Gravíticas

Neste tipo de conduas o procedimento de cálculo é parecido ao usado para conduas elevatórias sendo apenas preciso definir as respectivas condições fronteira, traduzi-las analiticamente e introduzi-las no Método das Características de modo análogo ao exposto para as elevatórias.

3

EFEITOS DO CHOQUE HIDRÁULICO EM CONDUTAS

3.1. COTAS PIEZOMÉTRICAS EXTREMAS. SIMBOLOGIA E NOMENCLATURA

São designadas por sobrepressões e subpressões as variações de pressão que ocorrem durante o regime transitório e que correspondem, respectivamente, a valores superiores e inferiores aos ocorridos durante o regime permanente.

Na análise do choque hidráulico em conduas é vantajosa a utilização da grandeza denominada de cota piezométrica instantânea, H , que é definida em cada instante pela relação seguinte:

$$H = \frac{p}{\gamma} + z \quad (3.1.1.)$$

Em que p é a pressão instantânea na secção, γ é o peso volúmico da água (tido como 9810N/m^3) e z é a cota topográfica do eixo da conduta.

No caso do eixo da conduta ser imóvel a variação da cota piezométrica, ΔH , é igual à variação da altura piezométrica instantânea $\Delta p/\gamma$. Deve ser dada atenção, em conduas elevatórias, às variações máximas de H nas secções mais próximas das bombas:

- Subpressão Máxima;

$$\Delta H_{Bm} = H_{Bm} - H_{B0} \quad (3.1.2.)$$

- Sobrepressão Máxima.

$$\Delta H_{BM} = H_{BM} - H_{B0} \quad (3.1.3.)$$

Em que H_{Bm} e H_{BM} representam as cotas piezométricas extremas e H_{B0} representa a cota piezométrica inicial na secção referida anteriormente.

Nos casos habituais, o valor da altura cinética $U^2/2g$ pode ser tomado como nulo o que leva a que haja, em cada instante, coincidência da linha piezométrica com a linha de energia. É admitido que nos reservatórios de extremidade as cotas do plano de água se mantêm constantes.

As envolventes (referidas no capítulo anterior) são então, os lugares geométricos dos pontos das linhas piezométricas instantâneas correspondentes às máximas e mínimas pressões.

3.2. EFEITOS DAS SUBPRESSÕES

3.2.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS.

Os efeitos decorrentes do fenómeno do choque hidráulico em condutas tanto gravíticas como elevatórias não têm grande discrepância, havendo, no entanto, algumas diferenças que convém realçar. Exemplo disso é o facto de que em condutas forçadas de aproveitamentos hidroeléctricos o regime variável é, na maioria das vezes, motivado pelo funcionamento do distribuidor da turbina (ou, no caso de turbinas do tipo Pelton, pelo injector). No entanto, este pode estar subordinado a um órgão de regulação de frequência e de potência. O choque hidráulico vai perturbar este tipo de regulação, o que exige um estudo do conjunto de modo a garantir a estabilidade do sistema. Nas condutas gravíticas não há, em geral, a influência de máquinas hidráulicas mas sim de válvulas cuja lei de fecho e de abertura deve ser cuidadosamente estudada de modo a não suscitar grandes variações de pressão.

Durante o choque hidráulico, as pressões podem atingir, em certos pontos da conduta, valores próximos do da tensão de vapor do líquido, o que levará à alteração das características do comportamento do escoamento. Isto acontece devido ao aparecimento duma fase gasosa não dissolvida que é consequência quer da vaporização do líquido quer da libertação de gases nele dissolvidos. Esta fase gasosa poderá aparecer durante um período de tempo até que fenómenos dissipativos atenuem as variações de pressão. É preciso ter em conta que o desaparecimento brusco desta fase gasosa leva geralmente à ocorrência de sobrepressões elevadas que podem causar sérios danos à conduta, onde ocorram. Estas sobrepressões têm sido uma das razões de se evitar a ocorrência, em projecto, de valores de pressão próximos dos da tensão de vapor do líquido durante o regime variável.

Por outro lado, quando o caudal na conduta diminui, as pressões também reduzem podendo chegar, em certos pontos, a valores absolutos muito baixos o que poderá causar a rotura da veia líquida.

A ocorrência de subpressões pode também provocar o colapso da parede da conduta por compressão exterior ou a rápida deterioração do revestimento interno da conduta.

3.2.2. CAVITAÇÃO. ROTURA DA VEIA LÍQUIDA.

A cavitação é um fenómeno cuja modelação matemática é delicada devido ao facto de poder mostrar diferentes aspectos conforme as características do circuito hidráulico, nomeadamente a forma do traçado do perfil desse circuito e a lei de variação do caudal em função do fecho de uma válvula ou paragem de uma bomba.

Contudo, é possível identificar, de uma forma simplificada, dois tipos fundamentais de cavitação:

No primeiro tipo, a fase gasosa concentra-se em certos troços da conduta, preenchendo a quase totalidade da respectiva secção transversal e provoca uma visível descontinuidade na coluna líquida. Este tipo de cavitação tem vindo a ser designada por rotura da veia líquida ou separação da coluna e tende a verificar-se nos pontos altos da conduta ou em secções imediatamente a jusante do órgão obturador.

No segundo tipo, designado por Kranenburg, de escoamento bolhoso ou cavitante, a fase gasosa encontra-se espalhada por um comprimento considerável da conduta sob a forma de um elevado número de bolhas de diferentes dimensões. Este tipo tende a ocorrer em condutas horizontais ou em troços em que o declive é inferior ao declive da linha piezométrica em regime permanente.

O tipo de cavitação que é normalmente analisado é o da rotura da veia líquida, apenas considerando algumas hipóteses simplificadoras e recorrendo a métodos analíticos ou gráficos. Estas hipóteses admitem que as cavidades são preenchidas por vapor que se mantém sob uma pressão igual à da

tensão de vapor e que se liquefaz instantaneamente à medida que as interfaces líquido-vapor limítrofes avançam e o valor da pressão aumenta. Enquanto a cavidade existir ela é considerada como uma nova condição fronteira que se forma numa dada secção e cuja duração é dependente do cálculo correcto do volume da fase gasosa, tanto na fase de expansão como de contracção do mesmo. As interfaces são tidas como planas e normais ao eixo da conduta e admite-se também, que a celeridade das ondas elásticas no líquido não é influenciada pela ocorrência deste fenómeno.

Para efeito do estudo do choque hidráulico é oportuno traduzir as condições de dimensionamento em termos de cotas piezométricas como retirado de [6]:

- Condição de Cavitação;

$$HCV = \frac{p_s}{\gamma} + z \quad (3.2.1.)$$

- Condição de Rotura da Veia Líquida;

$$HRV = \frac{p_v}{\gamma} + z \quad (3.2.2.)$$

- Condições de Resistência Mecânica.

$$HRM = \frac{p_M}{\gamma} + z \quad (3.2.3.)$$

$$HRE = \frac{p_E}{\gamma} + z \quad (3.2.4.)$$

Em que p_s é a pressão de saturação dos gases dissolvidos, p_v é a pressão de vaporização da água, p_M é a pressão máxima admissível e p_E é a pressão correspondente ao esmagamento da conduta por acção da pressão externa.

Depois de determinadas as envolventes das cotas piezométricas extremas ao longo da conduta, é preciso verificar, em cada secção da mesma, se o valor da cota piezométrica máxima não é superior a HRM e se o valor da cota piezométrica mínima não é inferior a HRE. As condições de cavitação e rotura da veia líquida deverão ser controladas pelos valores de HCV e de HRV.

Apresenta-se de seguida uma figura elucidativa dos tipos de cavitação existentes.

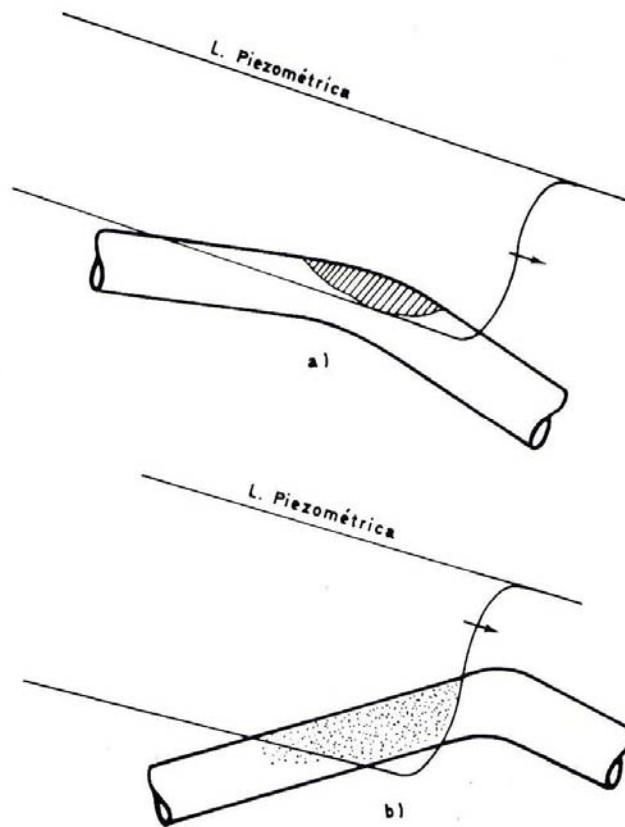


Fig.3.1. – Tipos de Cavitação Existentes: a) Rotura da Veia Líquida; b) Escoamento Bolhoso [2]

Na figura anteriormente apresentada, a linha piezométrica de baixo é a linha em regime transitório e a de cima é a linha em regime permanente.

A comparação feita entre resultados obtidos das análises da rotura da veia líquida feitas recorrendo às várias teorias existentes permite concluir que as hipóteses geralmente feitas para o estudo do fenómeno podem levar a sobrepensões mais elevadas, a volumes máximos de cavidade diferentes dos reais e não reproduzir os fenómenos de mitigação que por vezes se verificam depois do fecho das cavidades. Há registos fotográficos que mostram que depois de ocorrer o fecho da cavidade permanecem, por algum tempo, bolhas gasosas disseminadas no líquido.

Com o fim de aproximar os resultados dos cálculos aos registados experimentalmente e de aproveitar as potencialidades do cálculo automático, diferentes autores procuraram melhorar a modelação matemática da rotura da veia líquida. As contribuições mais relevantes podem ser divididas em dois grupos:

- Contribuições que consideram a melhoria da caracterização geométrica da cavidade;
- Contribuições que consideram a introdução do efeito da libertação de gases dissolvidos no líquido.

Autores como Baltzer (1967), como retirado de [2], apoiados em observações experimentais, consideram que o escoamento deve ser estudado, no troço da condução em que se dá a rotura da veia líquida, mediante a aplicação das equações do regime variável com superfície livre, ou seja as equações de Saint-Venant. Sendo assim, a condução teria de ser dividida, em cada instante de cálculo, em duas zonas distintas:

- Uma em que o escoamento preenche totalmente a secção da conduta e onde são aplicáveis as equações indefinidas do choque hidráulico (2.2.1.) e (2.2.2.);
- Uma zona em que existe uma cavidade localizada no topo da conduta, preenchida com vapor, onde são aplicáveis as equações de Saint-Venant.

Depois da elaboração deste método houve autores que usaram métodos análogos mas que recorrem apenas a um único sistema de equações, do género das do tipo (2.2.1.) e (2.2.2.) mas que diferem de uma zona para outra por via da celeridade ser admitida como continuamente variável entre zero e o correspondente em pressão (ver figura 3.2.).

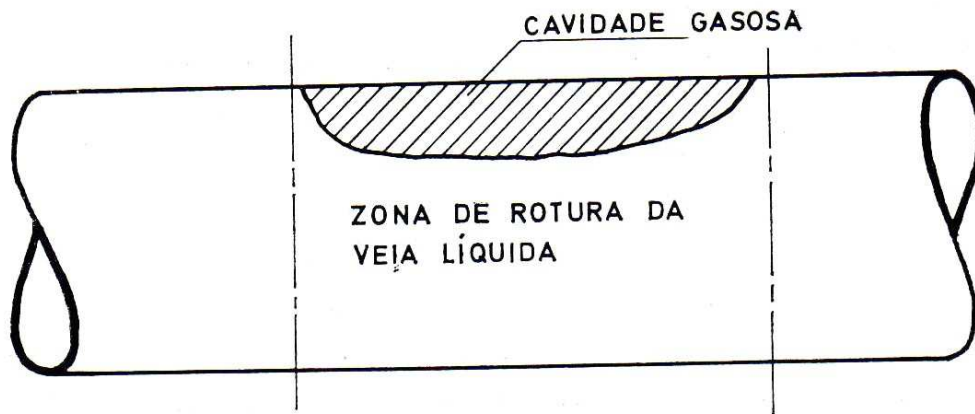


Fig.3.2. – Modelação da Rotura da Veia Líquida com Cavidade no Topo da Coluna [2]

As conclusões obtidas da aplicação destes modelos matemáticos são por várias vezes contraditórias.

Maior influência e importância tem a libertação de gases dissolvidos no líquido. A libertação destes gases é causada pela diferença entre a concentração real e a concentração de equilíbrio na interface gás-líquido. Sendo assim, a massa contida na cavidade vai variar por efeito da libertação e a pressão a que vai estar sujeita será resultante do somatório da tensão de vapor com a pressão parcial do gás libertado. Alguns autores tentaram melhorar o modelo descrito previamente recorrendo, para isso, à introdução do efeito da libertação de gases. Os resultados experimentais conseguidos levam a que haja a possibilidade de confirmar que a introdução deste efeito nos modelos matemáticos da rotura da veia líquida possibilita uma melhor reprodução da atenuação dos valores da sobrepressão e da evolução no tempo do fenómeno.

Outras contribuições feitas para análise da rotura da veia líquida que têm em consideração as perdas de carga também são de grande importância e a influência da tensão superficial prevê, neste modelo, o aumento da pressão na cavidade e a formação de outras cavidades secundárias noutros trechos de uma conduta horizontal. Há também quem estude os efeitos térmicos oriundos da condensação do vapor que poderão reduzir a velocidade da interface líquido-gás aquando o fecho da cavidade. É de salientar que neste processo a escala de tempo do processo de condensação só é comparável com a escala de tempo do choque hidráulico nos casos em que as cavidades de vapor são de grande dimensão como as de rotura da veia líquida.

A modelação matemática da cavitação do tipo escoamento bolhoso apresenta maiores dificuldades devido ao facto do escoamento de tornar bifásico durante os períodos de baixa pressão e em troços relativamente longos da conduta. A configuração do escoamento torna-se função de vários factores, sendo possível à fase gasosa dispersar-se completamente na fase líquida ou ocorrer a situação inversa, incluindo configurações intermédias. No caso do choque hidráulico, a configuração de maior interesse é a que corresponde a uma disseminação de grande quantidade de bolhas no meio do escoamento,

podendo o conjunto, ou cada fase, ser visto como unidimensional. Os modelos matemáticos adequados a este tipo de escoamento são divididos em três grupos:

- Modelo homogéneo;
- Modelo separado;
- Modelo “drift-flux”.

No modelo homogéneo, os componentes líquido e gasoso são tidos como um único fluido fictício com propriedades idênticas às propriedades médias do conjunto real. No entanto, este modelo não considera a interação entre as duas fases e, particularmente, a diferença de velocidade entre o líquido e as bolhas.

No modelo separado, as duas fases são analisadas em separado mas considerando as interações existentes. Este modelo requer que se tenham em conta as equações de energia, da quantidade de movimento e de continuidade para cada fase e também das equações que representam as trocas de calor e de massa.

No modelo “drift-flux” é feita a média no tempo e no espaço das equações unidimensionais da continuidade da fase gasosa, da continuidade e da quantidade de movimento da mistura. Este modelo pode ser considerado como uma alteração do modelo homogéneo em que se realça o movimento relativo entre as duas fases. As respectivas equações indefinidas são feitas com base na difusão da velocidade relativamente ao centro de gravidade da mistura.

O regime variável em pressão, nas condições de escoamento bolhoso, é caracterizado, principalmente, pela ocorrência de fenómenos dispersivos e por uma minimização dos valores das sobrepressões. Este último aspecto tem interesse no ponto de vista de projectos de circuitos hidráulicos, particularmente os de abastecimento de água e os de esgotos. A minimização tem sido tentada, matematicamente, mediante a adopção de hipóteses e esquemas vários, por vezes de um modo prático.

A cavitação que ocorre devido ao choque hidráulico, quando adquire características de escoamento bolhoso, é ainda de difícil análise devido a exigir muitos parâmetros cujos valores não são fáceis de calcular para cada caso. A grande parte dos estudos que tem em vista o dimensionamento de dispositivos de protecção em condutas industriais, tem sido realizada adoptando um modelo de cavidades discretas do tipo da rotura da veia líquida.

3.3. EFEITOS DAS SOBREPRESSÕES

3.3.1. SOBREPRESSÕES APÓS ROTURA DA VEIA LÍQUIDA

Como foi dito anteriormente, as sobrepressões podem ser consequência da evaporação da fase gasosa e consequentemente do colapso da cavidade. O valor da sobrepressão resultante é dado por:

$$\frac{a}{2g}(U_1 + U_2) \quad (3.3.1.)$$

Em que U_1 e U_2 são os módulos das velocidades das duas interfaces que limitam a cavidade de vapor. Em teoria, as características elásticas da conduta poderão originar sobrepressões maiores nos instantes após o fecho da cavidade.

O método gráfico de Schneyder-Bergeron, retirado de [2], proporciona uma análise simplificada do fenómeno, especialmente quando a conduta é horizontal e se admite que só existe uma cavidade. Este método possibilita a inserção simplificada das perdas de carga e a previsão do momento em que a cavidade fecha e as consequentes sobrepressões.

3.3.2. SOBREPRESSÕES POR EXPULSÃO DO AR

Numa conduta sob pressão que contenha uma bolsa de ar, a evacuação deste para a atmosfera, através de um orifício, é feita com grande velocidade, ainda que causada por pressão pouco maior que a pressão atmosférica. De facto, visto que a relação de pesos volúmicos da água e do ar é de cerca de 800, a relação entre as velocidades dos escoamentos do ar e da água devidos a igual diferença de pressão é dada por:

$$\frac{U_{ar}}{U} = \frac{\sqrt{\frac{\Delta p}{\gamma_{ar}}}}{\sqrt{\frac{\Delta p}{\gamma}}} = \sqrt{\frac{\gamma_{ar}}{\gamma}} \approx 28 \quad (3.3.2.)$$

Acontece que o ar, ao sair pelo orifício, vai sendo substituído por água, o que leva a que os escoamentos do ar e da água dentro da conduta sejam feitos a igual velocidade quando ambos ocupam a totalidade da secção (ver figura 3.3.)

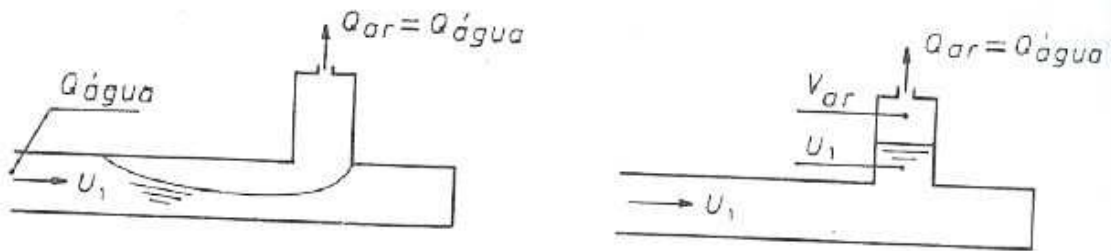


Fig.3.3. – Saída de Ar por um Orifício de uma Conduto Sob Pressão [8]

Na figura anterior $Q_{\text{água}}$ representa o caudal de água escoado, U_1 é a velocidade da água, Q_{ar} é o caudal do ar presente na conduta e V_{ar} corresponde a U_{ar} que representa a velocidade do ar presente na conduta.

Ao findar a expulsão do ar, a coluna de água atinge o orifício e existe uma grande desaceleração do movimento, pois a passagem de igual caudal de água através do orifício obrigaria a uma pressão interior 800 vezes maior. Esta desaceleração origina uma sobrepressão calculada por:

$$\frac{\Delta p}{\gamma} = \frac{c}{g} (U_1 - U'_1) \quad (3.3.3.)$$

Em que U'_1 representa a velocidade da água na conduta no instante em que a água começa a passar pelo orifício.

Se o orifício se tratar de um orifício numa ventosa, como a água ao atingi-lo origina a obturação total, a sobrepressão que daí advém é expressa por:

$$\frac{\Delta p}{\gamma} = \frac{c}{g} U_1 \quad (3.3.4.)$$

Com U_1 igual a U_{ar} .

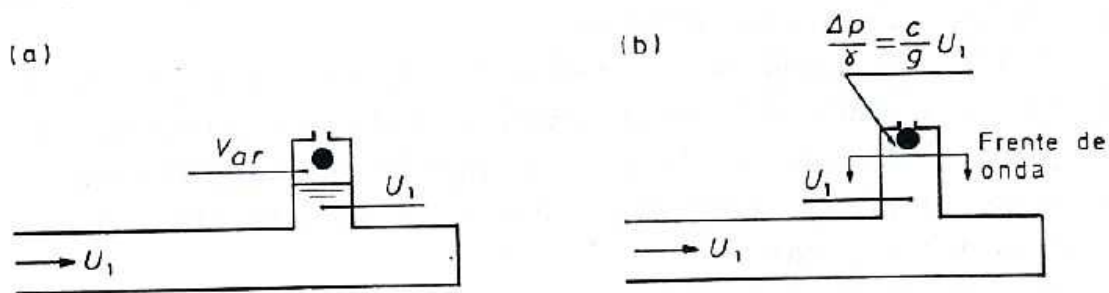


Fig.3.4. – Ventosa. A) Saída de Ar. b) Sobrepressão Após Obtenção. [8]

Nesta figura U_1 é a velocidade da água e V_{ar} corresponde a U_{ar} que representa a velocidade da ar.

Para balizar a sobrepressão atingida, a secção do orifício de saída da ventosa deverá ser muito inferior à da conduta.

Para obstar ao aparecimento de pressões elevadas, as ventosas deverão ser, nestes casos, do tipo especial.

3.3.2. SOBREPRESSÕES DEVIDAS ÀS VARIAÇÕES DE PRESSÃO CAUSADAS PELO CHOQUE HIDRÁULICO

As sobrepressões que advêm do fenómeno do choque hidráulico levam a que ocorra um aumento da pressão nas paredes da conduta e o conseqüente colapso da mesma.

3.4. FENÓMENOS DE RESSONÂNCIA

Os órgãos em funcionamento são fontes de perturbação adicionadas ao escoamento médio que, para além do ruído e da vibração no envólucro da conduta, podem causar fenómenos de ressonância em particular se a frequência da fonte perturbadora coincidir com alguma frequência natural do circuito.

Os fenómenos de ressonância foram definidos, por Fanelli em 1975, como sendo “todo o conjunto de fenómenos estacionários ou quase-estacionários no espaço e com carácter periódico no tempo, comportando em particular oscilações periódicas de pressões e de velocidades, num circuito hidráulico contendo um líquido; oscilações que podem ser espontâneas (instabilidade), ou produzidas por uma excitação exterior (ressonância induzida) sobre uma das frequências próprias do circuito.” [5]

É de grande interesse para um projectista a análise das condições de ressonância devido ao risco que existe no aparecimento de sobrepressões elevadas em secções da conduta onde, o simples estudo do choque hidráulico para manobras de abertura ou fecho não faria prever que estas ocorressem. Por outro lado, as amplitudes das oscilações de pressão podem ser de tal modo elevadas que levem à ocorrência da rotura da veia líquida e com as conseqüências que daí advêm. Os dispositivos mecânicos poderão ter um comportamento defeituoso e as condições de exploração do sistema hidráulico tornarem-se insatisfatórios.

Os efeitos da ressonância podem sentir-se nas seguintes formas:

- Vibrações da conduta como viga apoiada;
- Deformações da secção transversal;
- Fenómenos de interacção entre as deformações do envólucro e as perturbações no fluido (ressonância paramétrica);
- Ondas de pressão do tipo das do choque hidráulico.

É de interesse geral o facto deste último tipo de ressonância ter sido detectado por Allievi (1925), como retirado de [2], por via teórica, num caso dum condua a ligar um reservatório a uma válvula. Se a condua for uniforme o período fundamental das oscilações de pressão é único e coincide com o valor $4L/a$. No caso contrário, se a condua tiver i trechos de comprimento L_i e celeridade a_i , existem dois períodos fundamentais. Um deles é igual à soma dos períodos fundamentais de cada trecho considerado isoladamente, $\sum 4L_i/a_i$, e o outro resultante das reflexões parciais das ondas de pressão nas secções onde as características da condua mudam (período aparente).

Apesar dos métodos clássicos de análise, incluindo os métodos gráficos, não permitirem a correcta análise expedita dos circuitos hidráulicos complexos o que torna a aplicação a casos correntes difícil e demorada, as causas de alguns dos acidentes devidos a fenómenos de ressonância foram explicadas por Jaeger (1963), como retirado de [2].

A análise dos efeitos de ressonância tem um grande impulso depois do conceito de impedância ter sido adoptado à hidráulica e do advento do cálculo automático.

O método da impedância é baseado na integração do sistema de equações (2.2.1.) e (2.2.2.), decompondo as variáveis Q e H num termo médio constante e num termo oscilatório. A solução correspondente a um movimento estacionário é aquela em que ambos os termos oscilatórios são do tipo sinusoidal com frequência angular w . Considerando as condições fronteira é possível calcular os valores das variações de caudal e da cota piezométrica numa secção da condua em função dos valores das respectivas variações noutra secção e das características da condua, para cada valor da frequência angular.

A razão entre os valores das variações da cota piezométrica, H' , e do caudal, Q' , numa determinada secção da condua é denominado de impedância hidráulica, \bar{Z} :

$$\bar{Z} = \frac{H'(x, w)}{Q'(x, w)} \quad (3.4.1.)$$

Aplicando este conceito a um sistema hidráulico, a impedância numa secção pode ser expressa em função da impedância noutra secção. É então possível mediante a aplicação dum conjunto de regras simples, o cálculo do valor de \bar{Z} em qualquer secção dum circuito hidráulico sujeito a uma perturbação sinusoidal.

A determinação das amplitudes das variações de pressão numa situação de ocorrência de ressonância obriga ao correcto conhecimento dos coeficientes de amortecimento do escoamento e da condua. No entanto estes são de difícil estimativa, não só devido à possível influência das perdas de carga como também da importância que o comportamento do envólucro da condua tem e a radiação para o meio envolvente. Contudo houve autores que apresentaram um método de cálculo das amplitudes de pressão em ressonância pela determinação do amortecimento a partir da dissipação de energia em regime turbulento. Assim sendo, a grande parte dos estudos feitos tem como únicos propósitos a detecção das frequências próprias do sistema hidráulico e tentar evitar que as frequências excitadoras sejam próximas desses valores.

Recorrendo ao Método das Impedâncias estes objectivos são fáceis de atingir sendo necessário para isso apenas a determinação da função de impedância da secção de excitação e fazer com que a frequência angular varie. Quando esta coincidir com algum valor de frequência próprio do sistema hidráulico, o módulo da impedância aumenta consideravelmente.

Por último é de referir que alguns autores, como por exemplo Thorley (1971), como retirado de [2], chamam a atenção para a importância do valor da celeridade neste tipo de resoluções.

4

DISPOSITIVOS DE PROTECÇÃO CONTRA O CHOQUE HIDRÁULICO

4.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

Depois de feito o estudo preliminar do fenómeno do choque hidráulico e consoante as condições de dimensionamento pretendidas, pode ser preciso recorrer à instalação de dispositivos de protecção contra os efeitos mencionados no capítulo anterior.

Estes dispositivos têm como principal objectivo a minimização das variações de pressão em certos troços da conduita. Estes dispositivos podem ser distinguidos através da maneira como funcionam, ou seja, pelo objectivo específico que têm. Estes objectivos dividem os dispositivos em três grupos distintos:

- Diminuição da subpressão máxima;
- Diminuição da sobrepressão máxima;
- Diminuição das subpressão e sobrepressão máximas.

Os dispositivos de protecção podem ser ainda distinguidos de acordo com o modo como actuam.

- Os que actuam a “montante do choque hidráulico” que tentam travar o fenómeno, ou seja, diminuir-lhe a acção, o que leva à alteração do regime transitório (exemplo: volante de inércia);
- Os que actuam a “jusante do choque hidráulico” que não alteram a manifestação do mesmo. Apenas protegem a conduita pois atenuam as ondas de choque na conduita. São exemplos disto os reservatórios de ar comprimido (RAC) ou as chaminés de equilíbrio, sendo que estas normalmente não são usadas em sistemas elevatórios.

A atenuação das variações de pressão pode dizer respeito às secções das válvulas ou grupos electrobomba ou então a secções intermédias das condutas.

Nas condutas elevatórias, na primeira secção, ou seja, a mais afastada do reservatório de jusante, os valores de ΔH serão, provavelmente, os mais elevados.

Nas secções intermédias, em especial nos pontos altos, podem ocorrer, como dito previamente, pressões muito baixas o que acarreta o risco de ocorrência de rotura da veia líquida.

O método mais adequado de protecção contra os efeitos do choque hidráulico depende das características hidráulicas e físicas do sistema hidráulico.

O parâmetro com maior influência na escolha do método a utilizar é o designado parâmetro da conduta, $\bar{\rho}$.

$$\bar{\rho} = \frac{a \times U_0}{g \times H} \quad (4.1.1.)$$

Em que a é a celeridade, U_0 a velocidade do escoamento na conduta, g a aceleração da gravidade e H a altura piezométrica.

Existe a possibilidade de combinar mais do que um dispositivo no mesmo sistema o que não deve ser ignorado visto poder levar a soluções mais económicas do que usando um único método de protecção.

Deverão ser tidas em conta, na escolha do dispositivo adequado, as possibilidades locais de manutenção do equipamento a usar.

No estudo e dimensionamento final dos dispositivos de protecção deverá ser incentivado o recurso ao cálculo automático, sendo que também devem ser realizados ensaios em protótipo. De seguida devem ser comparados os resultados obtidos pelas duas vias.

Apresenta-se em anexo um quadro resumo das características gerais dos dispositivos usuais de protecção e um quadro de rápida indicação do dispositivo a usar (anexo 1).

4.2. RESERVATÓRIO DE AR COMPRIMIDO, RAC.

Os Reservatórios de Ar Comprimido, RAC, são dispositivos que têm como objectivo a redução quer das subpressões quer das sobrepessões máximas. São reservatórios fechados que contêm ar e água. É normal, a presença de um estrangulamento, denominado de tubeira, na conduta que faz a ligação entre a conduta principal e o dispositivo. Este estrangulamento tem por fim produzir uma perda de carga enquanto se dão as permutas de água entre o RAC e a conduta.

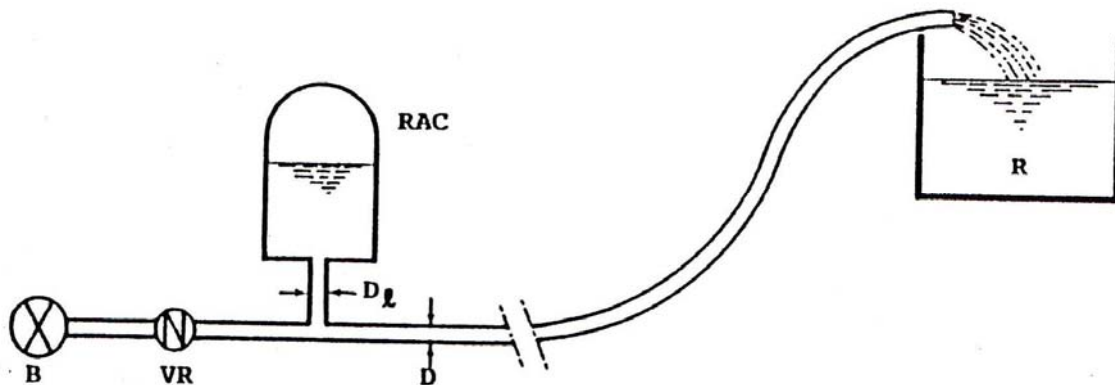


Fig.4.1. – Esquema da Instalação de um RAC numa Conduta Elevatória [7]

Na figura 4.1. apresentada anteriormente, B representa uma bomba, VR é uma válvula de retenção, D_1 é o diâmetro da conduta que faz ligação entre o RAC e a conduta principal, D é o diâmetro da conduta principal e R representa um reservatório.

Aquando em regime permanente, a água presente no interior do RAC encontra-se em equilíbrio sob a acção da pressão do ar e da pressão da água na conduta. Quando ocorre o regime transitório este equilíbrio deixa de existir, criando-se um escoamento do RAC para a conduta e vice-versa. Quando a pressão baixa a jusante do órgão, o RAC passa a alimentar a conduta o que leva a que o nível de água no seu interior baixe e consequentemente a que o volume de ar aumente diminuindo a pressão. Ao fim de alguns instantes, o equilíbrio é restaurado levando assim a que a pressão na conduta seja superior à do RAC, o que motiva o regresso da água. Esta nova fase do fenómeno acaba quando se constitui novo equilíbrio de pressões, após o que se observa de novo o escoamento do RAC para a conduta. Estas trocas vão sendo minimizadas até que se estabeleça de novo um regime permanente.

A capacidade do RAC de diminuir a subpressão máxima vem do facto de possibilitar uma variação mais lenta tanto do caudal como da energia. Na verdade, a competência de alimentação da conduta, resultante da água armazenada, impede uma queda brusca do caudal na conduta, enquanto que a energia potencial da pressão acumulada é transferida para o escoamento, minimizando a redução de energia provida.

A capacidade de diminuir a sobrepressão máxima vem, não só da capacidade de armazenamento de energia e de água requerida durante o retorno da água ao RAC, mas também da dissipação de energia obtida na tubeira, além da que se observa na conduta.

A perda de carga na tubeira é prejudicial à diminuição da pressão, já que minimiza a transferência de energia do RAC para a conduta. Isto leva a que a tubeira tenha uma configuração que pretende criar uma perda de carga para a entrada de água no RAC maior à da saída para o mesmo valor de caudal.

A expressão que traduz a perda de carga na tubeira é deduzida da fórmula da perda de carga localizada num estreitamento brusco.

$$\Delta H_l = \left(1 - \frac{S_r}{S_c}\right)^2 + \frac{1}{9} \frac{U_r^2}{2g} \quad (4.2.1.)$$

Em que S_r representa a secção do tubo de ligação do RAC à conduta e S_c a secção contraída.

A secção contraída está relacionada com o diâmetro da tubeira, d , e com o coeficiente de contracção C_c pela expressão seguinte:

$$S_c = \frac{\pi(C_c \times d)^2}{4} \quad (4.2.2.)$$

A secção do tubo de ligação do RAC à conduta depende do diâmetro da mesma, D , e relaciona-se da seguinte forma:

$$S_r = \frac{\pi \times D^2}{4} \quad (4.2.3.)$$

Em (4.2.1.), ao substituir S_c por (4.2.2.) e S_r por (4.2.3.) e a velocidade U_r pelo quociente entre o caudal e a secção do tubo de ligação obtém-se a equação final que dá a perda de carga na tubeira:

$$\Delta H_{tb} = \frac{8}{g \times \pi^2 \times D_l^4} \left[1 - \left(\frac{D_l}{C_c \times d}\right)^2\right]^2 + \frac{1}{9} Q_r^2 \quad (4.2.4.)$$

A diferença entre as perdas de carga à entrada e à saída encontra-se no valor do coeficiente de contracção. Este coeficiente toma os valores de 0,9 ou 1 para a secção de saída e valores próximos de 0,7 para a secção de entrada.

Apresentam-se de seguida figuras representativas dos escoamentos que ocorrem na tubeira e também das três fases de funcionamento deste dispositivo.

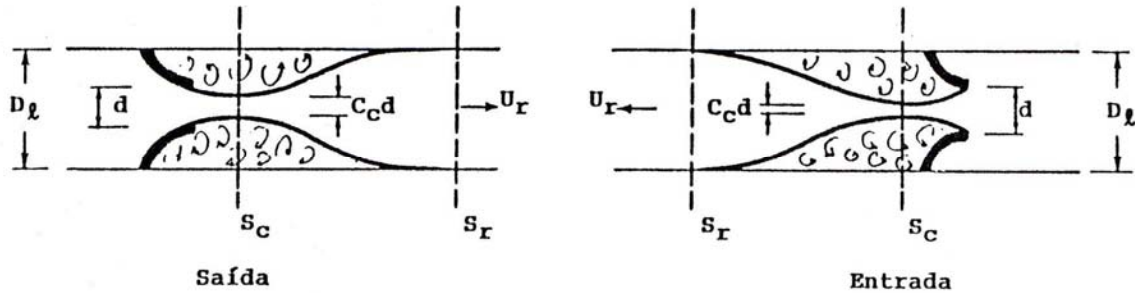


Fig.4.2. – Escoamentos Possíveis na Tubeira [7]

Na figura 4.2. D_1 é, como já foi dito, o diâmetro da conduta que faz a ligação entre o RAC e a conduta principal, d é o diâmetro da tubeira, S_c é a área da secção contraída na tubeira, S_r é a área da secção da conduta de ligação entre o RAC e a conduta principal, C_c é o coeficiente de contracção e U_r é a velocidade média numa secção da conduta de ligação entre o RAC e a conduta principal.

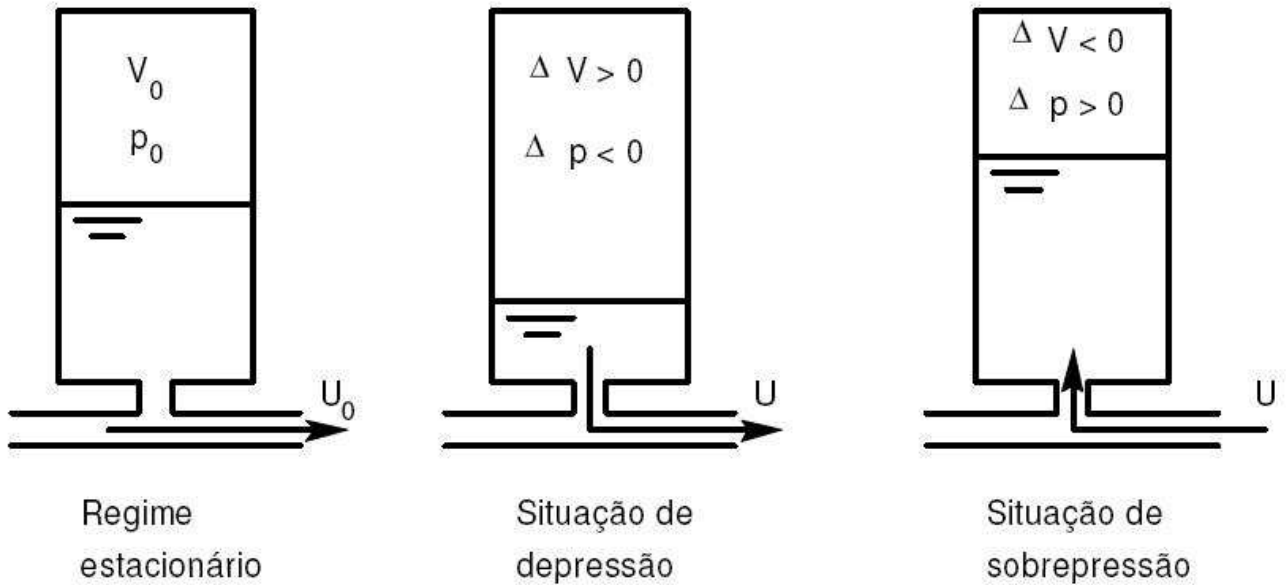


Fig.4.3. – Fases de Funcionamento do RAC [10]

Este dispositivo protege a conduta ao longo do desenvolvimento do regime variável mas tem, no entanto, as suas desvantagens:

- Necessita de manutenção como por exemplo dos compressores e do sistema de controlo de compressão;
- Tem um elevado investimento inicial no custo do reservatório e dos acessórios;
- Exige permanente observação o que aumenta os encargos com a manutenção;
- Ocupa espaço importante;

- É aplicável em condutas com menos de 10000m de comprimento.

4.3. CHAMINÉ DE EQUILÍBRIO

Este dispositivo é constituído como um reservatório de ar 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.

Este dispositivo tem grande eficiência na protecção, sendo muito seguro mas obrigando à sua manutenção e tem como objectivo minimizar tanto a sobrepressão como a subpressão máximas.

Quando instalada em aproveitamentos hidroeléctricos com circuitos hidráulicos de comprimento considerável, a chaminé tem como tarefa proteger contra os efeitos do choque hidráulico e aperfeiçoar a estabilidade de regulação dos grupos. De facto, o retardamento na resposta hidráulica consequente da propagação das ondas elásticas e da inércia do escoamento pode contribuir para um funcionamento deficiente da instalação.

A chaminé de equilíbrio tem várias vantagens enunciando-se de seguida as principais:

- Permite maior rapidez de manobras dos órgãos de controlo o que possibilita uma rápida retoma da operacionalidade do sistema;
- Possibilita uma rápida entrada em serviço dos grupos turbogeradores o que reduz o perigo da formação de pressões negativas e o consequente risco de cavitação no circuito hidráulico em que é instalada.

Este dispositivo tem também algumas desvantagens:

- A sua utilização é limitada quando é aplicado a elevados desníveis geométricos, o que leva a um custo de construção elevado e a um grande impacto estético o que leva a questionar o recurso a esta hipótese;
- Existe contacto entre a água e a atmosfera o que pode levar à existência de gelo e à diminuição da sua qualidade devido à exposição ao ar;
- Existe a possibilidade de ocorrerem eventuais perdas de água.

O recurso a chaminés de equilíbrio é consequência da elaboração de um estudo comparativo no que diz respeito à relação custo/benefícios, utilização de outras alternativas como sejam o fecho mais lento ou de acordo com uma lei mais adequada, dos órgãos de controlo de caudal ou então a instalação de outros tipos de protecção.

Existem diversos tipos de chaminés de equilíbrio que ao serem combinados com as várias características hidráulicas e com os condicionamentos de operação e as características específicas do local onde será aplicado o dispositivo (como por exemplo características geológicas, topográficas e ambientais), levam à escolha da melhor opção.

Apresentam-se agora os tipos de chaminés de equilíbrio mais conhecidos:

- Chaminé simples com ou sem estrangulamento;
- Chaminé do tipo diferencial;
- Chaminé com descarregador;
- Chaminé com câmaras de expansão.

No que toca ao comportamento hidráulico do sistema, as ondas elásticas de pressão criadas na turbina propagam-se para a chaminé sofrendo sucessivas reflexões e transmissões ao longo do circuito

hidráulico. A amplitude da onda de pressão difundida não deverá ser superior à carga provocada pela máxima amplitude na chaminé.

Apresenta-se de seguida um esquema dos vários tipos de chaminés.

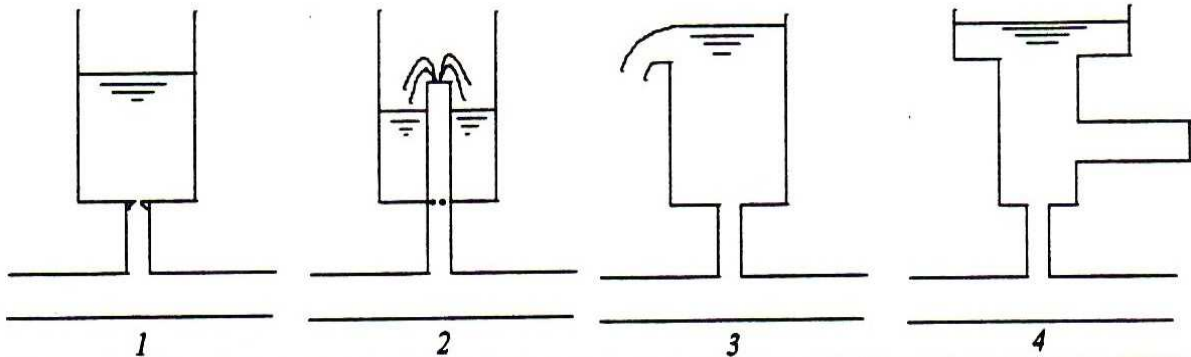


Fig.4.4. – Principais Tipos de Chaminés de Equilíbrio. 1) Chaminé Simples, 2) Chaminé do Tipo Diferencial, 3) Chaminé com Descarregador e 4) Chaminé com Câmaras de Expansão. [9]

É de ter em conta que a chaminé com descarregador tem a sua aplicação muito condicionada pelas condições locais de forma a que seja possível escoar o caudal em excesso e que a chaminé com câmaras de expansão é geralmente utilizada em circuitos hidráulicos em galeria escavada e a sua câmara de expansão inferior terá de ter um volume necessário para a fase de arranque dos grupos e a superior para a paragem dos mesmos.

Quando se tem em conta o dimensionamento destes dispositivos de protecção é de ter em conta os objectivos mais importantes que são a minimização da máxima amplitude das variações do plano de água e tornar mais rápida e eficaz a resposta do sistema de protecção.

Com vista a dissipação forçada da energia do escoamento variável e um maior amortecimento das oscilações do plano da água da chaminé foi desenvolvida uma variante da chaminé simples criando um estrangulamento na base (ver figura).

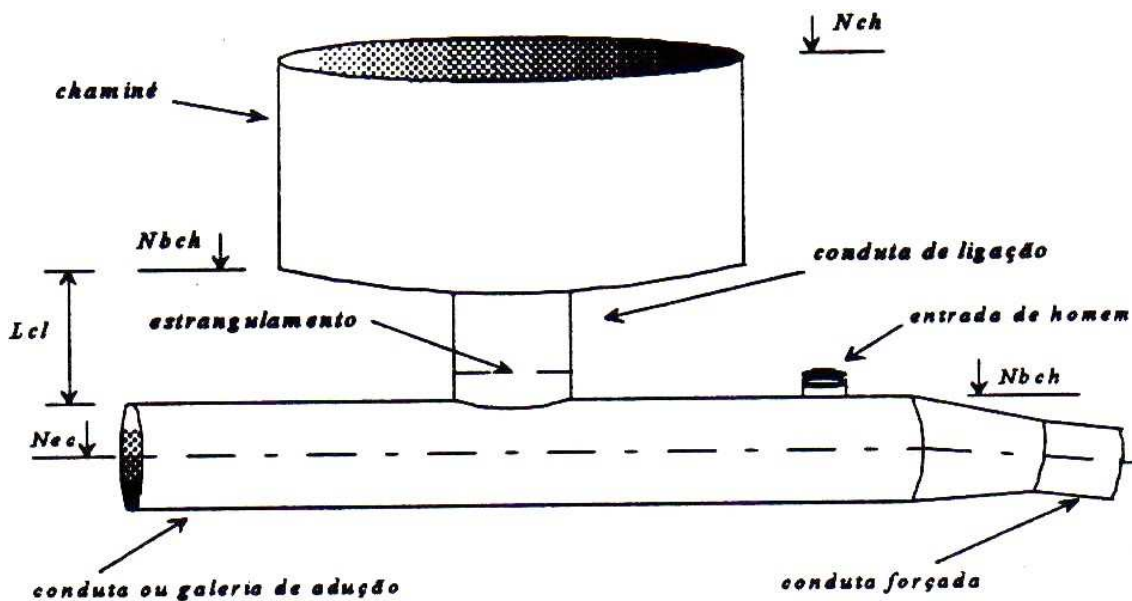


Fig.4.5. – Esquema de uma Chaminé de Equilíbrio com Estrangulamento na Base [9]

O tamanho do orifício obriga à perda de carga na secção do estrangulamento, ou seja, um orifício de menores dimensões leva a uma maior perda de carga no estrangulamento o que possibilita diminuir o tamanho da chaminé. Por outro lado, o aumento do estrangulamento poderá propiciar maiores flutuações de pressão na conduita a proteger. Deste modo, tem de se relacionar a dimensão da chaminé e do estrangulamento com o comprimento da conduita. Existe um critério de dimensionamento que recomenda que a perda de carga máxima no estrangulamento seja da mesma ordem de grandeza da máxima sobre-elevação da superfície livre no interior da chaminé.

Este dispositivo é um órgão de protecção clássico em circuitos longos. As variações em massa nas chaminés são ainda acompanhadas de fenómenos de difusão de ondas elásticas. Nestes conformes, a utilização do método das características à análise das variações nas chaminés pode ser conveniente quando se pretende analisar o comportamento do dispositivo. Há autores que investigam qual a importância da transmissão de ondas de vários tipos de chaminés depois do fecho total de uma válvula localizada a jusante e confere a dependência do factor de transmissão em função das características usadas para a chaminé e do respectivo tempo de fecho. Os autores que realizam este estudo fornecem ábacos para a determinação do coeficiente de transmissão das ondas a partir da secção onde se encontra instalada a chaminé.

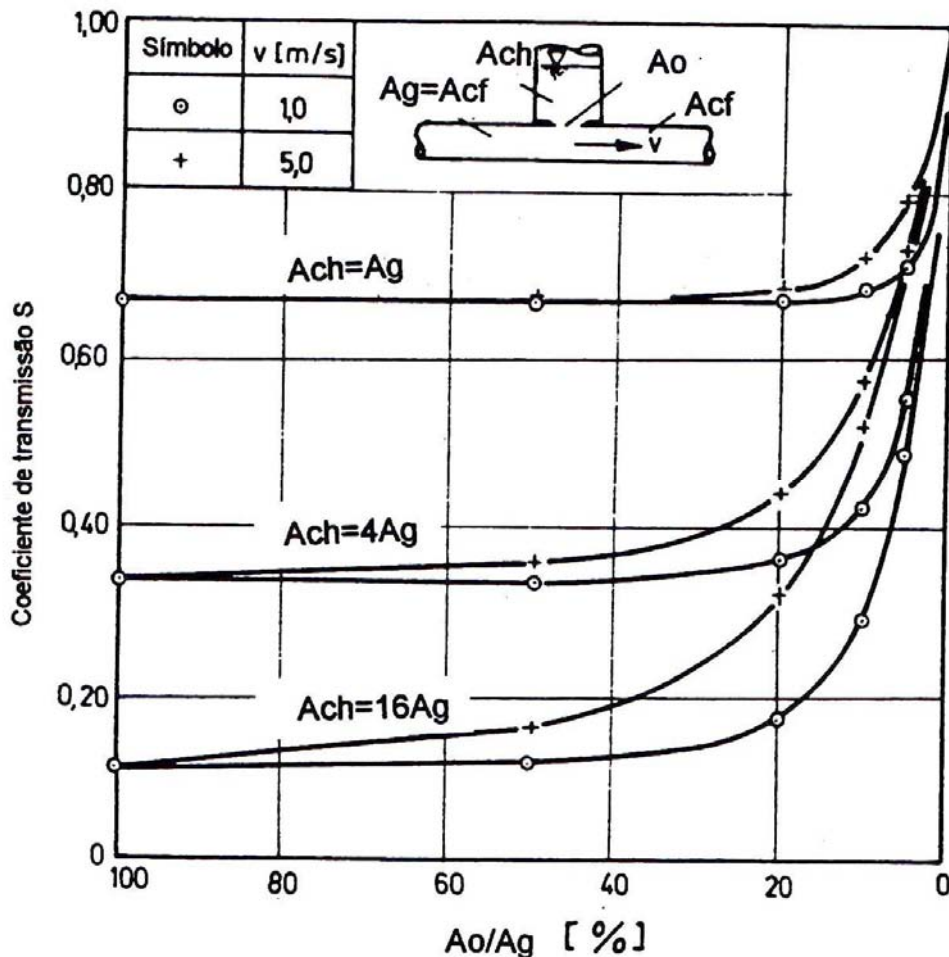


Fig.4.6. – Ábaco para a determinação do coeficiente de transmissão, s, em função da relação de secções (adaptado de Bernhart, 1976) [2]

A chaminé do tipo diferencial foi criada de modo a haver uma maior eficiência do comportamento deste dispositivo nos primeiros instantes do regime transitório. Neste tipo de chaminé existe uma

chaminé interior que descarrega para um tanque exterior. Existe ainda uma versão deste tipo de chaminé recentemente criada e aplicada a pequenos aproveitamentos hidroeléctricos em que o tanque se encontra ligado à galeria ou conduta por um orifício. Sempre que ocorra uma saída de serviço dos grupos, o nível de água numa chaminé deste tipo colocada a montante sobe rapidamente na chaminé interior produzindo uma carga desaceleradora na coluna de água da galeria ou conduta, descarregando para o tanque exterior. No arranque dos grupos da central ocorre a situação inversa. Na aplicação a casos reais observou-se que este sistema produzia maior amortecimento das variações de pressão e que minimizava a dimensão total da chaminé.

4.4. VOLANTE DE INÉRCIA

O volante de inércia trata-se de um órgão que é acoplado ao eixo do grupo que permite aumentar a inércia do mesmo o que possibilita o controlo das pressões máximas e mínimas que resultam da paragem e do arranque do grupo.

Este dispositivo acumula energia durante o funcionamento que transfere depois aquando a existência de um corte da alimentação do grupo.

Este dispositivo tem como grande objectivo a redução das subpressões máximas e o seu modo de funcionamento baseia-se no aumento da massa do grupo o que leva a um incremento do tempo de manobra do conjunto constituinte do grupo electrobomba. Intervém na fase inicial das depressões.

Depois do fecho da válvula reductora o regime variável apenas está dependente da dissipação de energia devido à acção da perda de carga.

As principais desvantagens deste tipo de dispositivo de protecção são as seguintes:

- Os dispositivos de grandes dimensões apresentam problemas de natureza eléctrica e mecânica e possível dificuldade no arranque dos grupos e esforços nas chumaceiras;
- São de difícil aplicação a grupos de eixo vertical;
- Como transformam a manobra numa mais lenta têm uma aplicação restrita a condutas de comprimento ate 2000m.

Apresenta-se de seguida uma figura representativa dum volante de inércia.

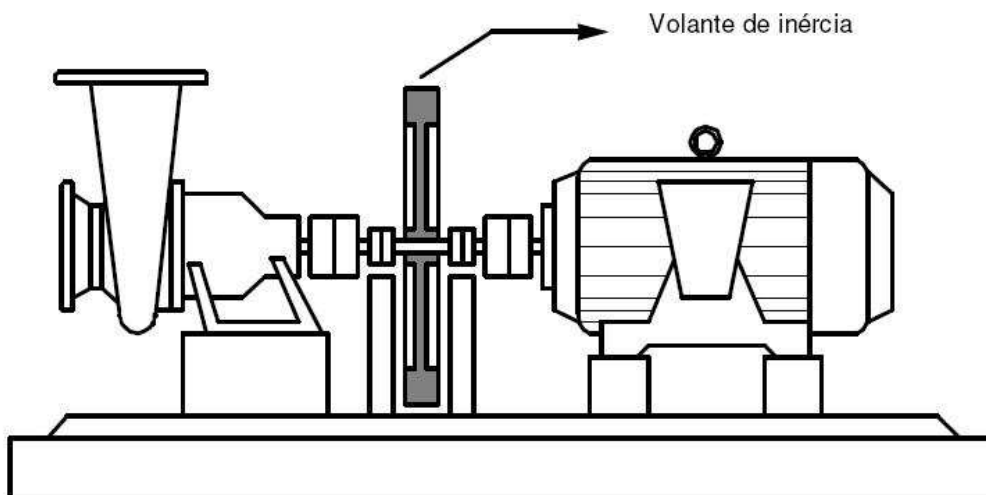


Fig.4.7. – Representação de um Volante de Inércia [10]

4.5. VÁLVULA DE ESCAPE OU ALÍVIO

A principal função deste dispositivo é proteger as condutas no caso de ocorrerem fenómenos de sobrepressão evacuando para isso os excedentes de água instantaneamente. Quando é produzida a onda de sobrepressão na conduta esta provoca a compressão da mola e a abertura da válvula o que leva à evacuação da água.

Um facto interessante é o do eixo ser criado de modo a compensar possíveis defeitos de alinhamento devidos à pressão hidráulica sobre a válvula e à força na mola. Esta circunstância evita qualquer instabilidade e possibilita à válvula que se centre aquando a passagem de água.

Este dispositivo, além de proteger contra as ondas de sobrepressão, pretende evitar a ocorrência de cavitação das bombas no caso de ausência de fluxo e também manter uma pressão correcta apesar do mau funcionamento de um aparelho.

Apresenta-se de seguida um exemplo de uma Válvula de Alívio.

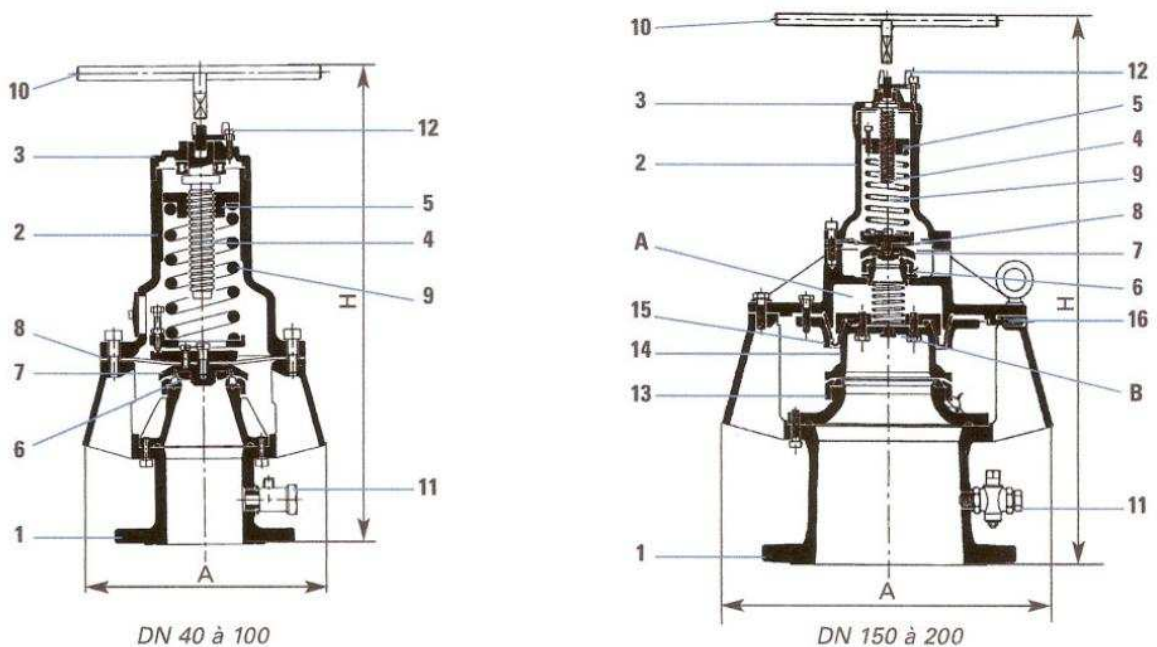


Fig.4.8. – Representação de Uma Válvula de Alívio [15]

Quadro 4.1. – Quadro com a Legenda da Figura 4.8.

Representação	Designação
1	Corpo
2	Chapéu
3	Tampa com parafuso de restrição
4	Parafuso de taragem
5	Porca de taragem
6	Assento
7	Válvula
8	Membrana
9	Mola
10	Chave de taragem
11	Torneira com manómetro
12	Patilha de restrição
13	Assento inferior
14	Válvula inferior
15	Membrana inferior
16	Mola inferior

As aplicações deste dispositivo são as seguintes:

- Prevenir a ocorrência do choque hidráulico em instalações de transporte e distribuição de água;
- Estações de bombagem;
- Reservatórios;
- Sistemas de arrefecimento de água.

Apresentam-se de seguida as vantagens que estes dispositivos apresentam:

- Abertura instantânea;
- Passagem importante para função de descarga o que possibilita uma evacuação contínua sem deterioração da base nem do cilindro;
- Amortecimento do fecho o que evita problemas secundários de choque hidráulico e de toda a ondulação de pressão;
- A sua base é de poliuretano que conserva as características de impermeabilidade mesmo após numerosas utilizações.

Devido ao facto de ser um dispositivo muito simples e ao facto de conseguir descarregar caudal mesmo quando ocorre uma avaria, pode-se dispensar a instalação de um segundo dispositivo, pois o seu conserto é de natureza rápida e fácil o que permite a diminuição dos custos iniciais dos projectos.

Para a determinação da válvula a usar é preciso saber a pressão máxima aplicável ao aparelho em condições normais de funcionamento que ele tem sem que seja destinado a abrir. É a pressão estática, ou em caso de repulsão, a pressão a caudal nulo das bombas. Além disso é preciso saber também o caudal a descarregar e o valor do aumento de pressão admissível durante a descarga.

O caudal a evacuar pela válvula é usualmente estabelecido após um estudo da sobrepressão no sistema da conduta considerada. Em primeira análise será tido como igual ao caudal nominal, ou pelo menos, que possui a variação máxima do fluxo que pode ocorrer incidentalmente em alguns instantes. Depois de obtidos os três requisitos para a escolha da válvula a especificação de qual deve ser usada é rápida bastando para isso recorrer a catálogos de fabricantes deste dispositivo. No entanto, tem de se ter em conta que se os cálculos levarem à obtenção de um débito que ultrapasse as possibilidades da válvula de maiores dimensões fornecida pelos fabricantes, ou se a diminuição de pressão for superior à desejada recorre-se à utilização de duas ou mais válvulas que funcionarão em paralelo.

As válvulas são colocadas em paralelo aos grupos e o seu desempenho baseia-se numa abertura simultânea ao fecho do distribuidor ou à ocorrência de embalamo do grupo o que evita que a variação de caudal na conduta não origine sobrepressões excessivas a montante dos grupos o que poria em risco o funcionamento do sistema. O recurso a este dispositivo é mais indicado em turbinas de reacção, em particular do tipo Francis. As do tipo Pelton já são, usualmente, equipadas com deflectores que asseguram a mesma função, desviando os jactos da roda sem rápida variação do valor de caudal na conduta.

O princípio de funcionamento deste tipo de dispositivos é o seguinte: usualmente trata-se de uma válvula de jacto oco que abre rapidamente cada vez que o distribuidor ou a válvula de segurança do grupo feche bruscamente o que leva a que a manobra de fecho seja, de seguida, mais lenta. No caso de a manobra de fecho ser lenta e se enquadrar em certos limites este dispositivo não entra em serviço. Para a válvula não entrar em serviço é também preciso que não ocorra a sobrevelocidade do grupo.

Apresenta-se de seguida a figura representativa da lei de abertura da válvula.

Os vários tipos de manobra das válvulas são definidos da seguinte forma:

- Variação de abertura da válvula nos instantes $t_0 - t_1 - t_2$ (diagrama triangular);
- Variação de abertura da válvula nos instantes $t_0 - t_1 - t_3 - t_2$ (diagrama trapezoidal).

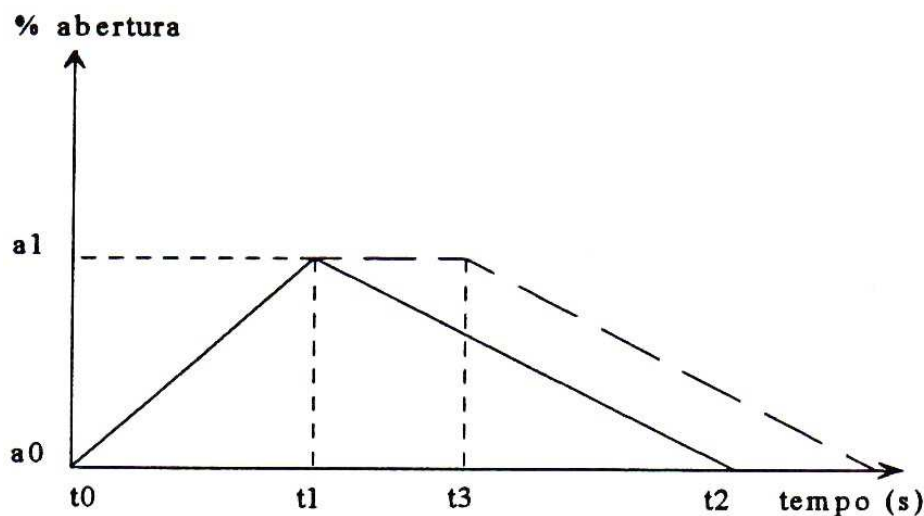


Fig.4.9. – Lei de Abertura da Válvula ($t_2 \gg t_1$) [9]

As válvulas de alívio actuam sempre que a pressão exceder um determinado valor (valor de taragem) O que permite uma descarga automática e o conseqüente alívio das pressões máximas que tenderiam a existir na conduta caso não existisse a válvula.

Estas válvulas devem ter elevada sensibilidade às variações de pressão, rapidez na abertura e boa estabilidade no seu funcionamento. São fundamentalmente um aparelho de descarga automática, abrindo para uma determinada pressão e seguindo uma lei de vazão H-Q própria do tipo de válvula.

O seu funcionamento é caracterizado da seguinte forma:

- O caudal é nulo até que cota piezométrica sob o disco da válvula atinja um valor H1, valor esse denominado por pressão de estanquicidade;
- O caudal terá um valor diferente de zero, para um valor da cota piezométrica superior a H1. Quando a cota piezométrica atinge o valor H2 considera-se que a válvula está totalmente aberta e o caudal correspondente a este valor é Q_{max} ;
- O caudal através da válvula poderá exceder o valor de Q_{max} sempre que a cota piezométrica sob o disco da válvula exceder o valor de H2;
- Admite-se que varia linearmente entre H1 e H2. Isto significa que H1, H2 e Q_{max} são dados característicos de cada válvula de alívio.

As zonas referenciadas no gráfico são definidas da seguinte forma:

- I – para $H \leq H1$ o valor do caudal é dado por:

$$Q = 0 \quad (4.5.1.)$$

- II – para $H1 < H \leq H2$ o valor do caudal é dado por:

$$Q = \frac{H - H1}{H2 - H1} Q_{max} \quad (4.5.2.)$$

- III – para $H > H2$ o valor do caudal é dado por.

$$Q = \frac{Q_{max}}{\sqrt{H2}} \sqrt{H} \quad (4.5.3.)$$

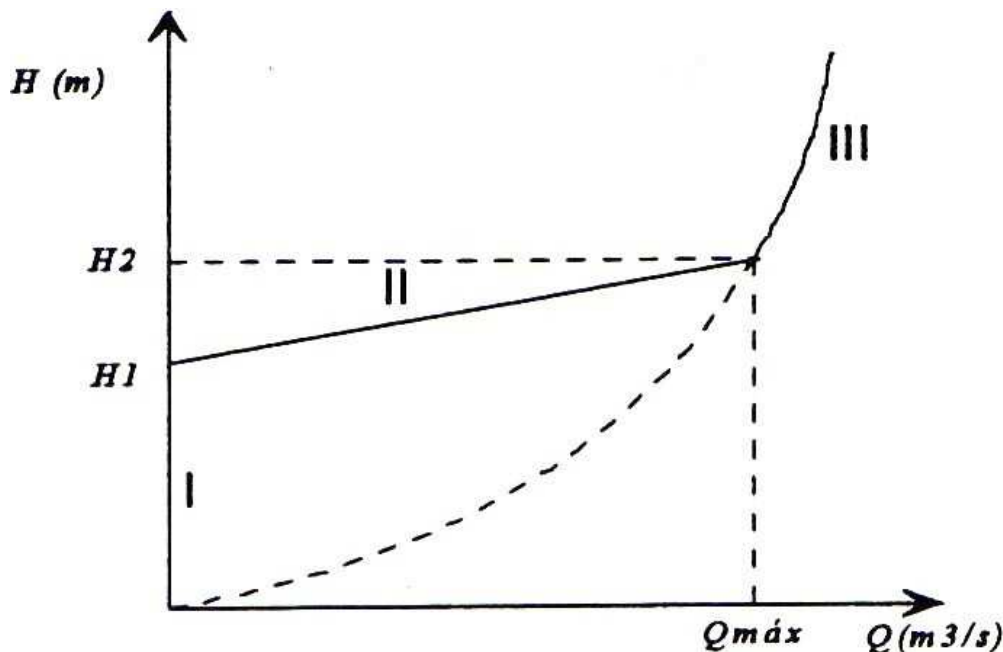


Fig.4.10. – Curva Característica Teórica da Válvula [9]

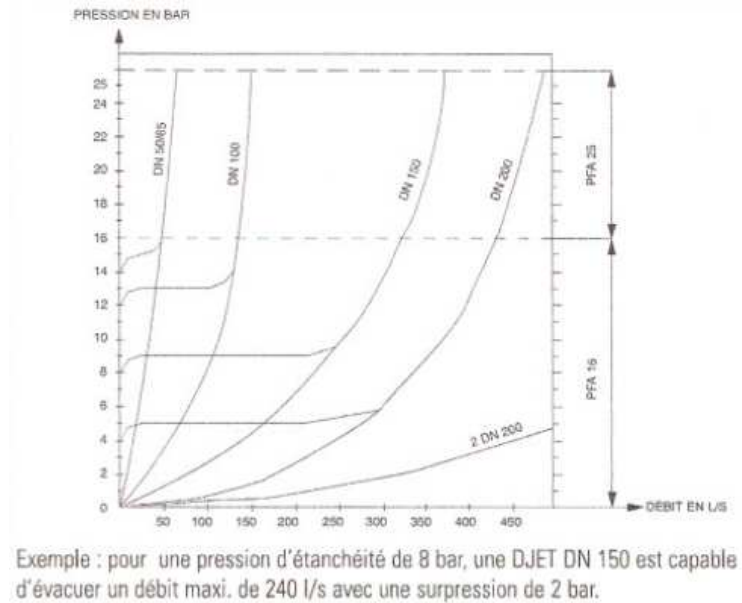


Fig.4.11. – Curva Característica Real da Válvula Fornecida por um Fabricante [15]

É de notar que este tipo de válvula permite efectuar descargas rápidas de caudal atenuando assim o aumento de pressão. As válvulas diferem, normalmente, pelo seu esquema de comando de abertura, sendo necessário conhecer as características de cada válvula, nomeadamente as condições de início de abertura.

De seguida mostra-se a imagem de uma Válvula de Alívio.



Fig.4.12. – Imagem de Uma Válvula de Alívio [15]

Apresentam-se de seguida imagens de uma Válvula de Alívio instalada numa conduta estando tanto em repouso como em funcionamento.



Fig.4.13. – Válvula de Alívio Instalada numa Conduto Estando em Repouso



Fig.4.14. – Primeira Imagem de uma Válvula de Alívio Instalada numa Conduto Quando em Funcionamento



Fig.4.15. – Segunda Imagem de uma Válvula de Alívio Instalada numa Conduta Quando em Funcionamento



Fig.4.16. – Terceira Imagem de uma Válvula de Alívio Instalada numa Conduta Quando em Funcionamento

5

MODELAÇÃO DA REDUÇÃO DAS SOBRESSÕES RECORRENDO A UMA VÁLVULA DE ESCAPE

5.1. DESCRIÇÃO DO PROGRAMA USADO PARA A MODELAÇÃO DO CHOQUE HIDRÁULICO

O programa usado como base para a modelação do comportamento da válvula numa instalação hidráulica é escrito em linguagem Basic e tem por base o Método das Características descrito em 2.3.2.2. e é da autoria do Engenheiro Francisco Manuel Oliveira Piqueiro, professor auxiliar da FEUP.

O principal objectivo do programa usado é verificar as variações de pressão que irão ocorrer na conduta estudada advindas da ocorrência do regime transitório e observar o comportamento da onda de pressão ao longo tempo e da conduta.

Para tal é necessário um conhecimento aprofundado sobre o perfil da conduta, das condições fronteira, do caudal escoado, da carga na conduta e das leis dos órgãos reguladores de caudal (por exemplo válvulas ou bombas) que existam.

A grande vantagem deste programa prende-se com a facilidade com que é possível alterar algum dado e o melhor entendimento do comportamento da onda de pressão, pois este mostra graficamente a variação desta ao longo da conduta e do tempo.

5.2. DESCRIÇÃO DAS CONDUTAS USADAS PARA O ESTUDO DO FUNCIONAMENTO DA VÁLVULA

5.2.1. CONDUTA GRAVÍTICA

5.2.1.1. Localização da Conduta

A conduta gravítica em estudo é uma conduta forçada que pertence ao Aproveitamento Minihídrico do Assobio. Este aproveitamento está localizado na Ribeira do Zêzere, no lugar de Dízimos (Ermida), no conselho de Baião.

O Aproveitamento do Assobio encontra-se efectuado e em exploração desde o ano de 2005.

Apresentam-se de seguida algumas fotografias para melhor localização da conduta e o perfil da mesma.



Fig.5.1. – Fotografias Aéreas do Local de Implantação da Conduita

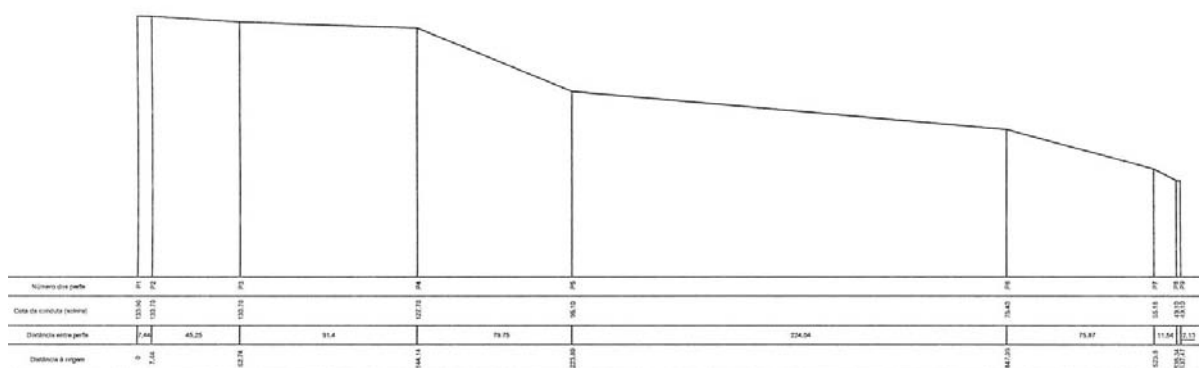


Fig.5.2. – Representação do Perfil Longitudinal da Conduita Gravítica

Este aproveitamento é constituído por um açude, situado transversalmente à Ribeira do Zêzere, que é um afluente do Rio Douro, onde uma tomada de água possibilita a alimentação da conduita forçada em estudo, e também por uma central com grupo gerador. Este grupo é formado por uma turbina do tipo Francis e por um gerador síncrono.

São apresentadas de seguida as características gerais do aproveitamento, transcrevendo um documento realizado em Janeiro de 2006 pela sociedade correntemente proprietária do mesmo.

«O aproveitamento minihídrico do Assobio situa-se na Ribeira de Zêzere, afluente da margem direita do Rio Douro, na bacia hidrográfica do Rio Douro. Fica localizado na Freguesia de Santa Marinha de Zêzere, concelho de Baião e distrito do Porto.

A bacia hidrográfica tem uma área de 22,1 km² e um perímetro de 20 km. Foram feitos dois estudos hidrológicos da bacia, sendo o caudal modular estimado de cerca de 0,69 m³/s (não existe registo de medidas de caudais na ribeira em questão). O caudal de cheia na ribeira para um tempo de recorrência de 100 anos foi estimado em 160 m³/s.

1. Descrição sumária do aproveitamento

O aproveitamento é essencialmente constituído por:

Açude

Um açude de betão do tipo de gravidade, com uma altura máxima à soleira de descarga de 7,0 m (a cota da soleira de descarga é de 136,10 m) e um comprimento total de cerca de 14,3 m. Incorporado no açude encontra-se a derivação para o canal da tomada de água, uma soleira de descarga fixa com 5,6 m de comprimento e uma comporta rebatível de descarga de cheias com um comprimento de 5,0 m e uma altura útil de 1,6 m. A capacidade máxima de descarga destes dois órgãos é de cerca de 120 m³/s. Observa-se que a soleira de descarga do canal de derivação da tomada de água deverá descarregar cerca de 40 m³/s.

O nível normal de exploração (NPA) é de 136,0 m. O nível máximo de cheia (NMC) é de 138,5 m. A capacidade útil da albufeira é de cerca de 300 m³ (para uma banda de regulação de 0,7 m).

O açude está equipado com:

- Uma comporta de descarga de cheias metálica, rebatível, de comando automático por servomotor óleo hidráulico com as medidas acima referidas.
- Um tubo de descarga de fundo provida de uma válvula manual de 0,3 m de diâmetro.
- Uma descarga fixa do caudal ecológico (40 l/s).
- Um passadiço metálico.

Tomada de água

A tomada de água é constituída por um canal de derivação de caudal que funciona ao mesmo tempo como bacia de sedimentação de areias, com um comprimento total de cerca de 18 m, uma largura constante de 2,0 m e altura variável. Esta estrutura inclui uma tomada de pressão para a conduta forçada do aproveitamento.

Conduta forçada

A tomada de água liga à central através de uma conduta forçada em aço tratado interior e exteriormente, com um diâmetro de 0,8 m e um comprimento total de 555 m. A conduta tem uma espessura de 8 mm.

A conduta está instalada parte à vista, apoiada em maciços de suporte (betão e berços metálicos) e de amarração (betão) e parte enterrada.

A conduta está equipada, nas zonas à vista, com 3 portas de visita e juntas de aperto flexíveis do tipo “Vicking” (que permitem absorver pequenos ângulos e variações térmicas do comprimento). Nas zonas enterradas os troços da conduta são soldados topo a topo.

A conduta foi fornecida e instalada pela empresa metalomecânica da Maia, a Mecanidraulica.

Central

A central é constituída por um edifício em betão armado, com dois pisos – a sala das máquinas e a sala de comando. As dimensões gerais exteriores são de 9,35 m de comprimento, 6,10 m de largura e 8,7 m de altura total acima das fundações. Foi concebida tendo em conta os níveis de cheia do rio Douro, pelo que apenas está provida de entradas superiores.

A cota de restituição normal é de 46,5 m (restitui na albufeira do aproveitamento de Carrapatelo no rio Douro), pelo que a queda bruta normal é de $136,1 - 46,5 = 89,6$ m. A queda líquida normal à plena carga é da ordem dos 85 m.

2. Modo de exploração

A exploração do aproveitamento faz-se normalmente de forma inteiramente automática, com regulação do nível da albufeira (exploração a nível constante ou modulado), com regulação do factor de potência e com regulação dos caudais de cheia descarregados pela comporta rebatível.

Sempre que necessário poderá fazer-se o comando semiautomático ou manual do aproveitamento.

Presentemente existe um operador local que visita diariamente as instalações e que está disponível 24 em 24 horas para intervir, caso necessário (o custo deste operador ronda os 500,00 euros por mês). As comunicações com este operador fazem-se via um sistema de tele-alarme por GSM. Existe ainda um acordo com a Jayme da Costa para intervenção em caso de avarias mais complexas (este serviço é gratuito até à recepção definitiva dos equipamentos).

3. Estimativa de produção anual

Para estimar a produção anual, e dado que não existem medidas directas de caudais na ribeira em questão, foram feitos dois estudos hidrológicos, recorrendo aos dados pluviométricos existentes na zona e à comparação com cursos de rio semelhantes em que existe medição de caudais. Estes estudos foram feitos pelo Eng. Francisco Piqueiro do Instituto de Recursos Hídricos (IHRH) da Faculdade de Engenharia do Porto e pela Hidro 4, empresa de consultores na área da hidráulica e hidrologia sediada em Lisboa.

Destes estudos se conclui que o caudal modular se situa entre 0,62 e 0,65 m³/s. Tendo em conta as curvas de caudais classificadas propostas, as características do aproveitamento (queda, perdas, rendimentos, potências instaladas) estimou-se uma produção em ano médio de 2,5 GWh.

Observa-se que o aproveitamento entrou em exploração em meados de Fevereiro de 2004, altura em que se iniciou um período longo de seca extrema que se arrastou até ao presente. Assim as produções registadas até à data não se podem considerar representativas de uma situação média.»

5.2.1.2. A Necessidade de Protecção

A conduta gravítica usada para análise do funcionamento da válvula de alívio é uma conduta que pertence ao Aproveitamento Minihídrico do Assobio, na Ribeira do Zêzere.

Pretendeu-se instalar, neste aproveitamento, uma válvula de descarga pois foi verificado que durante a operação da minihídrica do Assobio, quando em situação de disparo do grupo tem-se constatado um significativo embalamo do grupo, atingindo-se velocidades de cerca de 2060 rpm (2,06 x a velocidade nominal). Constata-se, assim, que após a saída de carga do grupo não se verifica um rápido corte nos caudais controlados pelo distribuidor e como tal ocorre o preocupante embalamo da turbina.

Este comportamento para além de colocar em risco a estabilidade estrutural da turbina, tem impellido acções destrutivas sobre o alternador, tendo já ocorrido danos que necessitaram de reparação.

Procurou-se então equacionar uma solução possível centrando-se o estudo na utilização de uma válvula de alívio imediatamente a montante da turbina. A atenção colocada sobre este dispositivo decorre da intenção por parte do fornecedor dos equipamentos em instalar um dispositivo deste tipo, como acção correctiva ao preocupante embalamo do grupo em situação de disparo.

De acordo com a informação disponível, e como já foi referido, durante a operação da Minihídrica do Assobio, quando em situação de disparo do grupo, tem-se averiguado um expressivo embalamo do grupo, atingindo-se velocidades de cerca de 2060 rpm (2,06 vezes a velocidade nominal), para disparos à plena carga de 1000 kW. Esta potência é atingida com uma abertura do distribuidor de apenas 70 %, o que indica um sobredimensionamento da turbina, onde para uma eventual abertura do distribuidor a 100 % a potência subiria para cerca de 1350 kW. A abertura do distribuidor foi fixada aos referidos 70 %. Durante o regime transitório decorrente do intempestivo disparo do grupo, a sobrepressão atinge os 10,8 bar, ou seja cerca de 20% superior à pressão estática (queda bruta de 89,6 m e um caudal nominal de turbinamento da ordem dos 1,3 m³/s).

Como já foi referido verifica-se então que, após a saída de carga do grupo, não existe um rápido corte nos caudais conferidos pelo distribuidor e como tal ocorre o preocupante embalamo da turbina.

Tendo como principal objectivo a limitação da velocidade de embalamo da turbina, existiriam duas soluções possíveis de implementar:

- Aumento da inércia do grupo;

Por um lado tentar aumentar a inércia das massas girantes para que, apesar da lenta acção de corte de caudais realizada pelo distribuidor, o incremento na inércia do grupo faça com que este não “tenha tempo” para embalar de modo significativo, ocorrendo entretanto a redução dos caudais de ataque à roda e, assim se espera, garantindo o reduzido aumento de velocidade da máquina.

Por um lado o longo tempo de corte a aplicar na actuação do distribuidor decorre da necessidade de linear as sobrepressões que poderiam ocorrer na conduta forçada, função dos transitórios hidráulicos que se desenvolveriam em consequência do súbito encerramento do distribuidor. Por outro lado para conseguir este aumento de inércia das massas girantes dever-se-ia, a esta data, colocar um volante de inércia, ou no caso, colocar um volante de inércia maior do que aquele presentemente instalado.

Esta solução não foi considerada adequada dado entrosar, para além de contingentes alterações nos obstáculos, a troca das chumaceiras da turbina, o que se imagina complexo.

Assim seria de manter o actual volante de inércia mas colocar, o mais próximo da turbina, logo no ponto de entrada da conduta forçada na central, pelo lado exterior, uma válvula de descarga ou de alívio, que, em função das sobrepressões “sentidas” durante o transitório, irá, por acção da sua abertura por resposta automática, derivar parte do caudal transportado pela conduta, fixando assim o caudal motriz à turbina.

- Instalação de uma válvula de descarga

Durante e no “imediatamente após” da ocorrência de um disparo do grupo e consequente fecho do distribuidor virão a ocorrer regimes transitórios – variações súbitas dos valores de caudais e pressões instaladas ao longo da conduta forçada, cuja magnitude poderá ameaçar a estabilidade estrutural da conduta forçada. A dimensão destes transitórios será função das características do escoamento na situação de regime, particularmente o valor da velocidade do escoamento, das características mecânicas da conduta, especialmente o seu material constituinte e espessura e, essencialmente da variação de caudais imposta pelo órgão responsável pela sua variação, ou seja, aquilo que se considera ser a lei de fechamento do grupo, em concreto a lei de fecho do distribuidor.

Verificando-se que as espectáveis variações de carga a ocorrer na conduta possam fazer ameaçar a sua estabilidade estrutural, ter-se-á de considerar a modificação da lei de fecho do distribuidor, tornando-a o mais lenta quanto possível, ou prever a instalação de dispositivos que possam atenuar estes efeitos. Será assim de considerar a instalação de dispositivos de protecção contra o fenómeno do choque hidráulico.

No caso presente, de modo a limitar as sobrepressões sobre a conduta forçada, foi montado um volante de inércia, que “dilatando” o tempo de paragem do grupo iria aumentar o tempo de anulação dos caudais e como tal limitar os acréscimos de carga espectáveis na conduta. Porém esta acção, ao manter por mais tempo os caudais activos sobre a roda da turbina, não irá contribuir de modo significativo para a redução da velocidade de embalamento aquando os disparos à plena carga. Caso o volante impusesse um significativo aumento de inércia, isto conjugado com o corte de caudais por acção do fecho do distribuidor, e assim da força motriz, que mesmo assim não seria equilibrada pela força resistente da rede, tornará mais crítico o embalamento do grupo. Contudo o fabricante, a Mecamidi, apenas estabeleceu um volante de inércia de atenuadas dimensões.

Haverá assim que procurar, de modo a limitar a velocidade de embalamento que o corte de caudais motrizes à roda da turbina seja o mais célere possível, mas por outro lado que esse procedimento não seja tão súbito que exorte elevadas sobrepressões sobre a conduta aquando da ocorrência do transitório.

A compatibilização destes dois objectivos leva à ponderação da instalação de uma Válvula de Descarga / Alívio, cujo intuito, do seu funcionamento aquando de um disparo a plena carga, será:

- por um lado derivar parte dos caudais escoados na conduta forçada de modo que esta não “sinta” um abrupta redução dos caudais o que agravaria as sobrepressões;
- por outro lado, ao derivar parte do caudal, reduzir de modo significativo os caudais motrizes à roda e assim limitar o seu embalamento.

Procedeu-se deste modo à simulação da ocorrência de um disparo a plena carga, com recurso a um programa de cálculo automático de simulação de escoamentos variáveis sob pressão.

Foram considerados os seguintes dados base:

- A aplicabilidade de uma válvula de descarga tipo HPL 800 C DN 200 PN 16;
- O caudal máximo turbinado é de 1,3 m³/s e corresponde a uma abertura do distribuidor igual a 70% da sua máxima capacidade;
- A lei de fecho do distribuidor, com tempos de fecho variáveis de modo a harmonizar a pressão máxima instalada durante o transitório e os caudais descarregados pela válvula de

alívio, fazendo variar nesse tempo o caudal entre o caudal correspondente ao caudal máximo e o caudal descarregado pela válvula de descarga;

- A situação de taragem da válvula corresponde a uma pressão de 5% superior à queda bruta ou seja para cerca de 95 m.c.a..

Sendo a válvula em causa PN16, considerar-se-á como situação limite a instalação durante o transitório de uma pressão de cerca de 160 m.c.a correspondendo a um acréscimo de pressão da ordem dos 70 m.c.a.. De acordo com a curva de saída fornecida pelo fabricante (ver figura 5.2.) para esta eventual situação o caudal descarregado pela válvula seria de cerca de 1,1 m³/s. No entanto para um acréscimo de pressão de apenas 2,1 bar, correspondente a uma pressão de cerca de 95+21 = 116 m.c.a. o caudal descarregado será já de cerca de 650 l/s.

No sentido de minimizar o embalamento foi criado um fecho do distribuidor em duas fases, uma primeira mais rápida de 70% a 30% da sua abertura (presentemente calibrada para cerca de 8s) e os restantes 30% mais lento (presentemente calibrada para 3s). Sendo estes períodos temporais ajustáveis, ir-se-á proceder à simulação do funcionamento da estrutura a quando de um transitório, de modo a se verificar a compatibilização destas condicionantes.

Note-se que a redução da abertura do distribuidor para 30% representa a restrição do caudal a cerca de 0,55 m³/s. Seria assim de considerar que a máxima necessidade de derivação do caudal pela acção da válvula de descarga deveria ser de 1,3-0,55 = 0,75m³/s .

Como se indicou este caudal seria facilmente conseguido com a instalação de uma sobrepressão de 2,5 bar ou seja quando, durante o transitório se instalasse uma pressão da ordem dos 95+25 = 120 m.c.a.

A simulação do comportamento da estrutura obrigou a que, considerando que na primeira fase de fecho do distribuidor se pretende circunscrever a abertura do distribuidor a cerca de 30%, a que corresponderá um caudal motriz à roda da ordem dos 0,55 m³/s, fossem simulados vários tempos de duração para esta fase, de modo a encontrar qual o tempo mais curto que:

- Por um lado origine sobrepressões válidas dadas as capacidades existentes da conduta e as capacidades resistentes da válvula, sendo esta a condição mais restritiva, dado a válvula ser PN 16;
- por outro lado que consiga gerar pressões na zona da válvula que estabeleçam um valor de sobrepressão face à pressão de taragem da válvula (95 m.c.a.) capaz de provocar um caudal descarregado pela válvula da ordem dos 750 l/s.

5.2.1.3. Aplicação do Programa à Conduta em Estudo

Para a aplicação do programa é estabelecido o número de pontos da conduta, o comprimento de cada troço e o comprimento total da conduta de modo a representar o perfil da conduta.

```

C:\ C:\DOCUME~1\Casa\AMBIEN~1\PROGRAMA\CONDUT5.EXE
No. de DIFERENTES PONTOS .. NP= 9
COORDENADAS DOS NOS
Ponto 1 X= 0.00 Z= 133.90
Ponto 2 X= 7.44 Z= 133.70
Ponto 3 X= 52.60 Z= 130.70
Ponto 4 X= 143.96 Z= 127.70
Ponto 5 X= 216.75 Z= 95.10
Ponto 6 X= 439.93 Z= 75.40
Ponto 7 X= 513.06 Z= 55.18
Ponto 8 X= 522.88 Z= 49.10
Ponto 9 X= 525.01 Z= 49.10

COMPRIMENTOS DOS TRECHOS
L 1 = 7.44 m
L 2 = 45.25 m
L 3 = 91.4 m
L 4 = 79.75 m
L 5 = 224.04 m
L 6 = 75.87 m
L 7 = 11.54 m
L 8 = 2.13 m

COMPRIMENTO TOTAL
537.47 m

Carregue numa tecla ....
    
```

Fig.5.3. – Indicação dos Comprimentos dos Vários Troços da Conduita

Depois disto, estabelecem-se os valores para as características da conduita e para o choque hidráulico, como por exemplo o diâmetro da conduita ou o valor da celeridade. Indica-se também quantos são os intervalos para a aplicação do Método das Características.

```

C:\ C:\DOCUME~1\Casa\AMBIEN~1\PROGRAMA\CONDUT5.EXE

Diametro da conduita ..... - .8 m
Diametro do estrangulamento ..... - .8 m

Caudal Nominal ..... - 1.3 m3/s
Caudal minimo ..... - .2 m3/s
Cota inicial da camera de carga ..... - 136.1 m
Cota da restituicao ..... - 49.1 m
Coeficiente de perda de carga no estrangulamento - .3
Rugosidade equivalente da conduita ... - .0005 m
Valor da celeridade ..... - 1000 m/s

Aplicacao do metodo das caracteristicas
? 20
    
```

Fig.5.4. – Indicação das Características da Conduita e do Choque Hidráulico

Depois de estabelecidos esses parâmetros define-se o tempo da manobra do grupo.

5.2.2. CONDOTA ELEVATÓRIA

5.2.2.1. Localização da Conduita

A conduita elevatória usada para a modelação do modo de acção de uma válvula de alívio encontra-se no Sistema Multimunicipal de Abastecimento de Água à Área Norte do Grande Porto, parte VII da terceira fase do projecto de execução pertencente às Águas do Cávado. A terceira fase corresponde ao Sistema Adutor, mais concretamente ao troço entre o perfil P50 a montante da Estação Elevatória EE_M e o Reservatório R_{4M} (Monte Faro), também designado por Monte da Maia, e as extensões para os conselhos de Vila do Conde (ramais para Sabariz e Árvore e para Modivas), Maia (Ramal para Nogueira-II) e Santo Tirso (Ramal para S. Mamede do Coronado).

O troço estudado é precisamente o que liga o perfil montante da EE_M e o reservatório RR_{MST} . Este reservatório é um reservatório geral da passagem e é estabelecido a uma cota que possibilita o abastecimento gravítico à maioria do sistema para jusante e que recebe água directamente a partir da estação elevatória EE_M .

No âmbito do Estudo Prévio foi considerada a parcela de caudal suplementar estabelecida pelas Águas do Cávado, à volta de 200l/s, que corresponde ao abastecimento a duas zonas não anteriormente previstas (zona de S. Mamede de Coronado, na área Sul do Conselho de Santo Tirso, e parte da área norte do concelho de Matosinhos). Para este caudal suplementar houve necessidade de modificar os valores do caudal de dimensionamento da linha adutora principal que tinham sido estabelecidos no Estudo Prévio anterior que passou de 830l/s para 1030l/s.

De acordo com o deliberado nas várias reuniões de acompanhamento do projecto realizadas, esta parte do projecto será ainda complementada com as intervenções nos reservatórios existentes que necessitarão de ser adaptados de modo a se integrarem devidamente no sistema global de telegestão e telecomando previsto, incorporando todos os equipamentos de medição e controle requeridos para estas funções.

No que diz respeito ao material e tipo de juntas e acessórios a usar foi concluído que seria utilizado o ferro fundido dúctil como material de base. Devido ao facto de grande parte do traçado das condutas se localizar em Estradas Nacionais com problemas de espaço marginal, dada a existência de muros e habitações muito próximas do pavimento foi optado não prever a realização de maciços de amarração, recorrendo-se em sua vez a juntas travadas que garantem a adequada ligação das tubagens aos acessórios sem o recurso aos referidos maciços.

Tendo em conta a integração final de todo o sistema num esquema global de telegestão e de acordo com as conclusões das reuniões efectuadas para esse fim (com técnicos do IPE e da EPAL) foi prevista a instalação de cabos telefónicos a colocar ao longo das condutas, bem assim como as respectivas caixas de passagem e derivação. Além disso, preparou-se também, o nó de Vilarinho com válvulas motorizadas e equipamento de instrumentação e eléctrico apropriado, de maneira a permitir a informação sobre os estados e o comando à distância.

Depois de tomada a opção de se proceder ao abastecimento gravítico da área a servir, foi seleccionado o local da implantação do reservatório RR_{MST} , que, considerando tanto a cota precisa para o terreno ($\approx 200m$) como a proximidade da instalação EE_M . Foi então escolhido o Monte Cividade, no concelho de Vila do Conde, o que obriga ao desvio de cerca de 1,5 km da directriz prevista para o traçado da conduita.

A conduita entre a estação elevatória EE_M e o reservatório RR_{MST} , tem mil metros de diâmetro e apresenta um desenvolvimento que ronda os 1430 metros. Esta conduita acompanha num primeiro

troço o traçado do caminho municipal CM1048 e segue depois em corta-mato até ao reservatório de chegada.

Apresenta-se agora uma representação do perfil longitudinal da conduita em estudo.

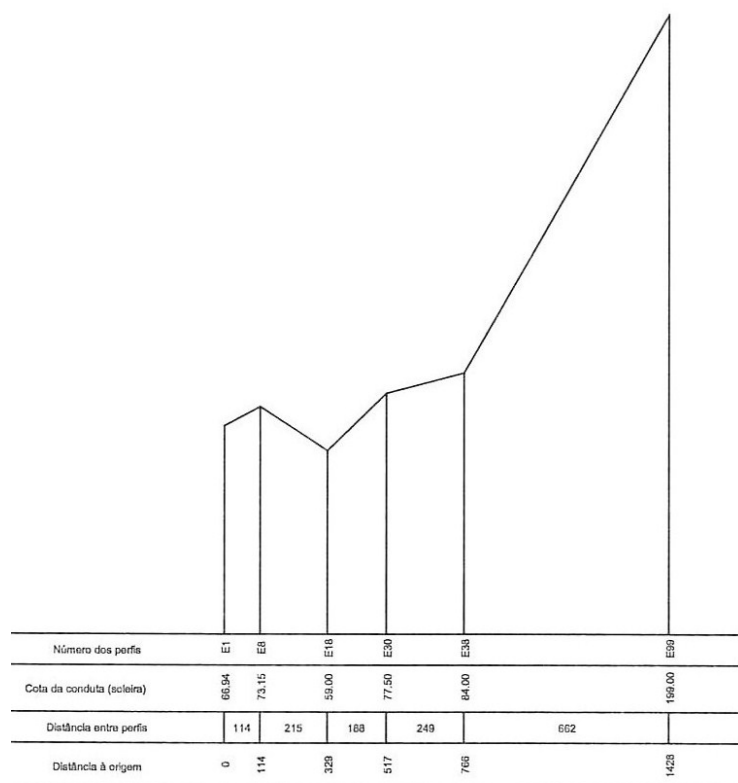


Fig.5.6. – Representação do Perfil Longitudinal da Conduita Elevatória

5.2.2.2. Dimensionamento Hidráulico

Para o cálculo das perdas de carga foi usada a fórmula de Prandtl-Colebrook para uma rugosidade K_b de 0,10mm.

Para ilustrar as condições do funcionamento hidráulico da conduita estudada apresenta-se de seguida uma figura representativa das linhas de carga estática e de carga piezométrica sobre um perfil da conduita. Esta figura apresenta ainda as linhas de sobrepressão e subpressão máximas resultantes do fenómeno do choque hidráulico.

Apresenta-se em anexo uma tabela que resume o dimensionamento hidráulico da conduita considerando o troço correspondente a um caudal fixo (anexo 2).

5.2.2.3. Estudo do Choque Hidráulico

As características físicas e hidráulicas da conduita para o ano horizonte de projecto, 2020, para um caudal de dimensionamento em 24h estão indicadas no quadro em anexo.

Tendo em conta que no cálculo das condições hidráulicas de funcionamento da conduita se recorreu à fórmula de Colbrook para escoamentos em pressão ($k=0,1$) apresentam-se de seguida os parâmetros característicos referentes ao choque hidráulico para o ano horizonte de projecto:

- Tempo de paragem das bombas (segundo Rosich) = 3,09s;
- Celeridade da onda elástica = 894,9 m/s;

- Comprimento crítico = 1382,6m;
- Sobrepressão máxima (Método das Características) = 245,7m;
- Subpressão máxima (Método das Características) = 22,6m.

Determinados do modo indicado no subcapítulo 5.2.2.5.

Em sequência do determinado o sistema necessitará de protecção contra os efeitos do choque hidráulico tendo sido escolhido para esse fim uma válvula de escape.

Sendo assim foram considerados, de acordo com o exposto, os seguintes dados para o cálculo:

- Cota do eixo à saída da central = 67m;
- Caudal máximo (ano horizonte) = 1038l/s;
- Altura manométrica máxima, $H_m=140,6m$;
- Desnível topográfico, $H_g=138,0m$;
- Celeridade da onda elástica = 894,9m/s;
- Velocidade do escoamento na conduta, $U_0=1,32m/s$.

Cotas absolutas dos pontos em estudo:

- Central elevatória = 67m;
- Perfis: $E_{18} = 59,75m$
 $E_{25} = 71,54m$
 $E_{33} = 78,10m$

Depois de determinadas as equações das piezométricas envolventes após a paragem dos grupos verifica-se que o perfil mais desfavorável é o perfil E18 onde se verificam os seguintes valores:

- Na fase de subpressão

$$P_{18}^- = (\Delta H_{18}^- - Z_{18}) \times 10^{-1} \text{ kgf} / \text{cm}^2 = 4,9 \text{ kg} / \text{cm}^2 \quad (5.2.1.)$$

- Na fase de sobrepressão

$$P_{18}^+ = (\Delta H_{18}^+ - Z_{18}) \times 10^{-1} \text{ kgf} / \text{cm}^2 = 24,2 \text{ kg} / \text{cm}^2 \quad (5.2.2.)$$

5.2.2.4. Cálculo da Válvula a Usar

O método usado para o estudo foi o de Lundgren publicado em “ASME- Jan 1961 – Journal of Engineering for Power”.

No desenvolvimento do mesmo foi calculado:

- Parâmetro Característico da Conduta

$$C = \frac{a \times V_o}{g \times H_m} \approx 0,9 \quad (5.2.3.)$$

- Perda de Carga Relativa

$$\Delta h = \frac{\Delta H(y)}{H_m} \approx 0,019 \quad (5.2.4.)$$

- Coeficiente de Relação à Pressão Máxima

$$\frac{\Delta H_{18}^+ - H_s}{H_{0(18)}} = 0,07 \Rightarrow \approx 0,1 \quad (5.2.5.)$$

Recorrendo aos ábacos de Lundgren determina-se que:

$$\frac{Q_{md}}{Q_0} = 1,24 \therefore Q_{md} = 1287,12l / s \quad (5.2.6.)$$

Sendo este valor o valor máximo instantâneo.

Então, a secção mínima de descarga será:

$$S_{VD} = \frac{1,7 \times Q'_{md}}{\sqrt{2g(H_{m20} - H_s)}} \cong 0,056m^2 \quad (5.2.7.)$$

Onde Q'_{md} é expresso em m^3/s .

Sendo assim, o diâmetro nominal a adoptar será:

$$DN \geq \sqrt{\frac{4S'_{VD}}{\pi}} \approx 267mm = 2 \times DN150 \quad (5.2.8.)$$

Em valor normalizado com molas pré-tensionadas à pressão de 19,6 bar, valor que representa a máxima carga estática observada em toda esta parcela do sistema.

O volume de descarga será dado por:

$$V_D = \theta_1 \times Q_{md} \approx 500l \quad (5.2.9.)$$

Onde θ_1 representa o tempo de percurso da onda de sobrepressão até à válvula de alívio.

5.2.2.5. Aplicação do Programa à Conduita em Estudo

Para se aplicar o programa à conduita tem de se ter informação sobre o grupo elevatório, mais concretamente a informação de três pontos da curva bomba. Como não foi possível obter a curva usada pelo projectista escolheram-se três pontos em que um deles é o ponto equivalente ao caudal bombado e à altura de elevação do projecto.

Aplicando o programa chega-se a valores para as pressões máximas e mínimas para a situação de regime permanente e para a situação de regime transitório.

Sendo assim para a situação de regime permanente têm-se o seguinte valor para a pressão na secção da estação elevatória, 139,9. Na situação de regime transitório obtêm-se os seguintes valores para a estação elevatória de pressão máxima e mínima, respectivamente, de 245,7m e 22,6m.

Para se poder modelar o funcionamento da válvula de alívio é preciso, em primeiro lugar, estipular qual será a pressão de taragem da mesma, ou seja, o valor de pressão a partir da qual ela entra em funcionamento. Neste caso foi considerado que esta pressão seria equivalente a um aumento de 5% da altura manométrica. Sendo assim obteve-se que a pressão de taragem no valor de 147,63m.

Quando a válvula de alívio entra em funcionamento as condições fronteira do escoamento alteram-se e é preciso, então, aplicar de novo o método das características.

Sendo a bomba a condição fronteira de montante do escoamento, ao aplicar o método das características, a linha característica C^+ (2.3.2.38.) não é válida. É então necessária a utilização de outra equação que permita, juntamente com a linha característica C^- , obter os valores do caudal e da carga na secção da bomba. Recorre-se, para isso, à curva característica da bomba (2.3.2.74.).

Contudo ao usar-se esta última equação tem de se ter em conta o facto da velocidade de rotação da bomba não ser constante ao longo do tempo que esta leva a parar e torna-se necessário recorrer por sua vez à Lei de Paragem da Bomba (2.3.2.92.) que permite saber a velocidade de rotação do grupo em qualquer instante.

Apresenta-se de seguida um esquema que permite visualizar, graficamente, o problema da aplicação da linha característica C^+ na secção inicial da conduta.

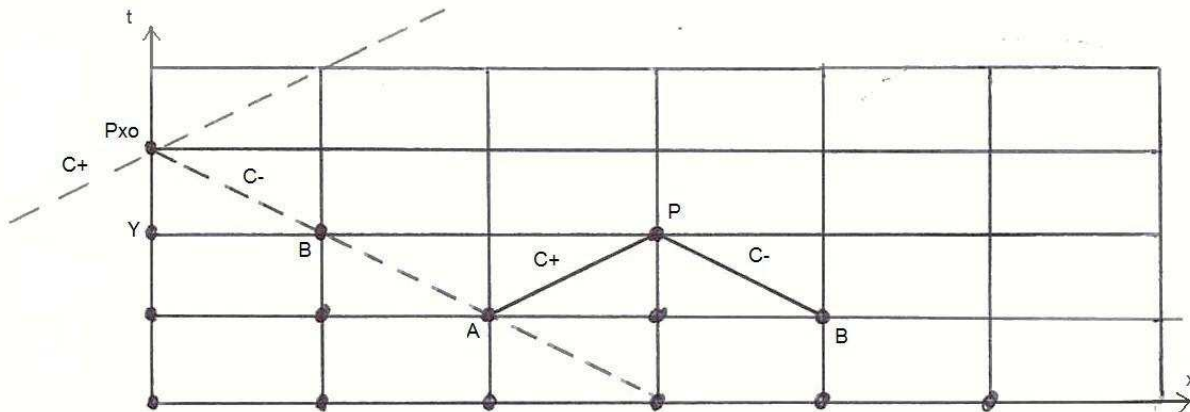


Fig.5.7. – Aplicação Gráfica do Método das Características na Secção Inicial e numa Secção Intermédia de uma Conduta Elevatória.

Obtendo as três equações referidas anteriormente é possível então chegar aos valores de caudal e carga, na secção da bomba, aquando a entrada em funcionamento da válvula.

Resolvendo este sistema de três equações no caso em estudo chega-se a que a carga é de 111,6m e que o caudal é de 809,1l/s.

Recorrendo então ao programa do Professor Doutor Francisco Piqueiro consegue-se saber os novos valores das sobrepressão e subpressão que são respectivamente de 212,4m e 62,1m o que leva a que haja um decréscimo da sobrepressão máxima de 33,3m e um aumento da subpressão máxima de 39,5m.

Apresenta-se no anexo 4.2 as tabelas mais detalhadas com valores para maior número de secções da conduta e uma representação das variações de pressão máxima e mínima atingidas quando se recorre à Válvula de Escape como dispositivo de protecção.

6

CONCLUSÕES

Observando os resultados obtidos antes e depois da aplicação da válvula, tanto na conduta gravítica como na conduta elevatória, é possível verificar que existe uma atenuação dos valores das pressões máximas e mínimas e também das cargas atingidas aquando a ocorrência do fenómeno do choque hidráulico.

Ao fazer-se uma comparação entre os valores obtidos na conduta gravítica e na conduta elevatória é possível verificar que existe um maior decréscimo da sobrepressão máxima e um maior acréscimo da subpressão máxima na conduta gravítica.

É possível verificar também que na conduta elevatória os valores do decréscimo da sobrepressão e do acréscimo da subpressão são muito semelhantes enquanto que na conduta gravítica, principalmente quando a manobra é rápida, já se nota uma discrepância entre o valor do acréscimo da subpressão e o decréscimo da sobrepressão.

Sendo assim verifica-se que a válvula cumpre o seu principal objectivo de minimização de sobrepressões e que alivia também as subpressões.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Águas do Cávado, *Sistema Municipal de Abastecimento de Água à Área Norte do Grande Porto. 3º Fase. Projecto de Execução do Sistema Adutor. PARTE VII – Entre o Perfil P50 a Montante da EEM e o Reservatório R (Nogueira) da Maia e Extensões nos concelhos de Vila do Conde e Maia, Volume I, Memória Descritiva e Anexos*
- [2] Almeida, A. Betânio, *O Golpe de Aríete em Conduatas Elevatórias. Síntese dos Conhecimentos Actuais*. LNEC, Lisboa, 1981.
- [3] Almeida, A. Betânio, *Seminário 238. O Golpe de Aríete em Conduatas*. LNEC, Lisboa, Junho de 1979.
- [4] Almeida, A. Betânio, *Regimes Transitórios em Pressão, O Clássico e Actual Problema do Golpe de Aríete. Lição de Síntese*, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Janeiro de 1985.
- [5] Fanelli, M., *Les Phénomènes de Résonance Hydraulique*, La Houille Blanche, n.º4, 1975, pp. 233-253.
- [6] Gomes, C., Carvalho, R., Costa, P., Almeida, A. Betânio. Os regimes transitórios nas conduatas elevatórias e análise preliminar do golpe de aríete. In *Estações Elevatórias. Saneamento Básico, Vol 2*, LNEC, Lisboa, 1982.
- [7] Pacheco Figueiredo, M. M., *Choque Hidráulico em Conduatas Elevatórias. Protecção com Reservatórios de Ar Comprimido*, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1990.
- [8] Quintela, António de Carvalho, *Hidráulica*. Fundação Calouste Gulbenkian, Serviço de Educação e Bolsas, 2009.
- [9] Silva Ramos, H. M., *Simulação e Controlo de Transitórios Hidráulicos em Pequenos Aproveitamentos Hidroeléctricos. Modelação e Análise dos Efeitos Induzidos pela Sobrevelocidade de Turbogeneradores*. Dissertação de Doutoramento, Universidade Técnica de Lisboa - Instituto Superior Técnico, 1995.
- [10] https://www.fe.up.pt/si/conteudos_geral.conteudos_ver?pct_pag_id=1639&pct_parametros=p_ano_lectivo=2009/2010-y-p_cad_codigo=EC0033-y-p_periodo=1S&pct_disciplina=&pct_grupo=21039#21039. 25/03/2010.
- [11] https://dspace.ist.utl.pt/bitstream/2295/291694/1/AG_Aducao.pdf. 19/04/2010.
- [12] <https://dspace.ist.utl.pt/bitstream/2295/128520/1/Saneamento%20Slides%20001%20a%20051.pdf>. 19/04/2010.
- [13] http://disciplinas.dcea.fct.unl.pt/hidraulica/a_textosapoio/acr/2006-H1-TEOR-24-CHOQUE-2-R0.pdf. 19/04/2010.
- [14] http://w3.ualg.pt/~rlanca/sebenta-hid-aplicada/ha-07-golpe_de_ariete.pdf. 19/04/2010.
- [15] Catálogos de fabricantes de válvulas

ANEXO 1

DISPOSITIVO DE PROTECÇÃO	OBJECTIVO DA PROTECÇÃO (ATENUAÇÃO)					Condições mais adequadas
	H_{Bm}	H_{BM}	$\frac{H_{Bm}}{H_{BM}}$	H_{xm}	$\frac{H_{xm}}{H_{xM}}$	
VOLANTE DE INÉRCIA	•	-	-	•	-	L < 2000 m B. de eixo horizontal Perfil da conduta concavo
RAC	-	-	•	-	•	$\bar{\rho} < 1$
CHAMINÉ DE EQUILÍBRIO	-	-	•	-	•	Condições topográficas adequadas
VDA	-	•	-	-	-	$\bar{\rho} < 1$ L > 2000 m

A1.1. Indicador Rápido Para Selecção dos Dispositivos de Protecção Convencionais

DISPOSITIVO DE UTILIZAÇÃO	OBJECTIVO DO DISPOSITIVO	CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO	OBSERVAÇÕES	
			PRINCIPIO DE FUNCIONAMENTO	VANTAGENS E DESVANTAGENS
VOLANTE DE INERCIA	<ul style="list-style-type: none"> - Diminuição das depressões e das sobreposições ao longo de toda a conduta. - Objectivos 01,02 e 03 	$L < 2000 \text{ m}$	<ul style="list-style-type: none"> - Cedência de energia acumulada nas massas girantes. Alimentação pela bomba de água do reservatório de montante. - Dispositivo não reversível 	<ul style="list-style-type: none"> - Não exige manutenção especial. Fechamento suave da válvula de retenção. - Dificuldade em proteger secções intermédias elevadas. - possíveis dificuldades no arranque dos grupos. - Sobrecarga das chumceiras. - Adequado para bomba de eixo horiz.
		$\lambda = \frac{E_G}{E_C} > 2$		
		Perfil da Conduta concavo. Elevado No.		
R A C	<ul style="list-style-type: none"> - Diminuição das depressões e das sobreposições ao longo de toda a conduta. - Objectivos 01,02 e 03 	$L < 10\ 000 \text{ m}$	<ul style="list-style-type: none"> - Cedência de energia acumulada na massa de ar comprimido. Alimentação de água a partir do RAC. - Dispositivo reversível. 	<ul style="list-style-type: none"> - Elevada eficácia na protecção. - Exige manutenção. - Eventual necessidade de compressor e dispositivos de controlo do nível de água. - Ocupação de um espaço importante. - Fechamento brusco da válvula de retenção.
		Perfil da Conduta concavo.		
CHAMINÉ DE EQUILÍBRIO	<ul style="list-style-type: none"> - Diminuição das depressões e das sobreposições ao longo de toda a conduta. - Objectivos 01,02 e 03 	<ul style="list-style-type: none"> - Altura da elevação pequena ou perfil da conduta convexo a pouca distância da linha piezométrica. 	<ul style="list-style-type: none"> - Cedência de energia gravitacional acumulada na chaminé. Alimentação de água a partir da chaminé. - Dispositivo reversível. 	<ul style="list-style-type: none"> - Elevada eficácia na protecção. - Não exige manutenção. - Desvantagens estéticas. - Eventual elevado custo de construção. - Contacto da água com a atmosfera. - Eventual perda de água.
V D A	<ul style="list-style-type: none"> - Diminuição das sobrepressões. - Protecção localizada ou de toda a conduta. - Objectivo 02 	$\bar{\rho} < 1$	<ul style="list-style-type: none"> - Mobilização de energia elástica interna. - Dispositivo não reversível 	<ul style="list-style-type: none"> - Exigência de manutenção e controlo do tempo de abertura da válvula. - Perda de água. - Válvulas dispendiosas. - Maior eficiência em conduatas longas.
		<ul style="list-style-type: none"> - T_E superior ao tempo de abertura mínimo. - $L > 2000 \text{ m}$ - Perfil da conduta côncavo 		

A1.2. Características Gerais dos Dispositivos Convencionais de Protecção (Esquema Simples)

ANEXO 2

DESIGNAÇÃO	CARACTERÍSTICAS
1. BACIA HIDROGRÁFICA	
Área da bacia	22,1 km ²
Escoamento anual médio	21,9 hm ³
Caudal modular	0,65 m ³ /s
2. AÇUDE E TOMADA DE ÁGUA	
Albufeira	
Capacidade útil	300 m ³
Açude	
Altura máxima do açude	7,0 m
Coroamento do açude	14,3m
Cota da soleira de descarga	136,1 m
Comprimento da soleira de descarga fixa	5,6 m
Comprimento da soleira de descarga móvel	5,1 m
Nível de pleno armazenamento (NPA)	136,1 m
Nível de máxima cheia (NMC)	138,5 m
Caudal de cheia para retorno de 100 anos	160 m ³ /s

Comporta de descarga de cheias	
Tipo	Comporta volet automatic
Dimensões	5,0 x 1,6
Caudal ecológico	
Tipo	Tubo DN110 de descarga livre
Caudal de dimensionamento	40 l/s
Tomada de Água	
Comprimento total	18 m
Caudal derivável	1,3 m ³ /s
<u>Equipamento</u>	
Ensecadeira do canal de derivação	
Tipo	Comporta metálica manual
Dimensões	2,0 x 3,60 m ²
Comporta de fundo	
Tipo	Adufa mural, comando manual
Dimensões	0,60 x 0,60 m ²
Grelha de limpeza	
Tipo construtivo	Barras metálicas
Espaçamento entre barras (livre)	20 mm
Inclinação	60° (30,9 %)
Comporta de segurança da conduta	
Tipo	Vagão de fecho automatic
Dimensões	1,8 x 1,8 m ²

Sistema de medição nível	
Tipo	Sensor piezoresistivo
3. CONDUTA FORÇADA	
Tipo	Aço com soldadura helicoidal
Diâmetro	DN 800
Espessura	8 mm
Inclinação média	17 %
Comprimento total	555 m
Número de postigos de inspecção	3
Perdas de carga totais no circuito hidráulico	4,5 m (5 % da queda bruta)
4. EDIFÍCIO DA CENTRAL	
Tipo	Betão armado
Dimensões sala das máquinas	6,1 x 9,35 m ²
Dimensões sala de comando	6,1 x 7,6 m ²
Cota da água na restituição (mínima)	45,5 m
Cota com caudal nulo (normal)	46,5 m
Cota à plena carga (normal)	46,5 m
Cota de cheia máxima (12.000 m ³ /s)	50,5 m
Grupo Turbina-gerador	
<u>Turbina</u>	
Tipo	Francis, eixo horizontal.

Caudal máximo turbinável	1,3 m ³ /s
Caudal mínimo turbinável (já ensaiado)	0,20 m ³ /s
Cota do eixo da turbina	49,1 m
Queda bruta (136,1 – 46,5)	89,6 m
Queda útil	85,1 m
Rendimento máximo	0,9
Potência no veio	1000 kW
Chumaceiras	2
<u>Regulador</u>	
Tipo	Óleo-hidráulico, 2 bombas
Acumulador	
<u>Gerador</u>	
Tipo	Síncrono
Tensão de produção	0,4 kV
Rendimento plena carga	0,96
Potência activa	1000 kW
Factor de potência nominal	0,9
Potência aparente	1100 kVA
Excitação	Alternador auxiliar, no veio do gerador, com díodos rotativos.
Chumaceiras	2
Válvula de isolamento	
Tipo	Borboleta com servo, contrapeso
Diâmetro	DN 700

Transformador principal	
Tipo	Óleo, interior, ONAN
Relacção de tensões	0,4 / 15 kV
Potência aparente	1250 kVA
Quadros Eléctricos	
Monobloco à tensão da rede 15 kV	
Tipo	Fabrico normalizado <i>standard</i>
Celas	3
Quadro à tensão de produção	
Tipo	Construção metálica
Quadro de serviços auxiliares	
Tipo	Construção metálica
Painéis	2
Quadro de comando e controlo	
Tipo	Construção metálica
Painéis	2
Quadro de contagem	
Tipo	Construção metálica
Mesa do operador	1
Restantes instalações eléctricas	
Iluminação e tomadas	
Rede de terras	

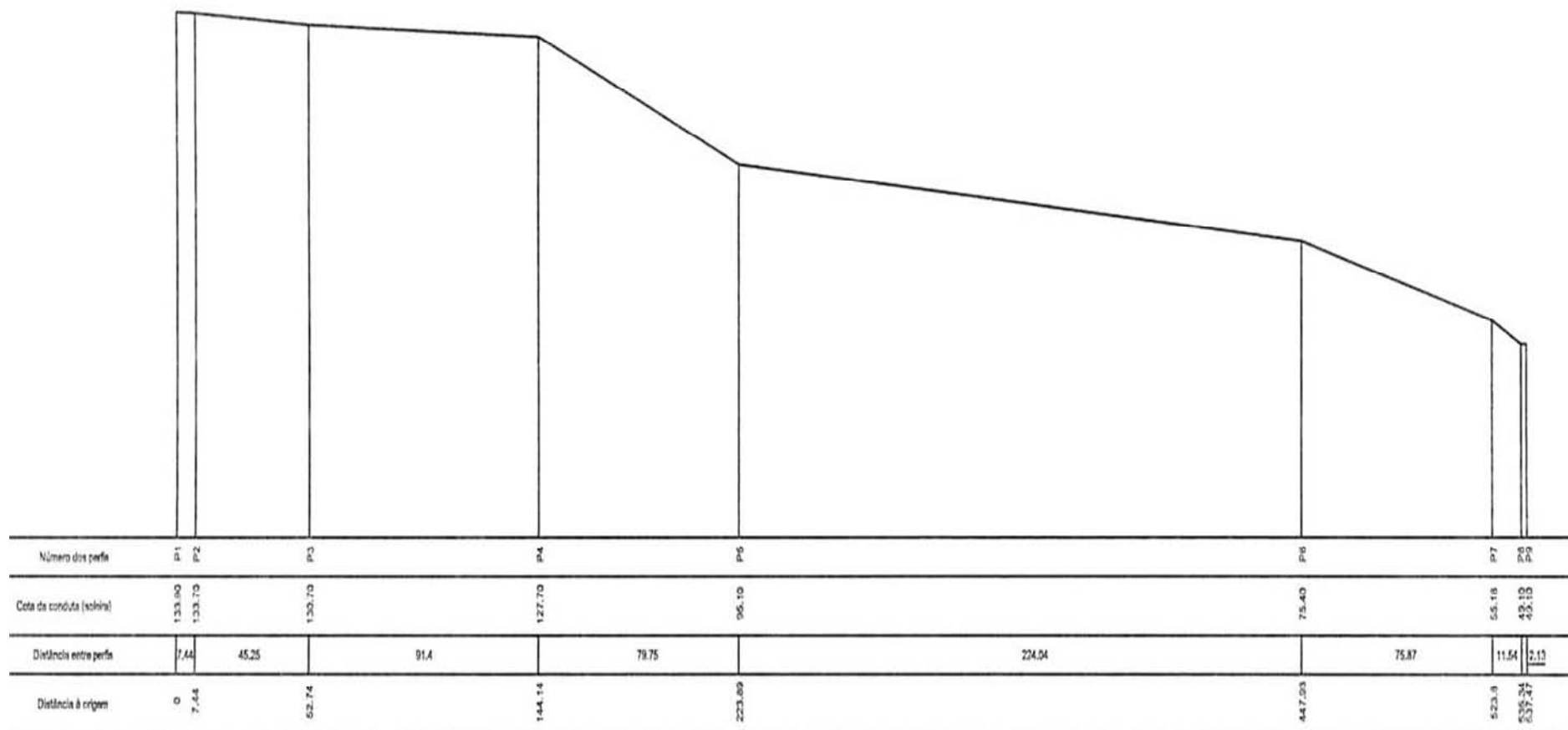
Detecção e extinção de incêndios	1
Detecção de intrusão	1
Transmissão de dados	1
Telefones	2
Cabos	
Poço de Drenagem	
Bomba	2 moto bombas eléctricas 5 l/s
Canal restituição	
Ensecadeira	
Tipo	2 comportas inseridas em ferros U
Dimensões	1,2 x 1,6 m ²
5. LIGAÇÃO REDE	
Tensão da rede	15 kV
Potência de curto circuito mínima da rede	19 MVA
Comprimento ramal de interligação	Aproximadamente 600 m

A2.1. Quadro Resumo das Características do Aproveitamento do Assobio

Descrição do troço		E1 - E98 (R_{RMST}) conduta elevatória
Comprimento (m)		1455
Diâmetro (mm)		1000
Caudal de Projecto (1/s)		1038,1
Velocidade Máxima (m/s)		1,32
Perdas De Carga	Unitária (m/m)	0,001197
	Total (m)	0,66
Cotas Piezométricas	Montante	77,90
	Jusante	77,24
Carga Máxima no Troço (m)		112,6
Observações		Estação Elevatória EE_M ao Perfil E1

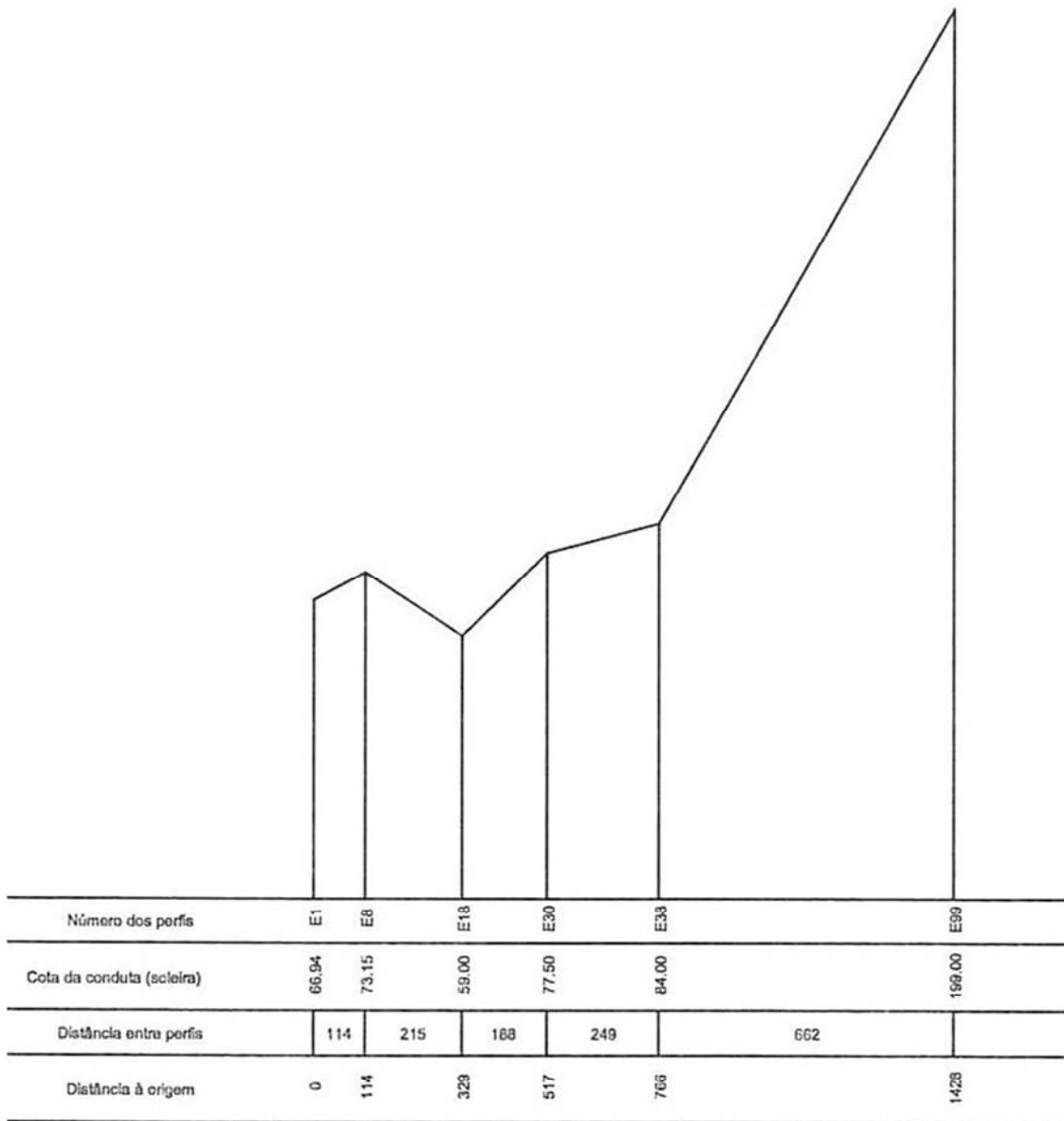
A2.2. Quadro Resumo das Características da Conduca Elevatória Estudada

ANEXO 3



A3.1. Perfil Longitudinal da Conduita Gravítica

ANEXO 3



A3.2. Perfil Longitudinal da Conduta Elevatória

ANEXO 4.1

QA4.1. Quadro com os Valores das Pressões e Cargas Máximas e Mínimas Atingidas na Conduita Gravítica Antes da Entrada em Funcionamento da Válvula para Δt_f de 3s

Δt_f (s)		Sem Válvula				Com Válvula		$H_{taragem}$ (m) 95			
3				$Q_{max\ turb}$ (m ³ /s)	μ (s)			Q_{esc} (m ³ /s)		0,561	
x (m)	z (m)	H_{max} (m)	P_{max} (m)	H_{min} (m)	P_{min} (m)	H_{max} (m)	P_{max} (m)	H_{min} (m)	P_{min} (m)	Δp_{max} (m)	Δp_{min} (m)
53,7	130,66	142,7	12,03	129,61	-1,05	139,27	8,61	135,15	4,49	3,42	5,54
107,5	128,9	152,58	24,56	120	-8,02	142,43	13,53	134,23	5,34	11,03	13,36
188,1	107,92	159,13	51,21	113,54	5,62	147,15	39,23	132,9	24,98	11,98	19,36
268,7	90,51	168,89	78,38	103,95	13,44	151,84	61,33	131,64	41,12	17,05	27,68
349,4	83,39	178,54	95,14	94,48	11,08	156,5	73,11	130,43	47,04	22,03	35,96
430	76,28	188,23	111,95	85,14	8,87	161,12	84,84	129,3	53,02	27,11	44,15
510,6	55,86	197,85	141,99	75,91	20,05	165,71	109,85	128,24	72,38	32,14	52,33
537,5	49,1	201,04	151,94	74	24,9	167,23	118,13	127,98	78,88	33,81	53,98

QA4.2. Quadro com os Valores das Pressões e Cargas Máximas e Mínimas Atingidas na Conduita Gravítica Antes da Entrada em Funcionamento da Válvula para Δt_f de 4s

Δt_f (s)		Sem Válvula				Com Válvula		$H_{taragem}$ (m) 95			
4				$Q_{max\ turb}$ (m ³ /s)	μ (s)			Q_{esc} (m ³ /s)		0,561	
x (m)	z (m)	H_{max} (m)	P_{max} (m)	H_{min} (m)	P_{min} (m)	H_{max} (m)	P_{max} (m)	H_{min} (m)	P_{min} (m)	Δp_{max} (m)	Δp_{min} (m)
53,7	130,66	140,6	9,94	131,61	0,95	138,36	7,69	135,43	4,77	2,25	3,82
107,5	128,9	145,1	16,2	127,13	-0,41	140,61	11,71	134,78	5,88	4,49	6,29
188,1	107,92	151,83	43,9	120,41	12,48	143,98	36,05	133,83	25,91	7,85	13,43
268,7	90,51	158,55	68,04	113,7	23,18	147,32	56,81	132,92	42,4	11,23	19,22
349,4	83,39	165,26	81,86	107	23,6	150,64	67,25	132,04	48,64	14,61	25,04
430	76,28	171,95	95,67	100,32	24,04	153,94	77,66	131,19	54,91	18,01	30,87
510,6	55,86	178,61	122,75	93,67	37,81	157,21	101,35	130,39	74,52	21,4	36,71
537,5	49,1	180,83	131,73	91,78	42,68	158,3	109,2	130,15	81,05	22,53	38,37

QA4.3. Quadro com os Valores das Pressões e Cargas Máximas e Mínimas Atingidas na Conduita Gravítica Antes da Entrada em Funcionamento da Válvula para Δt_f de 6s

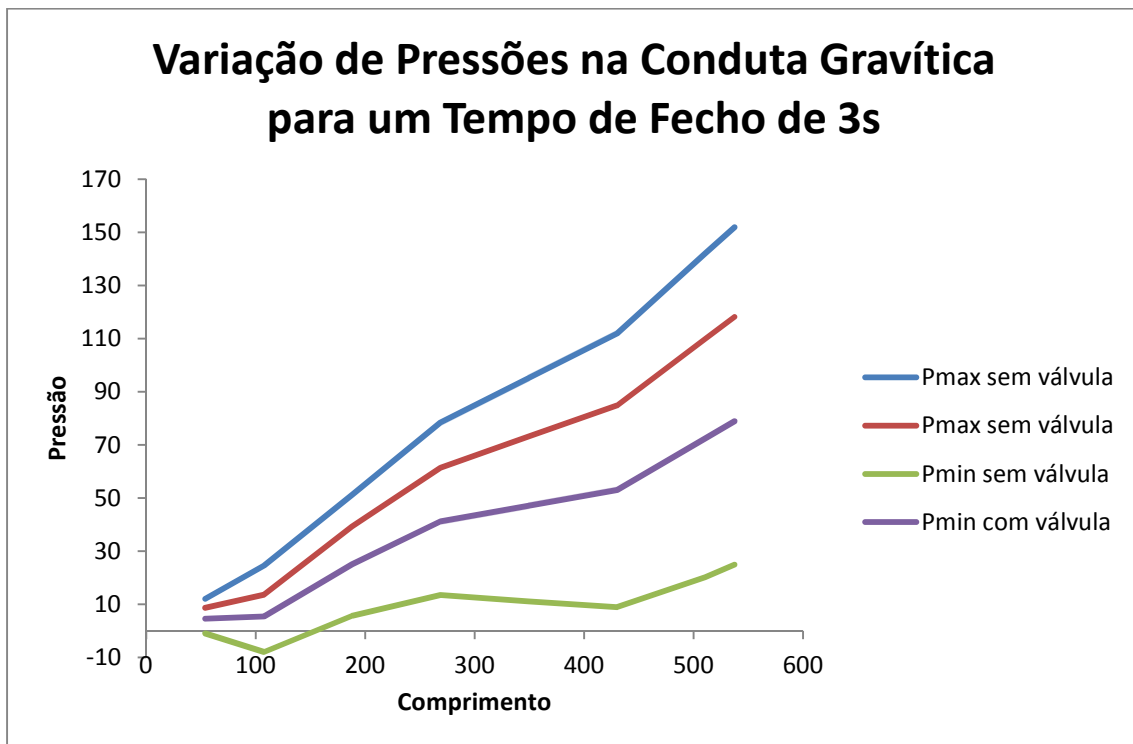
Δt_f (s)		Sem Válvula				$Q_{\max \text{ turb}}$ (m^3/s)		μ (s)	Com Válvula		H_{taragem} (m)	95
6						1,3	1,07			Q_{esc} (m^3/s)	0,561	
x (m)	z (m)	H_{\max} (m)	P_{\max} (m)	H_{\min} (m)	P_{\min} (m)	H_{\max} (m)	P_{\max} (m)	H_{\min} (m)	P_{\min} (m)	Δp_{\max} (m)	Δp_{\min} (m)	
53,7	130,66	138,89	8,23	133,31	2,65	137,51	6,85	135,58	4,92	1,38	2,27	
107,5	128,9	141,68	12,78	130,53	1,63	138,93	10,03	135,17	6,27	2,75	4,64	
188,1	107,92	145,86	37,93	126,35	18,43	141,05	33,12	134,55	26,63	4,81	8,2	
268,7	90,51	150,04	59,53	122,17	31,66	143,15	52,64	133,94	43,43	6,89	11,77	
349,4	83,39	154,22	70,82	118	34,61	145,24	61,85	133,28	49,88	8,97	15,27	
430	76,28	158,4	82,12	113,83	37,55	147,32	71,04	132,66	56,38	11,08	18,83	
510,6	55,86	162,57	106,71	109,66	53,8	149,39	93,52	132,05	76,19	13,19	22,39	
537,5	49,1	163,96	114,86	108,64	59,54	150,07	100,97	131,85	82,75	13,89	23,21	

QA4.4. Quadro com os Valores das Pressões e Cargas Máximas e Mínimas Atingidas na Conduita Gravítica Antes da Entrada em Funcionamento da Válvula para Δt_f de 8s

Δt_f (s)		Sem Válvula				$Q_{\max \text{ turb}}$ (m^3/s)		μ (s)	Com Válvula		H_{taragem} (m)	95
8						1,3	1,07			Q_{esc} (m^3/s)	0,561	
x (m)	z (m)	H_{\max} (m)	P_{\max} (m)	H_{\min} (m)	P_{\min} (m)	H_{\max} (m)	P_{\max} (m)	H_{\min} (m)	P_{\min} (m)	Δp_{\max} (m)	Δp_{\min} (m)	
53,7	130,66	138,12	7,46	134,08	3,42	137,12	6,45	135,58	4,92	1,01	1,5	
107,5	128,9	140,14	11,24	132,07	3,17	138,14	9,24	135,17	6,27	2	3,1	
188,1	107,92	143,16	35,24	129,04	21,12	139,66	31,74	134,55	26,63	3,5	5,51	
268,7	90,51	146,19	55,68	126,02	35,51	141,18	50,66	133,94	43,43	5,02	7,92	
349,4	83,39	149,22	65,82	122,99	39,6	142,68	59,29	133,28	49,88	6,53	10,28	
430	76,28	152,24	75,96	119,97	43,69	144,18	67,9	132,66	56,38	8,06	12,69	
510,6	55,86	155,27	99,4	116,95	61,09	145,67	89,81	132,05	76,19	9,59	15,1	
537,5	49,1	156,27	107,17	116,26	67,16	146,17	97,07	131,85	82,75	10,1	15,59	

QA4.5. Quadro com os Valores das Pressões e Cargas Máximas e Mínimas Atingidas na Conduita Gravítica Antes da Entrada em Funcionamento da Válvula para Δt_f de 10s

Δt_f (s)	Sem Válvula		$Q_{\max \text{ turb}}$ (m^3/s)		μ (s)	Com Válvula		H_{taragem} (m)		95	Q_{esc} (m^3/s)
	H_{\max} (m)	P_{\max} (m)	H_{\min} (m)	P_{\min} (m)		H_{\max} (m)	P_{\max} (m)	H_{\min} (m)	P_{\min} (m)		
10			1,3	1,07							0,561
x (m)	z (m)	H_{\max} (m)	P_{\max} (m)	H_{\min} (m)	P_{\min} (m)	H_{\max} (m)	P_{\max} (m)	H_{\min} (m)	P_{\min} (m)	Δp_{\max} (m)	Δp_{\min} (m)
53,7	130,66	137,68	7,02	134,52	3,86	136,88	6,22	135,58	4,92	0,8	1,06
107,5	128,9	139,26	10,36	132,94	4,04	137,68	8,78	135,17	6,27	1,58	2,23
188,1	107,92	141,63	33,71	130,57	22,65	138,86	30,93	134,55	26,63	2,78	3,98
268,7	90,51	144	53,49	128,2	37,69	140,03	49,52	133,94	43,43	3,97	5,74
349,4	83,39	146,37	62,98	125,83	42,44	141,2	57,81	133,28	49,88	5,17	7,44
430	76,28	148,74	72,46	123,47	47,19	142,36	66,08	132,66	56,38	6,38	9,19
510,6	55,86	151,11	95,25	121,1	65,24	143,52	87,66	132,05	76,19	7,59	10,95
537,5	49,1	151,9	102,8	120,4	71,3	143,9	94,8	131,85	82,75	8	11,45



QA4.6. Representação das Variações de Pressão Máxima e Mínima quando se Recorre à Válvula

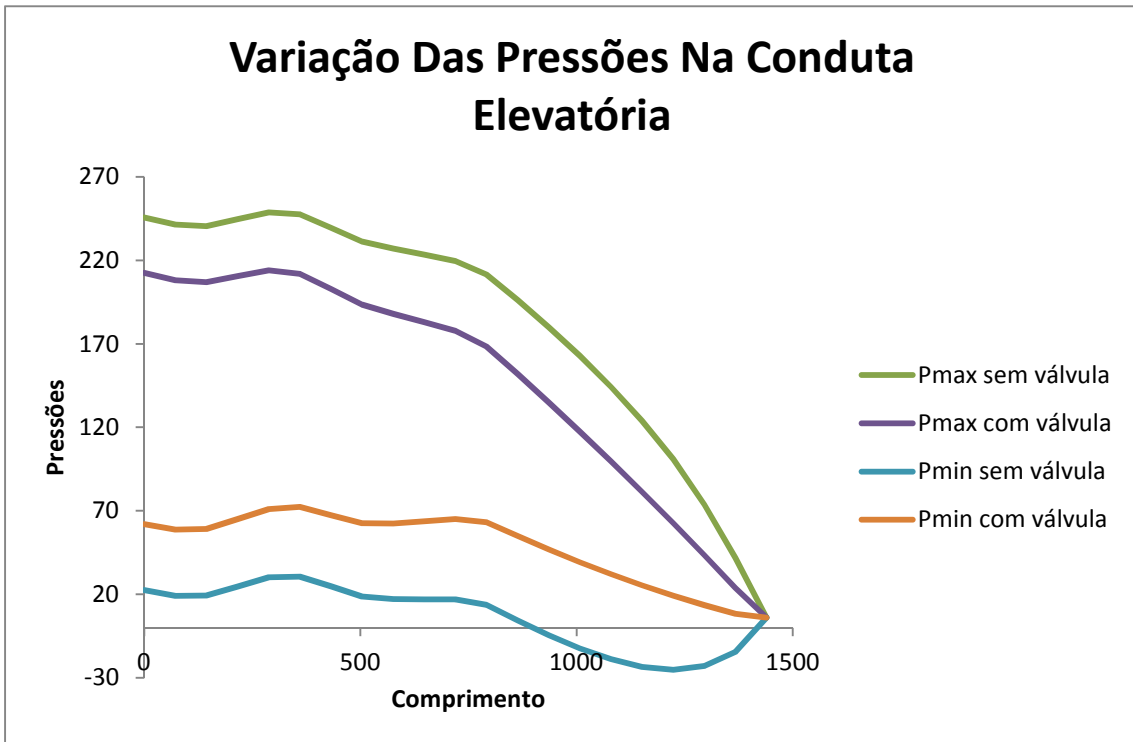
ANEXO 4.2

QA4.7. Quadro com os Valores das Pressões e Cargas Máximas e Mínimas Atingidas na Conduata Elevatória Antes da Entrada em Funcionamento da Válvula

Sem Válvula				Q_B (m ³ /s)	1,0381
				H_B (m)	140,6
x (m)	z (m)	H_{max} (m)	P_{max} (m)	H_{min} (m)	P_{min} (m)
0	66,9	312,65	245,706	89,508	22,568
71,98	70,9	312,18	241,32	89,978	19,118
143,95	71,2	311,65	240,469	90,518	19,34
215,93	66,4	311,03	244,59	91,142	24,7
287,91	61,7	310,32	248,613	91,864	30,16
359,89	62	309,49	247,447	92,706	30,666
431,86	69,1	308,51	239,39	93,692	24,75
503,84	76,2	307,36	231,158	94,854	18,649
575,82	79	306	226,965	96,233	17,197
647,79	80,9	304,37	223,457	97,881	16,966
719,77	82,8	302,41	219,615	99,867	17,074
791,75	88,5	300,02	211,546	102,283	13,81
863,72	101	297,08	196,102	105,256	4,28
935,7	113,5	293,41	179,934	108,96	-4,52
1007,68	126	288,78	162,794	113,646	-12,338
1079,66	138,5	282,81	144,32	119,678	-18,809
1151,63	151	274,96	123,969	127,605	-23,386
1223,61	163,5	264,39	100,899	138,275	-25,219
1295,59	176	249,78	73,78	153,034	-22,964
1367,56	188,5	230,15	41,651	174,076	-14,425
1439,54	199	205	6	205	6

QA4.8. Quadro com os Valores das Pressões e Cargas Máximas e Mínimas Atingidas na Conduta Elevatória Depois da Entrada em Funcionamento da Válvula

Com Válvula				$H_{taragem}$ (m)	147,63
				Q_{esc} (m ³ /s)	0,6
x (m)	z (m)	H_{max} (m)	P_{max} (m)	H_{min} (m)	P_{min} (m)
0	66,9	279,39	212,447	129,013	62,073
71,98	70,9	278,82	207,961	129,583	58,722
143,95	71,2	278,04	206,859	130,375	59,196
215,93	66,4	276,99	210,547	131,433	64,991
287,91	61,7	275,64	213,938	132,791	71,086
359,89	62	273,98	211,937	134,471	72,432
431,86	69,1	271,98	202,857	136,485	67,362
503,84	76,2	269,65	193,44	138,837	62,632
575,82	79	266,97	187,937	141,53	62,495
647,79	80,9	263,96	183,042	144,568	63,653
719,77	82,8	260,59	177,8	147,954	65,161
791,75	88,5	256,87	168,399	151,7	63,227
863,72	101	252,78	151,805	155,816	54,839
935,7	113,5	248,31	134,826	160,318	46,839
1007,68	126	243,43	117,442	165,229	39,245
1079,66	138,5	238,11	99,627	170,571	32,084
1151,63	151	232,35	81,355	176,375	25,384
1223,61	163,5	226,08	62,59	182,675	19,181
1295,59	176	219,42	43,422	189,513	13,515
1367,56	188,5	212,37	23,866	196,936	8,435
1439,54	199	205	6	205	6,000



QA4.9. Representação das Variações de Pressão Máximas e Mínimas Quando se Recorre à Válvula