

AVALIAÇÃO DO FUNCIONAMENTO E DIMENSIONAMENTO HIDRÁULICO DE CHAMINÉS DE EQUILÍBRIO EM APRO- VEITAMENTOS HIDROELÉTRICOS

JOÃO PEDRO MACEDO

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

Orientador: Professor Doutor Francisco Taveira Pinto

JUNHO DE 2012

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2011/2012

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 - 2011/2012- Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2011.*

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

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

Aos meus pais
aos meus irmãos

“O Homem é do tamanho dos seus sonhos.”

Fernando Pessoa

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Professor Doutor Francisco Taveira Pinto todo o apoio, disponibilidade, esforço e paciência sempre demonstrados ao longo de todo o trabalho.

Ao IHRH pelos recursos disponibilizados, em particular à Dona Esmeralda Miguel pela disponibilidade e prontidão em ajudar e, essencialmente, pelo trabalho invisível mas crucial para a realização deste trabalho.

À Professora Elsa Carvalho pela ajuda na realização deste trabalho. Sem o seu constante incentivo, estímulo e, muitas vezes, reprimendas, nada disto seria possível e se consegui concretizar este objetivo, em grande parte lhe devo. Muito, mas muito obrigado!

Ao Chico, Filipe, Hugo, João, Ricardo Ferreira e Ricardo Teixeira pela partilha de emoções, alegrias e tristezas, ao longo de todo o percurso universitário.

Aos amigos da opção de Hidráulica pelos excelentes momentos proporcionados e, acima de tudo, pelo grande espírito de entreajuda desenvolvido, com destaque para o Chico, Filipa, Toni, Luís, e Tânia.

A todos os restantes amigos que, por fora, sempre foram um grande suporte e ajuda nos momentos mais difíceis deste longo percurso e com os quais tenho o maior prazer em partilhar uma amizade.

Por fim, agradeço à minha família, Pais, Irmãos, Cunhadas e Sobrinhos pelo apoio e compreensão das minhas ausências. Em particular aos meus Pais por permitirem a concretização deste objetivo, com um trajeto muito difícil mas sempre com o maior apoio e incentivo, ao Tiago e ao Tomás por, mesmo sem o saberem, me darem imensa força, mesmo naqueles momentos em que me custava tanto ter que os deixar e aos meus irmãos, meus exemplos de vida, por tudo o que me ensinam e, acima de tudo, por tudo quanto representam para mim.

RESUMO

Considerando a importância que as chaminés de equilíbrio têm no amortecimento dos efeitos negativos decorrentes dos regimes transitórios ocorridos em circuitos hidráulicos sob pressão, este trabalho tem como objetivo estudar a oscilação em massa ocorrida numa chaminé de equilíbrio integrada num circuito hidráulico de um aproveitamento hidroelétrico, associando-a ao dimensionamento dessa mesma estrutura.

Para isso foi analisado o regime transitório de um circuito hidráulico de um aproveitamento hidroelétrico, o qual define o modo de funcionamento da chaminé de equilíbrio. Posteriormente são descritas as chaminés de equilíbrio e analisados os métodos que permitem conhecer o seu comportamento e definir as suas dimensões.

O método das diferenças finitas é aplicado a um caso de estudo, observando-se o comportamento da oscilação em massa ao longo do circuito hidráulico, com especial destaque para as alterações ocorridas no interior da chaminé de equilíbrio, nomeadamente a variação do seu nível de água, o qual permitirá um correto dimensionamento da estrutura.

Com a aplicação deste método pode-se aferir sobre a influência de diversos parâmetros característicos dos vários componentes do circuito hidráulico na oscilação em massa, como a área da chaminé, a perda de carga, o tempo de manobra e o comprimento, área e rugosidade da galeria em carga, em particular no comportamento da chaminé de equilíbrio.

Finalmente, são abordadas técnicas construtivas de chaminés de equilíbrio, que variam de acordo com a localização das mesmas, sejam estas superficiais ou subterrâneas, destacando-se estas últimas, para as quais é descrita uma das técnicas mais utilizadas, o *raise boring*.

PALAVRAS-CHAVE: Chaminé de Equilíbrio, Regime Transitório, Método das Diferenças Finitas, Raise Boring, Aproveitamentos Hidroelétricos

ABSTRACT

Given the value that surge tanks have in controlling the negative effects of transients occurring in pressurized hydraulic circuits, this work aims to study the mass oscillation occurred in a surge tank integrated in a hydraulic circuit of a hydroelectric power plant, connecting it to the design of that same structure.

Therefore, transients in a hydraulic power plant are studied, which defines the operating mode of the surge tank. In a further analysis, there is a description of surge tanks and an analysis of the methods that allow knowing its behavior and setting its dimensions.

The finite difference method is applied to a case study, observing the behavior of the mass oscillation along the hydraulic circuit, with particular emphasis on changes occurring within the surge tank, including the change in its water level, which will allow a proper design of the structure.

With this method we can assess the influence of various parameters of the various components of the hydraulic circuit on the mass oscillation in the behavior of the surge tank, such as the area of the surge tank, head loss, the operation time and the length, area and roughness of the tunnel.

Finally, building techniques of surge tanks are covered, which vary according to location of the tank, whether surface or underground. For the underground ones is described one of the most widely used techniques, the *raise boring*.

KEYWORDS: Surge Tank, Transients, Finite Difference Method, Raise Boring, Hydroelectric Power Plant

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. ÂMBITO E OBJETIVOS DO TRABALHO.....	1
1.2. ESTRUTURAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	2
2. FENÓMENO DO CHOQUE HIDRÁULICO EM APROVEITAMENTOS HIDROELÉTRICOS	5
2.1. O FENÓMENO DO CHOQUE HIDRÁULICO.....	5
2.1.1. CASOS DE MANOBRAS INSTANTÂNEAS	8
2.1.2. CASOS DE MANOBRAS RÁPIDAS	9
2.1.3. CASOS DE MANOBRAS LENTAS.....	10
2.1.4. DISPOSITIVOS UTILIZADOS PARA CONTROLO DO CHOQUE HIDRÁULICO.....	10
2.2. APROVEITAMENTOS HIDROELÉTRICOS.....	11
2.2.1. CRITÉRIOS DE CLASSIFICAÇÃO DOS APROVEITAMENTOS HIDROELÉTRICOS.....	11
2.2.2. CONSTITUIÇÃO DE UM APROVEITAMENTO HIDROELÉTRICO DE MÉDIA OU ALTA QUEDA.....	12
2.3. O FENÓMENO DO CHOQUE HIDRÁULICO EM APROVEITAMENTOS HIDROELÉTRICOS	13
3. DIMENSIONAMENTO DE CHAMINÉS DE EQUILÍBRIO	15
3.1. CHAMINÉS DE EQUILÍBRIO	15
3.1.1. CHAMINÉ DE EQUILÍBRIO A MONTANTE DA CENTRAL	17
3.1.2. CHAMINÉ DE EQUILÍBRIO A JUSANTE DA CENTRAL	19
3.1.3. TIPOS DE CHAMINÉS DE EQUILÍBRIO	20
3.1.3.1 CHAMINÉS DE EQUILÍBRIO SIMPLES.....	20
3.1.3.2 CHAMINÉS DE EQUILÍBRIO COM ORIFÍCIO OU ESTRANGULAMENTO NA BASE.....	20
3.1.3.3 CHAMINÉS DE EQUILÍBRIO DIFERENCIAIS OU JOHNSON.....	21
3.1.3.4 CHAMINÉS DE EQUILÍBRIO COM CÂMARAS	21
3.2. DIMENSIONAMENTO	22
3.2.1. NECESSIDADE DA INSTALAÇÃO DE UMA CHAMINÉ DE EQUILÍBRIO.....	22
3.2.2. ESTUDO DO MOVIMENTO.....	22
3.2.2.1 RELAÇÃO DA PERDA DE CARGA CONTÍNUA COM O REVESTIMENTO DA GALERIA	25
3.2.3. MÉTODO DAS DIFERENÇAS FINITAS	26
3.2.4. SIMPLIFICAÇÃO DO MÉTODO DAS DIFERENÇAS FINITAS.....	27

3.2.4.1 ANÁLISE DA SITUAÇÃO SEM PERDAS	30
3.2.5. CHAMINÉS DE EQUILÍBRIO DE SECÇÃO CONSTANTE	31
3.2.5.1. Manobra de fecho total e instantâneo, desprezando as perdas de carga.....	31
3.2.5.2. Introdução dos valores relativos	34
3.2.6.3. Manobras lentas de fecho parcial ou total, desprezando as perdas de carga.....	35
3.2.6. ESTABILIDADE DE CHAMINÉS DE EQUILÍBRIO.....	37
3.2.6.1. DEFINIÇÃO DO AMORTECIMENTO.....	37
3.2.6.2. AÇÃO DE OUTROS FATORES ALÉM DA PERDA DE CARGA NA GALERIA	39
3.2.7. CHAMINÉS DE EQUILÍBRIO COM ESTRANGULAMENTO.....	40
3.2.8. CHAMINÉS DE EQUILÍBRIO A JUSANTE DA CENTRAL.....	42
4. CASO DE ESTUDO	45
4.1. ENQUADRAMENTO GERAL DO APROVEITAMENTO	45
4.2. CARACTERÍSTICAS DO APROVEITAMENTO	46
4.2.1. CIRCUITO HIDRÁULICO	47
4.3. ESTUDO DA CHAMINÉ DE EQUILÍBRIO.....	48
4.3.1. CÁLCULO DA FASE DA ONDA.....	48
4.3.2. CRITÉRIO DE THOMA	48
4.3.3. ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DA CHAMINÉ DE EQUILÍBRIO PARA VÁRIOS CENÁRIOS.....	49
4.3.3.1. EFEITO DO TEMPO DE MANOBRA.....	50
4.3.3.2. EFEITO DA ÁREA TRANSVERSAL DA CHAMINÉ DE EQUILÍBRIO	54
4.3.3.3. EFEITO DO TIPO DE FECHO: PARCIAL OU TOTAL	56
4.3.3.4. EFEITO DAS CARACTERÍSTICAS DA GALERIA EM CARGA	57
4.3.3.5. EFEITO DA PERDA DE CARGA INICIAL.....	64
4.3.3.6. SÍNTESE DOS RESULTADOS.....	66
5. MÉTODO CONSTRUTIVO	69
5.1. INTRODUÇÃO	69
5.2. RAISE BORING.....	70
5.2.1. RAISE BORING CONVENCIONAL COM FURO-PILOTO.....	71
5.2.2. PROCEDIMENTOS DE EXECUÇÃO	72
6. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	79
BIBLIOGRAFIA	83

ÍNDICE FIGURAS

Figura 2.1 – Rotura e rebentamento de condutas por efeito do choque hidráulico (Covas, 2012)	5
Figura 2.2 – Exemplo de um sistema de adução gravítico.	7
Figura 2.3 - Evolução temporal da perturbação numa conduta gravítica (adaptado de Featherstone, 2001)	8
Figura 2.4 - Diagrama da envolvente de pressões para manobras instantâneas (Piqueiro, 2009)	9
Figura 2.5 – Diagrama da envolvente de pressões para manobras rápidas (Piqueiro, 2009).	9
Figura 2.6 – Diagrama da envolvente de pressões para manobras lentas (Piqueiro, 2009).	10
Figura 2.7 – Esquema típico de um Aproveitamento Hidroelétrico de Média ou Alta Queda (Proença, 2011)	12
Figura 2.8 – Aproveitamento Hidroelétrico de Crestuma-Lever com eclusa de navegação junto à margem direita (www.inag.pt)	13
Figura 2.9 – Rotura e rebentamento de condutas num aproveitamento hidroelétrico na Sibéria Oriental devido ao choque hidráulico (Covas, 2012).	14
Figura 3.1 – Circuito hidráulico de Venda Nova III com Chaminé de Equilíbrio a montante e jusante da central (Novos Projetos Hidroelétricos, EDP)	15
Figura 3.2 - Posicionamento da Chaminé de Equilíbrio consoante o circuito hidráulico (adaptado de Proença, 2011).	16
Figura 3.3 - Exemplo de Chaminé de Equilíbrio a Montante da Central (Elwa Hydroelectric Dam & Plant, EUA) (http://www.nps.gov/olym/naturescience/images/Elwha-dam.jpg).	17
Figura 3.4 – Sobrepressões máximas devidas ao choque hidráulico em condutas protegidas com chaminés de equilíbrio (adaptado de Ribeiro, 1971).	18
Figura 3.5 – Circuito hidráulico do Aproveitamento do Alto do Lindoso, com Chaminé de Equilíbrio a jusante da Central (<i>Large Dams in Portugal</i> , 1992).	19
Figura 3.6 – Esquema representativo de uma chaminé de equilíbrio simples.	20
Figura 3.7 – Esquema representativo de uma chaminé de equilíbrio com estrangulamento na base.	21
Figura 3.8 – Esquema representativo de uma chaminé de equilíbrio diferencial.	21
Figura 3.9 – Esquema representativo de uma chaminé de equilíbrio com câmaras.	21
Figura 3.10 – Esquema representativo de um circuito hidráulico e das variáveis a considerar.	23
Figura 3.11 – Fluxograma representativo do Método das Diferenças Finitas	27
Figura 3.13 - Variação do nível da água numa chaminé cilíndrica de secção constante, para manobras de fecho total e instantânea, desprezando as perdas de carga. (adaptado de Ribeiro, 1971)	33
Figura 3.12 – Definição de amortecimento (adaptado de Ribeiro, 1971)	38
Figura 6.1 – Diferentes perdas de carga localizadas no estrangulamento, conforme a direção do fluxo (adaptado de Lencastre, 1996)	42
Figura 6.2 – Esquema representativo de um circuito hidráulico com chaminé de equilíbrio a jusante de central e das variáveis e sentidos positivos a considerar.	Erro! Marcador não definido.
Figura 4.1 – Construção da barragem de betão do Aproveitamento do Caldeirão (EDP, 1992)	46
Figura 4.2 – Perfil longitudinal do circuito hidráulico (adaptado de EDP, 1992)	47
Figura 4.3 - Efeito do tempo de manobra na variação da amplitude da oscilação da água na chaminé para D=4,20m.	51
Figura 4.4 – Efeito do tempo de manobra na velocidade na galeria em carga para D=4,20m	51
Figura 4.5 – Efeito do tempo de manobra nas perdas de carga contínuas na galeria para D=4,20m.	52
Figura 4.6 - Efeito do tempo de manobra na variação da amplitude de oscilação de água na chaminé para D=9,50m.	53
Figura 4.7 – Efeito do tempo de manobra na velocidade na galeria em carga para D=9,50m.	53

Figura 4.8 – Efeito do tempo de manobra na variação das perdas de carga contínuas na galeria para D=9,50m.	54
Figura 4.9 - Efeito do tempo de manobra na variação da amplitude de oscilação da água na chaminé para D=9,50m.	55
Figura 4.10 - Efeito do tipo de fecho na variação do nível de água na chaminé.	56
Figura 4.11 - Efeito do comprimento da galeria em carga na variação da oscilação do nível de água na chaminé.	58
Figura 4.12 – Efeito do comprimento da galeria em carga na velocidade da água.	59
Figura 4.13 – Efeito do comprimento da galeria em carga na perda de carga contínua.	59
Figura 4.14 - Efeito da secção da galeria em carga na variação da amplitude de oscilação do nível de água na chaminé.	60
Figura 4.15 – Efeito da secção da galeria em carga na velocidade da água.	61
Figura 4.16 – Efeito da secção da galeria em carga nas perdas de carga contínuas	62
Figura 4.17 - Efeito da rugosidade da galeria em carga na variação do nível de água na chaminé.	63
Figura 4.18 – Efeito da rugosidade da galeria em carga na velocidade da água.	63
Figura 4.19 – Efeito da rugosidade da galeria em carga na perda de carga contínua.	64
Figura 4.20 - Efeito das perdas na galeria em carga na variação do nível de água na chaminé.	65
Figura 4.21 – Efeito das perdas de carga na galeria na velocidade da água.	65
Figura 4.22 – Perdas de carga em cenários considerando e desprezando as perdas de carga contínuas.	66
Figura 5.1 – Exemplo de uma chaminé de equilíbrio de betão, construída “ <i>in situ</i> ” (à esquerda), e uma chaminé pré-fabricada em aço (à direita).	69
Figura 5.2 – Chaminé de equilíbrio em construção.	70
Figura 5.3 – Figura ilustrativa das diferentes fases de ação do raise boring (adaptado de Fevereiro, 2011)	71
Figura 5.4 – Máquina de Raise Boring (Net)	72
Figura 5.5 – Exemplo de furo-piloto na aplicação da técnica de raise boring (adaptado de Díez, 2011)	73
Figura 5.6 – Exemplo de um tricóne de perfuração (Sandvik)	73
Figura 5.7 – Exemplo de uma cabeça de corte (Sandvik)	74
Figura 5.8 – Relação entre o diâmetro da cabeça de corte e a velocidade de rotação máxima (Díez, 2011).	74
Figura 5.9 – Exemplos de diferentes formas da cabeça de corte (Díez, 2011)	75
Figura 5.10 – Exemplo de um utensílio de corte que se instala na cabeça rotativa (Sandvik)	75
Figura 5.11 – Discos cortadores (Díez, 2011).	76
Figura 5.12 – Cortadores dentados (Díez, 2011).	76
Figura 5.13 – Cortador com inserções de rolo de metal (Díez, 2011).	76
Figura 5.14 – Exemplo dos diferentes espaçamentos entre os rolos de metal (Sandvik)	77

ÍNDICE TABELAS

Tabela 3.1 – Valores de rugosidade K_S para diferentes revestimentos (adaptado de Ribeiro, 1971) .	25
Tabela 3.2 - Valor máximo da oscilação e respetivo instante de ocorrência em função da duração da manobra, em valores relativos (Stucky, 1958).	36
Tabela 4.1 – Valores máximos e mínimos de variação do nível de água no interior da chaminé de equilíbrio para um diâmetro de 4,20m.	50
Tabela 4.2 - Valores máximos e mínimos de variação do nível de água no interior da chaminé de equilíbrio para um diâmetro de 4,20m.	52
Tabela 4.3 - Valores máximos e mínimos da variação do nível de água no interior da chaminé de equilíbrio para um tempo de manobra de 20s.	55
Tabela 4.4 – Valores máximos e mínimos da variação da oscilação do nível de água no interior da chaminé de equilíbrio para diferentes tipos de fecho.	56
Tabela 4.5 - Valores máximos e mínimos da variação da oscilação do nível de água no interior da chaminé de equilíbrio para diferentes comprimentos da galeria em carga.	57
Tabela 4.6 – Período de oscilação para diferentes comprimentos da galeria em carga.	57
Tabela 4.7 - Valores máximos e mínimos da variação da oscilação do nível de água no interior da chaminé de equilíbrio para diferentes secções da galeria em carga.	60
Tabela 4.8 – Período de oscilação para diferentes secções da galeria em carga.	61
Tabela 4.9 - Valores máximos e mínimos da variação da oscilação do nível de água no interior da chaminé de equilíbrio para diferentes coeficientes de rugosidade da galeria em carga.	62
Tabela 4.10 – Valores máximos e mínimos da variação da oscilação do nível de água no interior da chaminé de equilíbrio em cenários com e sem perdas.	64
Tabela 5.1 – Relação entre o diâmetro final do furo e o número de cortadores (Díez, 2011).	77
Tabela 5.2 – Custos da técnica do raise boring (Díez, 2011).	78
Tabela 5.3 – Rendimentos diários em função dos diâmetros de furação. (Díez, 2011).	78

SÍMBOLOS

a – celeridade da onda [m/s]

C_f - Parâmetro que traduz a influência da forma de fixação da conduta na propagação da onda de pressão

$C_A, C_B, C_C, C_D, C_{D1}, C_E, C_{E1}, C_F, C_{F1}$ – constantes auxiliares de cálculo

c – constante para definição do amortecimento

d – diâmetro do orifício [m]

D – diâmetro [m]

e – espessura [m]

E – módulo de elasticidade do material [MPa]

f – secção transversal da galeria em carga [m²]

F – secção transversal da chaminé de equilíbrio [m²]

F_{th} – secção transversal da chaminé de equilíbrio obtida pelo critério de Thoma [m²]

g – aceleração gravítica [m²/s]

H_b – queda bruta [m]

H – queda total [m]

j – perda de carga unitária [m/m]

K – módulo de elasticidade volumétrica [MPa]

K_S – coeficiente de rugosidade de Manning-Strickler [m^{1/3}s⁻¹]

L – comprimento [m]

L_{cf} – comprimento da conduta forçada [m]

m – constante para definição do amortecimento

P – perda de carga contínua [m]

p – pressão na conduta [m]

p_0 – pressão inicial na conduta [m]

Q – caudal [m³/s]

Q_T – caudal que passa na turbina [m³/s]

Q_0 – caudal inicial [m³/s]

R – perda de carga devida ao estrangulamento [m]

R_H – raio hidráulico [m]

t – tempo [s]

t_0 – tempo para definição do amortecimento [s]

t_h – tempo de aceleração do escoamento na conduta forçada [s]

T^* - período [s]

U – velocidade na conduta [m/s]

V – velocidade na chaminé de equilíbrio [m/s]

V_{cf} – velocidade na conduta forçada [m/s]

W – velocidade na galeria em carga [m/s]

W_0 – velocidade inicial na galeria em carga [m/s]

W_1 – velocidade na galeria em carga para o instante t [m/s]

W_2 – velocidade na galeria em carga para o instante $(t + \Delta t)$ [m/s]

Z – nível de água na chaminé de equilíbrio, medido a partir do nível estático [m]

Z^* - nível máximo de água na chaminé de equilíbrio [m]

CARACTERES GREGOS

μ – tempo de fase da onda [s]

τ – tempo de manobra [s]

ρ – massa volúmica

ν – coeficiente de Poisson

ΔH – sobrepresão/sobpressão na conduta

γ – peso volúmico

ζ – coeficiente de amortecimento

ABREVIATURAS

EDP – Eletricidade de Portugal

FCT – Faculdade de Ciências e Tecnologia de Lisboa

FEUP – Faculdade Engenharia da Universidade do Porto

IHRH – Instituto de Hidráulica e Recursos Hídricos

IST – Instituto Superior Técnico de Lisboa

1

INTRODUÇÃO

1.1. ÂMBITO E OBJETIVOS DO TRABALHO

A produção de energia hidroelétrica tem assumido, nas últimas décadas, um papel relevante na produção global de energia, tanto a nível nacional como mundial. A evolução nos sistemas de transmissão de energia a longas distâncias e a crescente necessidade de produção de energia a partir de fontes renováveis impulsionou a construção de grandes aproveitamentos.

O projeto de engenharia de um aproveitamento hidroelétrico exige um considerável volume de trabalho interdisciplinar. Nos circuitos hidráulicos constituintes destas instalações hidroelétricas, a adução de água é feita, geralmente, por galerias em carga que visam o máximo aproveitamento da queda disponível entre a tomada de água e central de produção. Funcionando sob pressão, estes órgãos devem ser dimensionados corretamente, prevendo os seus riscos estruturais convenientemente. Assim, torna-se crucial a análise dos regimes transitórios passíveis de ocorrência ao longo de todo o circuito.

A variação do caudal que passa pelas turbinas provoca uma variação na pressão e velocidade da massa de água que circula no circuito hidráulico. Este fenómeno, designado de choque hidráulico, pode ter graves consequências económicas, materiais e humanas. Consiste na propagação de uma onda de pressão como resultado de uma alteração do caudal a circular. A gravidade deste fenómeno é tanto maior quanto maior a rapidez da variação do caudal, ou seja, quanto mais rápida for a manobra efetuada que leva à variação do caudal e, igualmente, tanto maior quanto maior o comprimento das condutas sujeitas a esse fenómeno (Andrzejewski, 2009).

É neste contexto que surge a necessidade da existência das chaminés de equilíbrio. Estes órgãos têm como função principal amenizar o efeito do choque hidráulico. Esta função é conseguida diminuindo o comprimento de conduta sujeito ao regime transitório. As chaminés de equilíbrio são instaladas o mais próximo possível das turbinas diminuindo, assim, o comprimento de conduta passível de ser afetado pelo choque hidráulico. Normalmente, são instaladas na união entre a galeria em carga e a conduta forçada, fazendo com que apenas a conduta forçada fique sujeita às variações de pressão.

No restante troço do circuito, entre a albufeira e a chaminé de equilíbrio, o fenómeno que aí ocorre designa-se por oscilação em massa, e consiste num movimento de massa de água entre esses dois pontos do circuito. Este movimento é amortecido ao longo do tempo.

Por outro lado, as chaminés de equilíbrio assumem, também, a função de fornecer água às turbinas de modo a manter o seu funcionamento a potência constante. Isto é conseguido devido à capacidade de armazenamento de água que as chaminés possuem. Na realidade, as chaminés de equilíbrio são reservatórios de água em superfície livre, ligados ao circuito hidráulico.

As chaminés de equilíbrio estão, assim, sujeitas a grandes oscilações do nível de água no seu interior. Dessa forma, o seu dimensionamento está dependente da previsão dessas oscilações.

Neste trabalho pretende-se efetuar um estudo do funcionamento e consequente dimensionamento de uma chaminé de equilíbrio de secção constante, instalada num circuito hidráulico de um aproveitamento hidroelétrico, a montante da central.

A oscilação em massa é estudada através do método das diferenças finitas, baseado nas equações do movimento, nomeadamente a equação da conservação da quantidade de movimento e a equação da continuidade. Com a aplicação deste método conhece-se a variação do nível de água no interior da chaminé ao fim de um intervalo de tempo definido. Neste trabalho, este intervalo é de 10s, o qual permite um rigor elevado nos resultados obtidos (Stucky, 1958 e Ribeiro, 1971).

Outros métodos matemáticos, também referidos neste trabalho, permitem o conhecimento dos valores extremos da variação do nível de água no interior da chaminé, mas apresentam o inconveniente de não permitirem o conhecimento dessa mesma variação ao longo do tempo.

O dimensionamento de uma chaminé de equilíbrio simples consiste no conhecimento da sua secção transversal e da sua altura. A sua altura é dependente do conhecimento dos níveis de oscilação obtidos pela aplicação do método das diferenças finitas. Naturalmente, a altura deve ser superior ao nível máximo atingido pela água, de modo a evitar o transbordamento. No que respeita à definição da área transversal, esta é obtida pela aplicação do critério de Thoma, que dá como resultado uma área transversal mínima que garanta o amortecimento da oscilação ao longo do tempo.

A construção das chaminés de equilíbrio é, também, alvo de análise neste trabalho. Podendo ser instaladas à superfície ou em profundidade, a sua construção assume diferentes técnicas. A construção de uma chaminé à superfície consiste na aplicação das técnicas básicas de construção de uma estrutura de betão ou aço podendo, inclusivamente, ser pré-fabricadas e transportadas para o local de instalação. A construção de chaminés de equilíbrio subterrâneas assume destaque neste trabalho. Essa construção é feita recorrendo a uma técnica de perfuração da rocha envolvente chamada *raise boring*.

1.2. ESTRUTURAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação encontra-se organizada em 6 capítulos. Procurando a análise do funcionamento e os métodos de dimensionamento de uma chaminé de equilíbrio, é efetuada, em primeiro lugar, uma apresentação dos fenómenos que justificam a necessidade da instalação de chaminés de equilíbrio em circuitos hidráulicos de aproveitamentos hidroelétricos.

Assim, o capítulo 2 apresenta uma descrição do fenómeno do choque hidráulico associado a aproveitamentos hidroelétricos. É apresentada uma descrição teórica do fenómeno, uma exposição sobre aproveitamentos hidroelétricos, e uma relação entre estes dois itens.

O terceiro capítulo tem como objetivo dar uma apresentação teórica sobre chaminés de equilíbrio. Inicia-se com uma descrição pormenorizada deste tipo de órgãos e contém, ainda, a explicação teórica dos métodos de dimensionamento.

No quarto capítulo apresenta-se a aplicação prática dos métodos de dimensionamento apresentados no capítulo terceiro. Os métodos são aplicados ao caso de estudo aí apresentado, tendo por base o Aproveitamento Hidroelétrico do Caldeirão.

O capítulo quinto refere-se aos métodos construtivos. Nele são apresentadas as técnicas de construção utilizadas para chaminés superficiais e subterrâneas, com especial destaque para estas últimas, com a aplicação da técnica de *raise boring*.

Finalmente encerra-se esta dissertação com o sexto e último capítulo. Neste capítulo procura-se expor algumas conclusões obtidas pela análise dos resultados da aplicação dos métodos de dimensionamento e funcionamento ao caso de estudo descrito no quarto capítulo. Apresentam-se, ainda, sugestões de aperfeiçoamento do trabalho aqui realizado.

2

FENÓMENO DO CHOQUE HIDRÁULICO EM APROVEITAMENTOS HIDROELÉTRICOS

2.1. O FENÓMENO DO CHOQUE HIDRÁULICO

Os circuitos hidráulicos em que se processam escoamentos sob pressão estão sujeitos à ocorrência de regimes transitórios (regime variável que ocorre na transição entre dois regimes permanentes) durante os quais os valores da pressão e da velocidade da água, numa secção qualquer, são função do tempo (Martins, 2009). Este regime transitório resulta da alteração do escoamento que provoca o aparecimento de uma onda de pressão com aumentos (sobrepensões) ou diminuições (subpensões) da pressão ao longo da conduta, pondo em risco a sua integridade física e a dos dispositivos aí instalados. É a propagação desta onda de pressão (onda de choque), que é condicionada pela compressibilidade do líquido e pela elasticidade da conduta, que se dá o nome de choque hidráulico.

Numa conduta, o fecho ou abertura de válvulas e a interrupção do funcionamento de uma bomba ou turbina levam à alteração do caudal aí escoado. São precisamente estas as situações mais típicas que geram os valores mais extremos para o choque hidráulico. Aquando da propagação da onda de choque, a pressão na conduta pode atingir valores tão extremos que pode originar danos como a rotura das condutas ou danificação dos dispositivos instalados. A figura 2.1 mostra efeitos do choque hidráulico em condutas de abastecimento de água.



Figura 2.1 – Rotura e rebentamento de condutas por efeito do choque hidráulico (Covas, 2012)

A onda de pressão é caracterizada pela sua celeridade a , isto é, a velocidade de propagação do som no líquido contido na conduta e pela sua fase, tempo necessário para que a onda retorne à origem (Piqueiro, 2009). Os extremos da conduta funcionam como obstáculo à sua propagação: a onda propaga-se desde o obturador até encontrar um reservatório, onde se reflete e propaga no sentido contrário.

De acordo com Lencastre (1996), a manobra a efetuar nos dispositivos que provocará o choque hidráulico pode ser classificada conforme a sua duração, τ :

- Instantânea, caso o tempo de manobra, isto é, o tempo durante o qual se verifica a variação do caudal a circular na conduta, seja aproximadamente igual a zero ($\tau = 0$);
- Rápida, se o tempo de manobra for inferior à fase da onda de choque provocada ($\tau < \mu$);
- Lenta, se o tempo de manobra for superior à fase da onda de choque ($\tau > \mu$).

A fase da onda de choque corresponde a metade do período da onda de choque não amortecida, ou seja, o tempo necessário para que a onda retorne à origem, e é calculada através da seguinte expressão:

$$\mu = \frac{2L}{a} \quad (2.1)$$

em que L representa o comprimento da conduta e c a celeridade da onda (velocidade do som num líquido), que por sua vez é determinada por

$$a = \frac{\sqrt{\frac{K}{\rho}}}{\sqrt{1 + \frac{K D}{E e} C_1}} \quad (2.2)$$

em que K representa o módulo de elasticidade volumétrica do líquido, ρ a sua massa volúmica, E o módulo de elasticidade do material constituinte da conduta, D o seu diâmetro, e a sua espessura e C_1 representa a influência da forma de fixação da conduta na propagação da onda de pressão que, por sua vez, varia para as seguintes 3 situações, nas quais ν representa o coeficiente de Poisson do material da conduta:

Situação 1: conduta ancorada apenas na extremidade de montante,

$$C_1 = 1 - \frac{\nu}{2} \quad (2.3)$$

Situação 2: conduta ancorada contra qualquer deslocamento longitudinal,

$$C_1 = 1 - \nu^2 \quad (2.4)$$

Situação 3: conduta com juntas de expansão em todo o seu comprimento,

$$C_1 = 1 \quad (2.5)$$

Considere-se o exemplo de um sistema de adução gravítico, representado esquematicamente na figura 2.2, constituído por um reservatório ligado a uma conduta adutora dotada de uma válvula, uma manobra de fecho desta última provocará uma alteração no regime de escoamento (Featherstone, 2001).

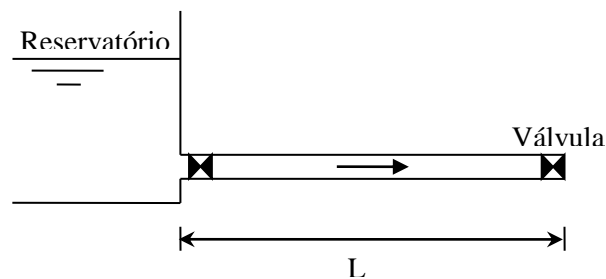


Figura 2.2 – Exemplo de um sistema de adução gravítico.

Num intervalo de tempo posterior ao fecho da válvula, a coluna líquida, inicialmente animada de velocidade constante U_0 e submetida a uma pressão p_0 na conduta, Figura 2.3 a), é imobilizada e comprime progressivamente, de montante para jusante, aumentando a pressão a que se encontra submetida. Verifica-se, assim, a existência de uma perturbação que se propaga sob a forma de onda de pressão com uma velocidade a no sentido do reservatório, Figura 2.3 b). Note-se que, no trecho da conduta ainda não atingido pela perturbação, o escoamento mantém as condições iniciais.

Após um intervalo de tempo $T=L/a$, após o fecho da válvula, a onda de pressão atinge o reservatório, momento em que toda a coluna líquida se encontra em repouso ($U_l=0$) e submetida a sobrepressões, Figura 2.3 c). Ao atingir o reservatório, que se encontra a uma pressão inferior, a onda é refletida, com a mesma velocidade a , mas no sentido contrário. Este movimento no sentido do reservatório para jusante faz com que a massa de água vizinha do reservatório fique submetida novamente a uma pressão inicial p_0 sendo, portanto, sujeita a uma descompressão. Cria-se, assim, um movimento da coluna líquida no sentido da válvula, Figura 2.3 d).

Quando a massa de água volta a atingir a válvula completa-se uma fase da onda, designada por μ , no instante $T=2L/a$, momento em que se encontra toda à pressão inicial p_0 e animada de velocidade U_0 , Figura 2.3 e). Surge, assim, um fenómeno inverso ao anteriormente descrito: dá-se, agora, uma descompressão no sentido do reservatório, Figura 2.3 f). Analogamente, quando a onda atinge o reservatório, no instante $T=3L/a$, o líquido em toda a conduta está em depressão e em repouso. Verifica-se novo desequilíbrio de pressões e dá-se novo escoamento, com aumento de pressão, no sentido da válvula (Costa, 2011). Consta-se, desta forma, a periodicidade do fenómeno, caracterizado por um ciclo de variações de pressão, como ilustra a figura 2.3.

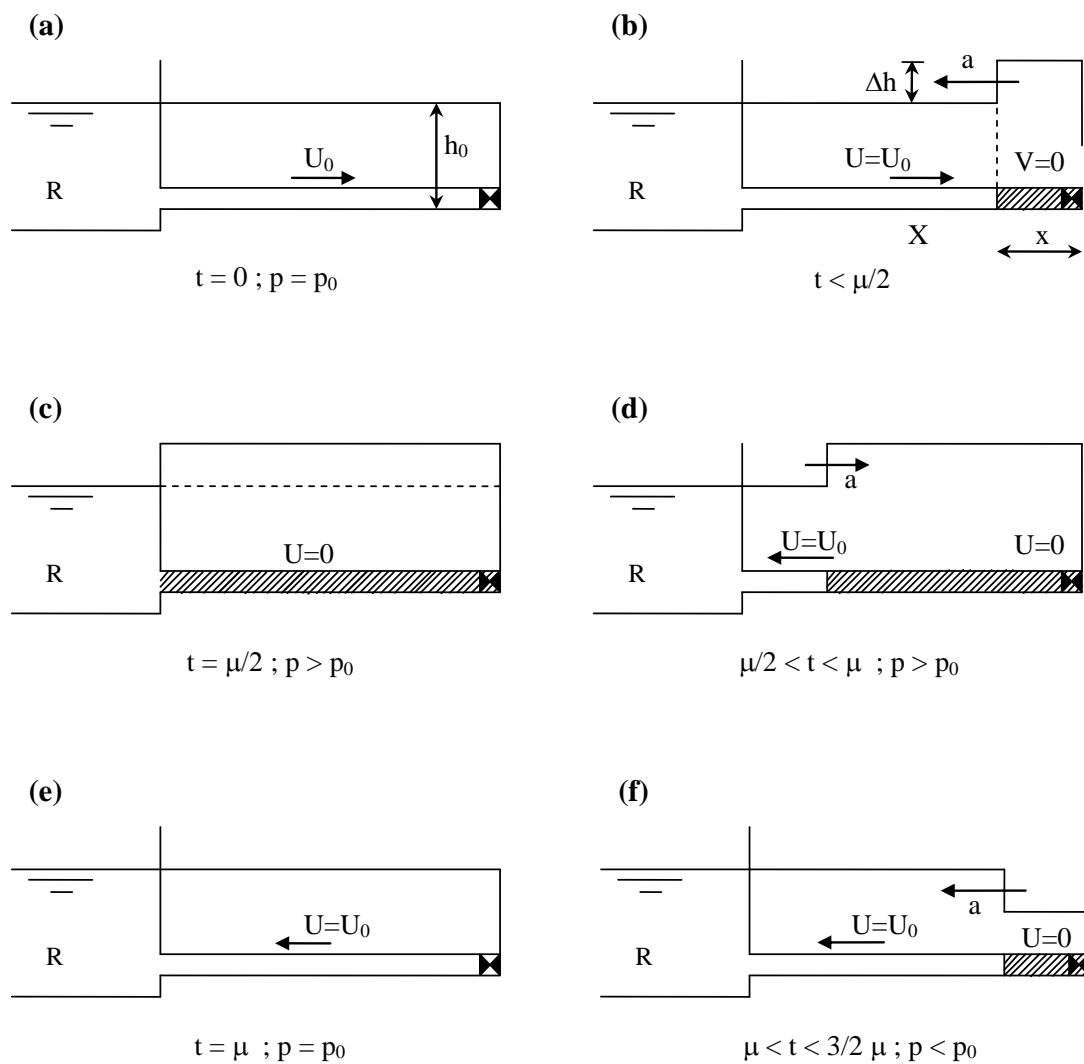


Figura 2.3 - Evolução temporal da perturbação numa conduta gravítica (adaptado de Featherstone, 2001)

2.1.1. CASOS DE MANOBRAS INSTANTÂNEAS

De acordo com a fórmula de Allievi-Joukowsky, o valor das sobrepressões ou subpressões para manobras instantâneas é dado, em função da variação da velocidade ΔU por,

$$\Delta H = \pm \frac{a \times \Delta U}{g} \quad (2.6)$$

em que o valor de ΔH pode assumir valores positivos ou negativos conforme se trate, respetivamente, de sobrepressões ou subpressões.

No que respeita ao diagrama da envolvente de pressões, no caso de manobras instantâneas, este assume uma forma retangular, como representado na figura 2.4.

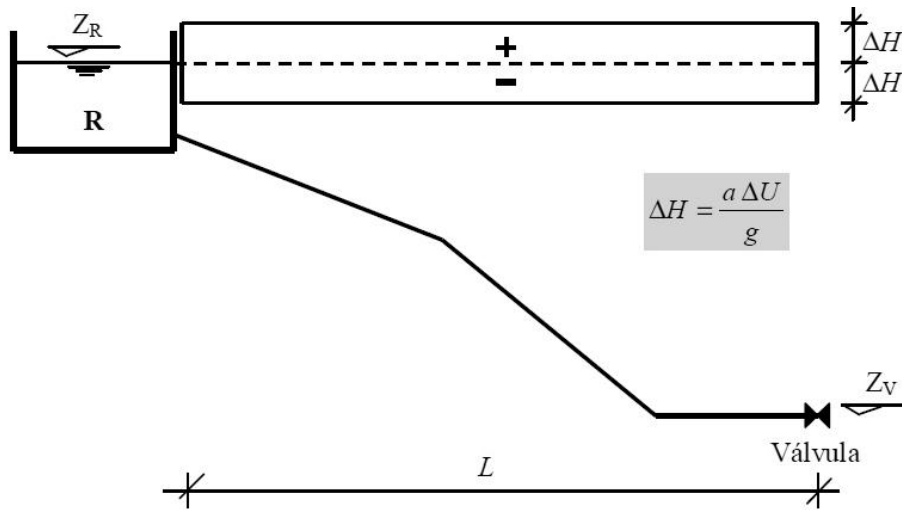


Figura 2.4 - Diagrama da envolvente de pressões para manobras instantâneas (Piqueiro, 2009)

2.1.2. CASOS DE MANOBRAS RÁPIDAS

No ponto anterior analisou-se a situação de uma manobra instantânea, isto é, com um tempo de manobra $\tau = 0$. No entanto, este caso é fisicamente impossível de ocorrer, uma vez que a variação de caudal ocorre, sempre, num tempo não nulo. Se esse tempo de manobra for inferior à fase da onda de choque classifica-se a manobra como rápida, como já foi referido (Lencastre, 2006).

Neste caso, o valor das sobrepressões e subpressões máximas, ΔH , é calculado pela fórmula utilizada no caso das manobras instantâneas, ou seja, pela fórmula de Allievi-Joukowski (equação 2.6).

A diferença entre as duas situações encontra-se no modo de variação da pressão. No caso de manobras rápidas, o valor da sobrepressão máxima não diminui mas parte da conduta a montante é aliviada, não ficando submetida às variações máximas. O diagrama da envolvente das pressões é composto por dois trechos: um a jusante, retangular, com valores máximos calculados pela fórmula de Allievi-Joukowski; outro, triangular, variando entre zero à entrada da conduta e ΔH a uma distância igual a $aT/2$ da entrada, figura 2.5.

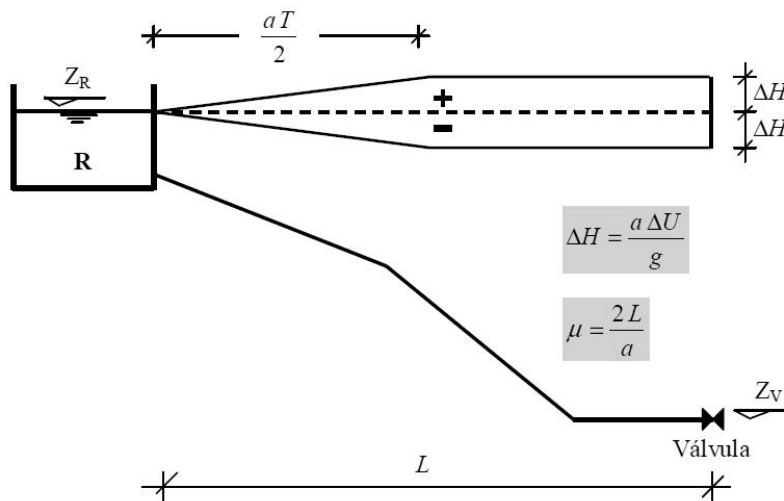


Figura 2.5 – Diagrama da envolvente de pressões para manobras rápidas (Piqueiro, 2009).

2.1.3. CASOS DE MANOBRAS LENTAS

No caso de manobras lentas, i.e., com um tempo de paragem superior à fase da onda, o pico da onda de pressão é amortecido. Nesta situação, o valor das sobrepressões e subpressões máximas é dado pela fórmula de Michaud, ou seja,

$$\Delta H = \pm \frac{a \times \Delta U \mu}{g \tau} \quad (2.7)$$

Verifica-se, assim, que um fecho lento permite uma diminuição do valor máximo da sobrepressão.

O diagrama da envolvente de pressões é sempre linear, crescendo desde zero à entrada da conduta até ao valor ΔH na secção mais jusante, como observado na figura 2.6.

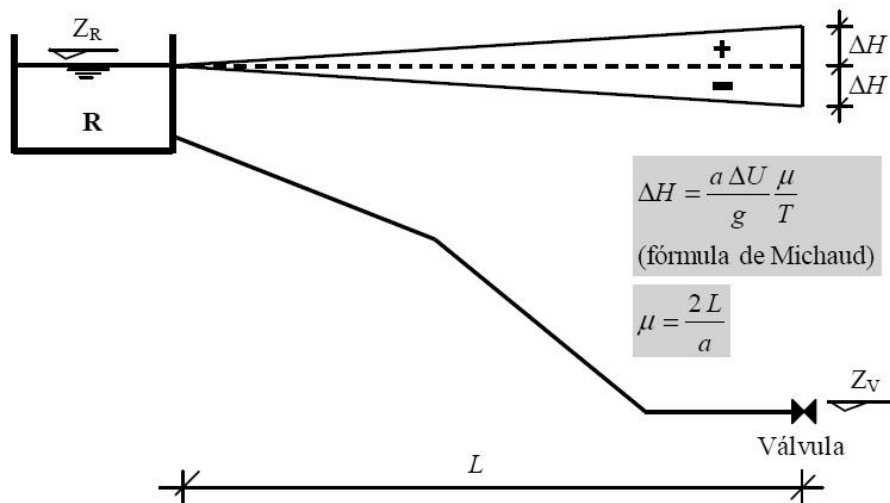


Figura 2.6 – Diagrama da envolvente de pressões para manobras lentas (Piqueiro, 2009).

2.1.4. DISPOSITIVOS UTILIZADOS PARA CONTROLO DO CHOQUE HIDRÁULICO

De modo a minimizar os efeitos negativos deste fenómeno são utilizados diversos dispositivos com o objetivo de amortecer a onda de choque provocada. De entre esses dispositivos destacam-se, pela sua maior aplicabilidade, os volantes de inércia, os reservatórios de ar comprimido, os reservatórios unidirecionais, as válvulas de descarga automática e, com aplicabilidade em aproveitamentos hidroelétricos, as chaminés de equilíbrio.

2.2. APROVEITAMENTOS HIDROELÉTRICOS

A produção de energia hidroelétrica tem assumido, nas últimas décadas, um papel relevante na produção global de energia, tanto a nível nacional como numa escala mundial. A evolução nos sistemas de transmissão de energia a longas distâncias e a crescente necessidade de produção de energia a partir de fontes renováveis impulsionou a construção de grandes aproveitamentos hidroelétricos.

Num aproveitamento hidroelétrico converte-se a energia potencial hidráulica em energia elétrica, aproveitando o desnível entre o curso de água ou reservatório e a central de produção onde se situam as turbinas e os geradores a elas associados.

2.2.1. CRITÉRIOS DE CLASSIFICAÇÃO DOS APROVEITAMENTOS HIDROELÉTRICOS

Os aproveitamentos hidroelétricos podem ser classificados de acordo com diferentes critérios como a sua capacidade de regularização, queda, desenvolvimento do circuito hidráulico ou potência.

No que respeita à capacidade de regularização, o aproveitamento poderá ter dois tipos de designação: aproveitamento a fio de água no caso de não se criar albufeira, situação em que o regime de aflúncias é que determina quando o aproveitamento trabalha a plena carga; ou aproveitamento com albufeira quando a barragem existente forma um reservatório que garante uma alimentação constante às turbinas, armazenando água nos períodos mais húmidos, permitindo turbinar nos períodos secos (Andrzejewski, 2009).

Relativamente à queda, a sua classificação varia conforme a sua dimensão: baixa queda para valores inferiores a 30 m de altura; média queda para valores entre os 30 e os 200 m de altura; e alta queda para valores superiores a 200 m.

Já no que diz respeito ao desenvolvimento do circuito hidráulico, os aproveitamentos podem ser classificados como central pé de barragem, quando são formadas por um circuito hidráulico muito curto, em que a central se encontra na vizinhança da barragem, ou de derivação extensa nos casos em que são formados por uma galeria em carga e/ou restituição mais ou menos extensas.

Finalmente, no que concerne à potência, a classificação varia entre grandes aproveitamentos, com potência superior a 10 MW, pequenos aproveitamentos, com potência inferior a 10 MW, mini-aproveitamentos, com potência a variar entre os 0,5 e 2 MW, e micro-aproveitamentos com potência inferior a 0,5 MW (Proença, 2011).

As chaminés de equilíbrio, tema deste estudo, são utilizadas em aproveitamentos com albufeira constituídos por circuitos hidráulicos com galerias em carga e/ou restituições extensas.

Assim, apresenta-se no ponto seguinte a constituição típica de aproveitamentos de média ou alta queda com circuitos hidráulicos de desenvolvimentos extensos, dos quais o caso mais comum é o que apresenta uma galeria em queda com comprimento significativo.

2.2.2. CONSTITUIÇÃO DE UM APROVEITAMENTO HIDROELÉTRICO DE MÉDIA OU ALTA QUEDA

Um aproveitamento hidroelétrico de média ou alta queda é constituído, geralmente, pelos seguintes órgãos: obra de retenção (barragem), circuito hidráulico (do qual fazem parte a tomada de água, galeria em carga, chaminé de equilíbrio, conduta forçada e restituição), central, órgãos de descarga e eventuais outros órgãos complementares. Tipicamente apresentam uma configuração do género da apresentada na figura 2.7.

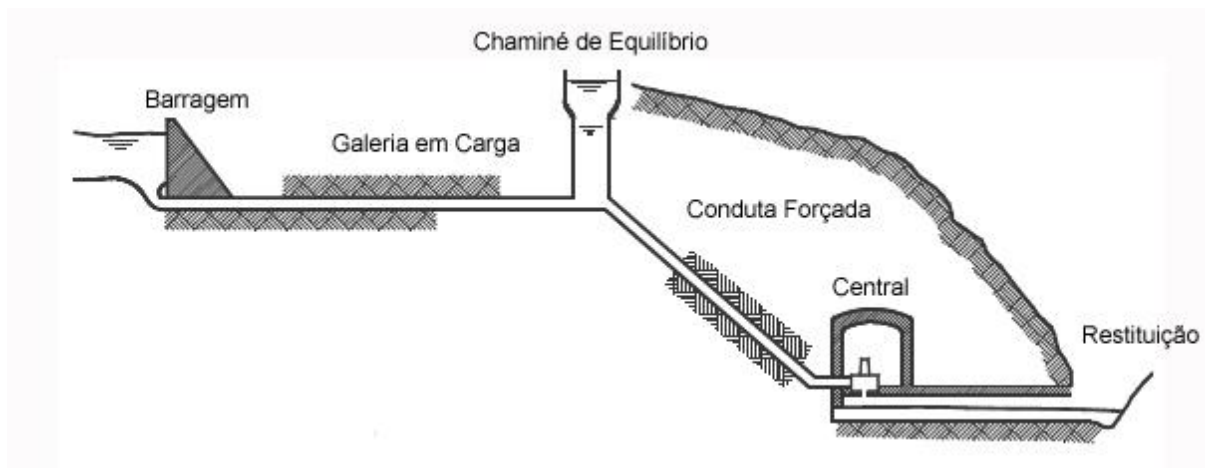


Figura 2.7 – Esquema típico de um Aproveitamento Hidroelétrico de Média ou Alta Queda (Proença, 2011)

A obra de retenção, normalmente constituída por uma barragem em aproveitamentos de dimensões consideráveis, pretende funcionar como um obstáculo ao normal curso da água, criando um reservatório natural (albufeira) com a função de elevar o nível da água aumentando o desnível até à central, permitindo, também, a regularização do caudal turbinado evitando, assim, ficar sujeito à aleatoriedade do caudal afluente a essa secção do rio.

O circuito hidráulico faz a ligação entre a tomada de água e a restituição. A tomada de água é uma estrutura de captação de água a partir da albufeira, levando-a até à galeria em carga, túnel que liga a tomada de água à chaminé de equilíbrio.

A função da chaminé de equilíbrio é, basicamente, amortecer os regimes transitórios resultantes da variação de caudal nas turbinas. Quando as turbinas abrem ou fecham ocorrem os fenómenos do choque hidráulico e de oscilação em massa, que terão que ser amortecidos pela chaminé de equilíbrio.

A conduta forçada transporta a água até à central elétrica através de condutas sob pressão. É ao longo desta conduta que ocorre o fenómeno do choque hidráulico. A central é o edifício onde se encontram alojadas as turbinas, alternadores e restante equipamento do sistema eletromecânico.

A restituição tem a função de devolver a água ao curso natural do rio.

No que respeita aos órgãos de descarga, os aproveitamentos são, normalmente, constituídos por descarregadores de cheias, auxiliares e de fundo. Estes têm como função permitir a passagem da água de montante para jusante da barragem sem passar pelo circuito hidráulico, em função de determinadas solicitações.

Como órgãos complementares podem considerar-se as eclusas de peixes e de navegação que permitem a passagem, respetivamente, de peixes e embarcações pelo aproveitamento, exemplificado na figura 2.8.



Figura 2.8 – Aproveitamento Hidroelétrico de Crestuma-Lever com eclusa de navegação junto à margem direita [1]

2.3. O FENÓMENO DO CHOQUE HIDRÁULICO EM APROVEITAMENTOS HIDROELÉTRICOS

Os circuitos hidráulicos de grandes aproveitamentos podem ser muito extensos pelo que estão, também, sujeitos aos efeitos do choque hidráulico. Qualquer alteração no caudal que circula nas turbinas resulta em alterações na pressão a montante que se traduzem na formação de uma onda de pressão em tudo idêntica ao fenómeno do choque hidráulico, atrás referido.

A massa de água que circula pelo circuito hidráulico tem uma certa velocidade à qual está associada uma determinada inércia de movimento. Com o fecho do distribuidor, a velocidade de escoamento transforma-se num aumento de pressão nos órgãos adutores, traduzido por uma onda de pressão que se desloca para montante até encontrar um reservatório onde a onda é, então, refletida no sentido contrário, propagando-se para jusante, diminuindo a pressão.

Por oposição, quando o distribuidor é aberto, a massa de água é acelerada, provocando, então, uma diminuição da pressão a que as condutas estão sujeitas.

Estas variações de pressão fazem com que se altere a queda disponível nas turbinas e, conseqüentemente, a vazão necessária para permitir uma produção com uma potência constante. Podem, ainda, atingir valores insuportáveis, com graves conseqüências materiais e humanas, pelo que têm que ser reduzidas. A figura 2.9 mostra os efeitos de um fecho de emergência brusco de uma válvula a jusante de uma turbina no aproveitamento hidroelétrico Saiano-Chuchenskaia na Sibéria Oriental em 2009. Neste tipo de aproveitamentos hidroelétricos, o mecanismo adotado para reduzir esses valores extremos é a chaminé de equilíbrio (Battiston, 2005).



Figura 2.9 – Rotura e rebentamento de condutas num aproveitamento hidroelétrico na Sibéria Oriental devido ao choque hidráulico (Covas, 2012).

3

DIMENSIONAMENTO DE CHAMINÉS DE EQUILÍBRIO

3.1. CHAMINÉS DE EQUILÍBRIO

As chaminés de equilíbrio são estruturas com a forma de reservatórios abertos, ou seja, com superfície livre, construídas em pontos estratégicos de circuitos hidráulicos sujeitas ao regime transitório, com a finalidade de reduzir os seus efeitos aquando de manobras intencionais ou não.

As suas funções passam, essencialmente, por amenizar os efeitos do choque hidráulico e, ao mesmo tempo, constituir uma reserva de água, com pouca inércia, para acelerar o escoamento aquando do arranque das turbinas (Andrzejewski, 2009).

O seu modo de funcionamento e os fenómenos associados variam conforme o seu posicionamento no circuito hidráulico: a montante da central, a jusante da central ou, simultaneamente, a montante e jusante, Figura 3.1.

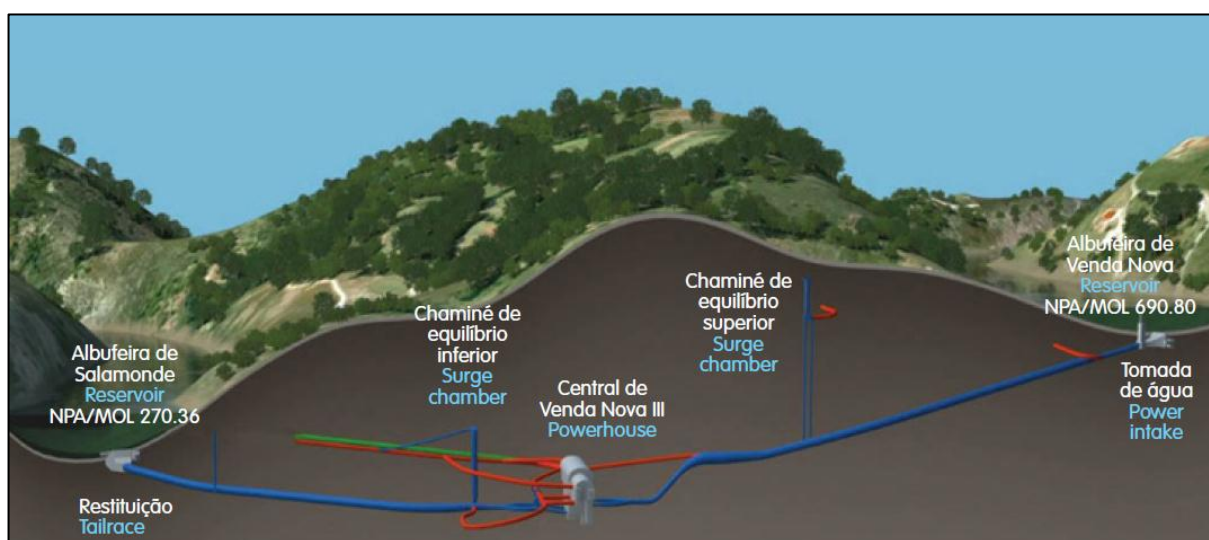


Figura 3.1 – Circuito hidráulico de Venda Nova III com Chaminé de Equilíbrio a montante e jusante da central (Novos Projetos Hidroelétricos, EDP)

Nos casos em que a galeria em carga é muito extensa, justifica-se a inclusão de uma chaminé de equilíbrio a montante da central, Figura 3.2.a). Já quando a restituição é extensa, o seu posicionamento no circuito hidráulico dá-se a jusante da central, Figura 3.2.b). No entanto, nos casos em que ambos os

constituintes são de dimensões extensas, surge a necessidade de construir duas chaminés de equilíbrio, tanto a montante como a jusante da central, Figura 3.2c) (Proença, 2011).

Em aproveitamentos com galeria em carga e conduta forçada muito extensas é comum a instalação de chaminés de equilíbrio o mais próximo possível das turbinas ou dos dispositivos passíveis de provocar o choque hidráulico. Esta proximidade surge na medida em que a onda de pressão resultante se propaga até encontrar um reservatório onde se possa dissipar. Assim, quanto maior for a proximidade da chaminé de equilíbrio às turbinas, menor será o comprimento da conduta sujeito aos efeitos do choque hidráulico. Na parte que não fica sujeita ao choque hidráulico ocorre uma oscilação em massa, isto é, uma troca de água entre a chaminé de equilíbrio e o reservatório que se encontra no outro extremo.

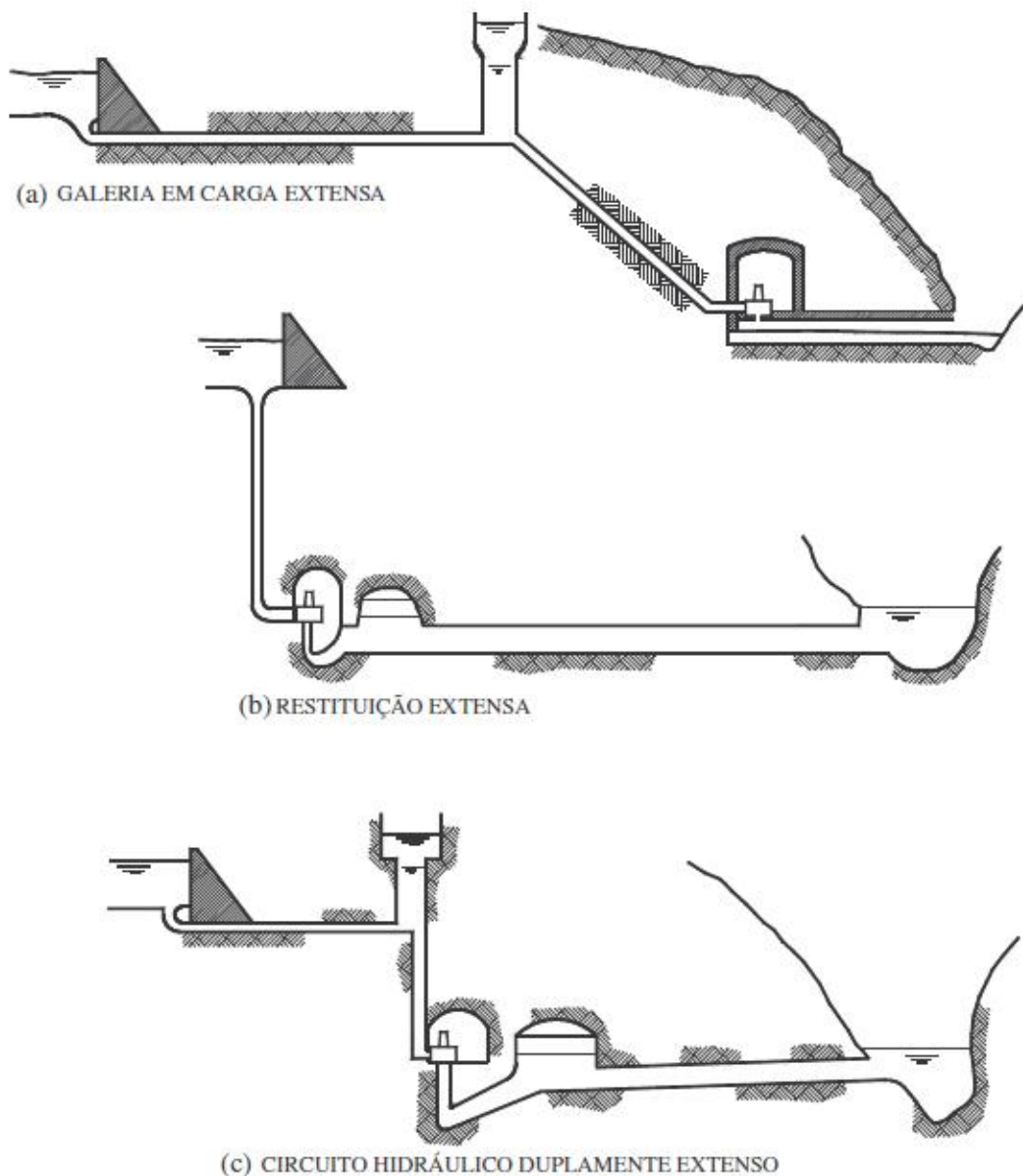


Figura 3.2 - Posicionamento da Chaminé de Equilíbrio consoante o circuito hidráulico (adaptado de Proença, 2011).

3.1.1. CHAMINÉ DE EQUILÍBRIO A MONTANTE DA CENTRAL

Nos casos em que o circuito hidráulico é constituído por uma galeria em carga muito extensa, a chaminé de equilíbrio é posicionada na junção entre a galeria e a conduta forçada, Figura 3.3. Nestas situações, a chaminé cumpre a dupla função de amenizar os efeitos do choque hidráulico e, ao mesmo tempo, fornecer às turbinas o volume de água necessário para que, aquando de um aumento rápido da descarga, a massa de água na conduta seja acelerada para equilibrar o sistema (Battiston, 2005).



Figura 3.3 - Exemplo de Chaminé de Equilíbrio a Montante da Central (Elwa Hydroelectric Dam & Plant, EUA) [2]

Aquando de uma manobra de fecho do distribuidor, cria-se uma sobrepressão que se desenvolve ao longo da conduta forçada até à chaminé de equilíbrio. A onda de pressão - choque hidráulico - divide-se entre a galeria em carga e a chaminé de equilíbrio proporcionalmente às suas secções, sendo que esta última tem, na maioria dos casos, uma secção muito maior que a da galeria.

Nos casos em que ocorra uma manobra instantânea de fecho do distribuidor, a galeria em carga fica sujeita a uma sobrepressão de valor muito reduzido. A sobrepressão na conduta forçada mantém-se com o valor ΔH .

Se a manobra não for do tipo instantânea, que é o que acontece na realidade, o valor da sobrepressão decresce desde a turbina até à chaminé de equilíbrio. Na galeria em carga o seu valor é nulo. Significa

isto que a galeria em carga não fica sujeita ao choque hidráulico, objetivo da chaminé de equilíbrio. A variação da sobrepressão na conduta forçada varia conforme se trate de uma manobra rápida ou lenta, como ilustra a figura 3.4 (Ribeiro, 1971),

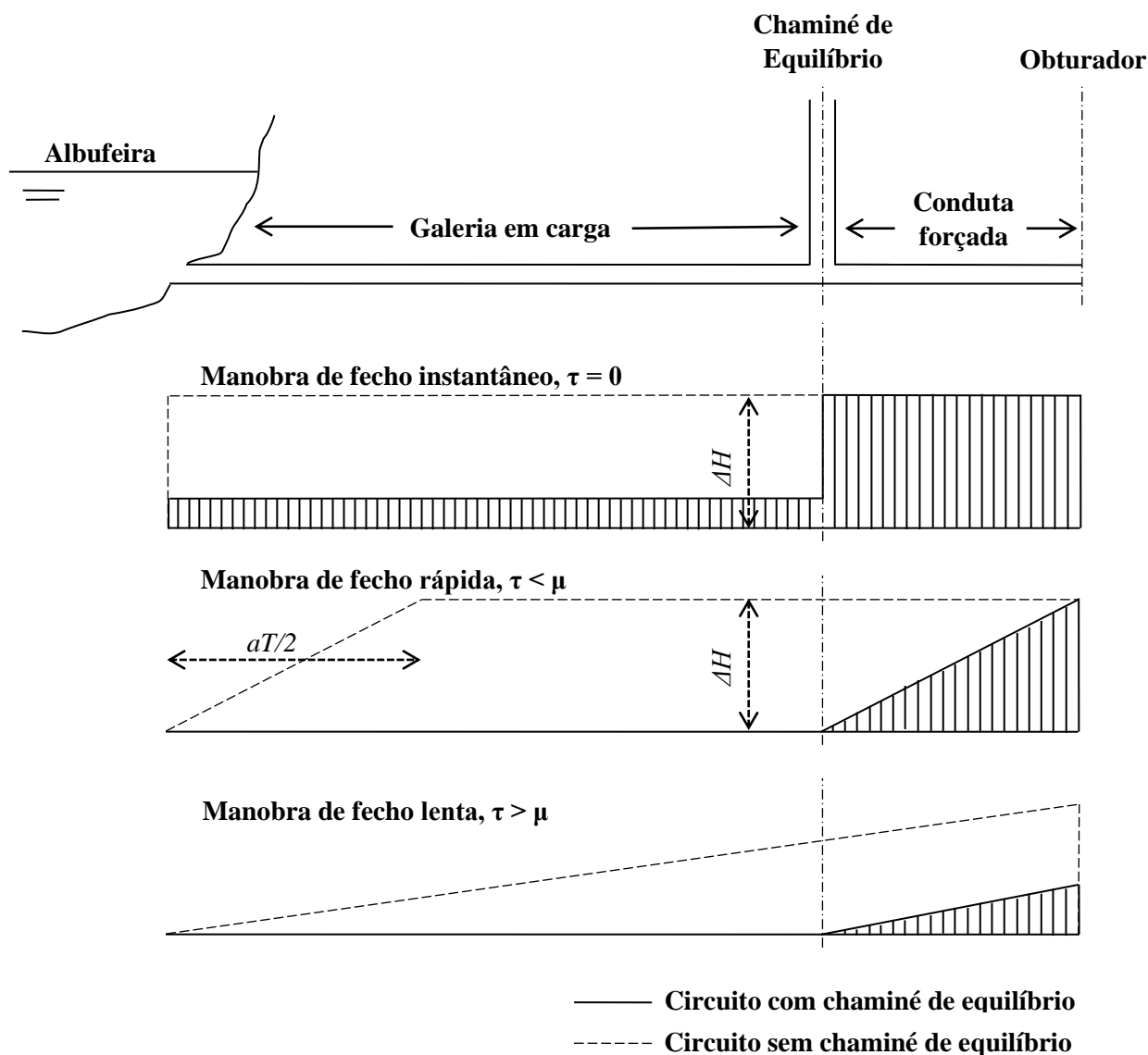


Figura 3.4 – Sobrepressões máximas devidas ao choque hidráulico em condutas protegidas com chaminés de equilíbrio (adaptado de Ribeiro, 1971).

Na parte do circuito a montante da chaminé de equilíbrio ocorre um fenómeno de oscilação em massa consequência da variação de energia cinética associada à variação do regime das turbinas. De facto, uma variação do caudal das turbinas corresponde a uma variação da energia cinética da água. Esta variação liberta (no caso de uma manobra de fecho) ou absorve (no caso de uma abertura) uma energia que a chaminé deve, respetivamente, armazenar ou fornecer. Isto é conseguido através de uma elevação ou abaixamento do nível de água. Ocorre, assim, uma oscilação de massa entre a chaminé de equilíbrio e um reservatório a montante, geralmente a albufeira criada pela barragem. O nível de água na

chaminé é reposto após uma série de oscilações que são amortecidas pelo atrito na galeria em carga e pelas perdas de carga adicionais que se provocam na chaminé.

Verifica-se, assim, que durante o regime variável a chaminé de equilíbrio divide a conduta em dois trechos que se comportam de forma diferente. No trecho desde a albufeira até à chaminé de equilíbrio ocorre, em geral, uma oscilação em massa. No segundo trecho, desde a chaminé de equilíbrio até à turbina, é mobilizada a energia elástica do fluido e da conduta: choque hidráulico.

Uma vez que as chaminés de equilíbrio constituem um reservatório de água, assumem, igualmente, a função de fornecer água às turbinas quando estas entram em funcionamento. A quantidade de água necessária durante estas alterações nas condições de funcionamento é garantida pela chaminé de equilíbrio. Dessa forma, a sua capacidade vai, naturalmente, depender da quantidade de água requerida no caso mais desfavorável, correspondente ao maior aumento do caudal turbinado. Este fornecimento mantém-se até que a água na conduta forçada atinja a velocidade necessária ao correto funcionamento das turbinas.

3.1.2. CHAMINÉ DE EQUILÍBRIO A JUSANTE DA CENTRAL

Quando a chaminé de equilíbrio se encontra a jusante da central, Figura 3.5, os fenómenos associados são, em tudo, similares aos do caso anterior. É igualmente vantajoso um posicionamento o mais próximo possível da turbina de modo a diminuir o comprimento de conduta sujeito às sobrepressões decorrentes do choque hidráulico.

Neste tipo de circuito, o choque hidráulico ocorre entre as turbinas e a chaminé de equilíbrio, passando o nível de água a oscilar entre a chaminé e o canal de fuga, perdendo carga durante o percurso por atrito com as paredes e diminuindo gradualmente a amplitude das oscilações.

No caso de abertura do distribuidor, a chaminé de equilíbrio atua amenizando os efeitos da sobrepressão gerada na conduta de sucção. Nos casos de fecho, produz-se uma queda de pressão no tubo de sucção. Nessa situação, a chaminé de equilíbrio tem, também, a função de alimentar o túnel de restituição evitando, assim, que o equipamento mecânico das turbinas seja afetado pela subpressão criada.

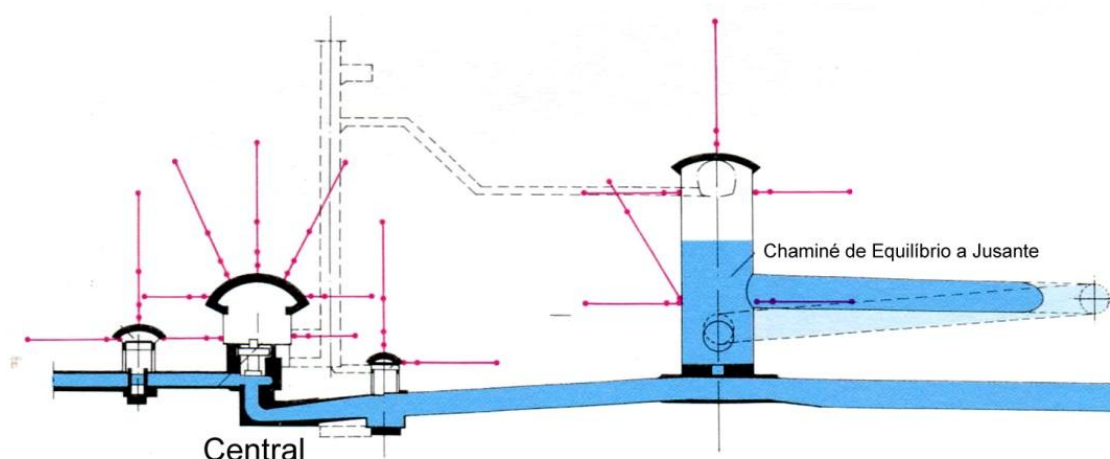


Figura 3.5 – Circuito hidráulico do Aproveitamento do Alto do Lindoso, com Chaminé de Equilíbrio a jusante da Central (*Large Dams in Portugal, 1992*).

3.1.3. TIPOS DE CHAMINÉS DE EQUILÍBRIO

A troca de água entre a chaminé de equilíbrio e a albufeira – oscilação em massa – é amortecida pelo atrito na galeria em carga. Este atrito provoca perdas de energia que são, no entanto, prejudiciais à exploração, diminuindo a queda disponível, pelo que se tenta minimizá-lo ao máximo. Assim, surge a necessidade de encontrar formas alternativas de aumentar o amortecimento conseguindo, ao mesmo tempo, diminuir o volume total. Uma dessas formas passa pela criação de perdas de energia na própria chaminé de equilíbrio através da alteração da sua forma. Além da forma mais simples, formando um cilindro de secção constante, as principais formas alternativas utilizadas são:

- Chaminés com orifício ou estrangulamento;
- Chaminés descarregadoras;
- Chaminés diferenciais ou Johnson;
- Chaminés com câmaras.

3.1.3.1 Chaminés de Equilíbrio Simples

Este tipo de chaminé assume, geralmente, a forma cilíndrica, figura 3.6. É aberta para o exterior e pode, em alguns casos, ter o eixo inclinado. É comum encontrar-se mais do que uma chaminé simples em galerias em carga.

O seu dimensionamento pressupõe, sempre, uma altura suficiente para evitar o extravasamento. A entrada é efetuada sem qualquer tipo de estreitamento. São pouco utilizadas por conduzirem a diâmetros maiores e conseqüentemente a maiores gastos.

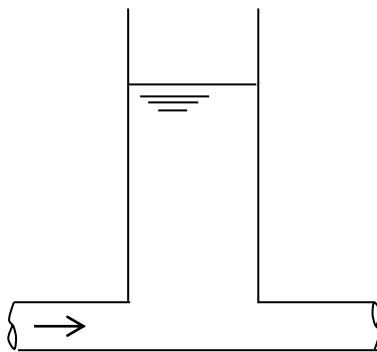


Figura 3.6 – Esquema representativo de uma chaminé de equilíbrio simples.

3.1.3.2 Chaminés de Equilíbrio com Orifício ou Estrangulamento na Base

Estas chaminés são caracterizadas pela existência de um estrangulamento na base, provocando uma perda de carga considerável, sendo a secção desse estrangulamento ou orifício menor que a secção da chaminé, figura 3.7. São indicadas para aproveitamentos com pequenas quedas, onde qualquer outro tipo de chaminé levaria a dimensões excessivas (Battiston, 2005).

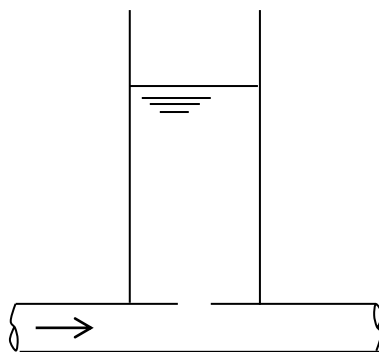


Figura 3.7 – Esquema representativo de uma chaminé de equilíbrio com estrangulamento na base.

3.1.3.3 Chaminés de Equilíbrio Diferenciais ou Johnson

De modo a aproveitar a água descarregada, desenvolveu-se um tipo de chaminés que permite combinar os dois referidos nos pontos anteriores, chaminés com estrangulamento e chaminés com descarregador. Este tipo de chaminé, designado por Chaminé Diferencial, é formado por um poço que descarrega numa chaminé envolvente podendo, ou não, estar em comunicação com a base do poço através de um orifício, Figura 3.8.

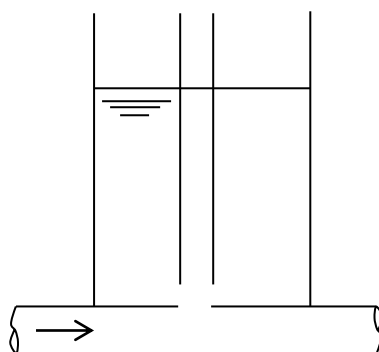


Figura 3.8 – Esquema representativo de uma chaminé de equilíbrio diferencial.

3.1.3.4 Chaminés de Equilíbrio com Câmaras

As chaminés de equilíbrio com câmaras garantem o amortecimento das oscilações através da perda de energia associada à expansão da água por galerias horizontais ao longo da chaminé. A chaminé é composta por uma ou mais galerias dispostas em andares, ligadas ao poço principal vertical, Figura 3.9. É comum aproveitar as galerias construídas anteriormente nas rochas para acessos construtivos ou temporários para desempenharem a função das câmaras horizontais (Andrzejewski, 2009).

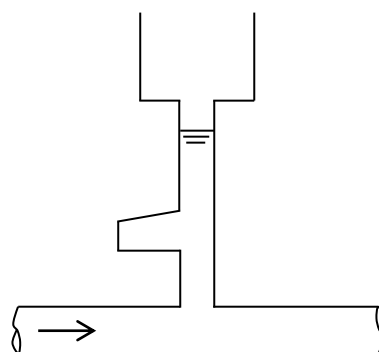


Figura 3.9 – Esquema representativo de uma chaminé de equilíbrio com câmaras.

3.2. DIMENSIONAMENTO

3.2.1. NECESSIDADE DA INSTALAÇÃO DE UMA CHAMINÉ DE EQUILÍBRIO

De acordo com o critério definido pela empresa brasileira Eletrobrás (2003), a indicação inicial para que não haja necessidade de instalar uma chaminé de equilíbrio é obtida a partir da relação entre o comprimento da conduta forçada e a queda bruta, expressa por,

$$\frac{L_{cf}}{H_b} \leq 5 \quad (3.1)$$

em que L_{cf} representa o comprimento da conduta forçada e H_b a queda bruta.

Se esta relação não se verificar, tem-se, assim, a indicação da eventual necessidade de instalar uma chaminé de equilíbrio. Esta necessidade é confirmada pelo critério da constante de aceleração do escoamento na conduta forçada, através da equação,

$$t_h = \frac{V_{cf} L_{cf}}{g H_b} \quad (3.2)$$

em que t_h representa o tempo de aceleração do escoamento na conduta forçada (s) e V_{cf} a velocidade do escoamento na conduta forçada (m/s).

Para valores de t_h inferiores a 3s, não há necessidade de instalação da chaminé de equilíbrio. Para valores compreendidos entre 3 e 6s, é recomendável a sua instalação, apesar de não ser imprescindível. Já para valores acima dos 6s, torna-se obrigatória a instalação da chaminé.

3.2.2. ESTUDO DO MOVIMENTO

No estudo do movimento é analisado o fenómeno da oscilação em massa, independente do choque hidráulico. Isto não corresponde à realidade, uma vez que a onda de pressão resultante do choque hidráulico, ao atingir a chaminé, não se reflete totalmente, decompondo-se em três diferentes ondas, função da secção dos diferentes órgãos por onde se decompõe: uma que retrocede pela conduta forçada, outra que sobe pela chaminé de equilíbrio e uma terceira que se propaga pela galeria em carga. No entanto, despreza-se este efeito do choque hidráulico devido aos reduzidos valores da secção da galeria comparativamente com a chaminé de equilíbrio e porque as sobrepressões aí existentes são, geralmente, baixas, fruto de manobras lentas (Manzanares, 1980).

O movimento é caracterizado por uma oscilação da massa de água consecutiva entre a chaminé e a albufeira. No interior da chaminé ocorre uma variação do nível de água, consequência dessa mesma oscilação. É esta variação que importa conhecer, de modo a corretamente dimensionar a estrutura. Assim, o objetivo passa por conhecer a amplitude máxima da oscilação. Supondo o exemplo de uma rejeição da carga fruto, por exemplo, de um fecho do distribuidor, o nível máximo atingido pela água no interior da chaminé, acima do nível estático, é alcançado quando a velocidade da água no túnel em direção à chaminé é igual a zero. De seguida, o movimento inverte o sentido, o nível de água na chaminé desce e verifica-se um movimento da massa de água em direção à albufeira. Este ciclo repete-se com um amortecimento da velocidade e dos níveis atingidos no interior da chaminé. Este amorteci-

mento é consequência da rugosidade da galeria em carga que provoca perdas de carga. Numa situação hipotética em que a galeria fosse completamente lisa, não existiria qualquer amortecimento e a oscilação corresponderia a um movimento sinusoidal (Schreiber, 1978).

As equações do movimento a considerar são a da Conservação da Quantidade de Movimento, que resulta da aplicação da lei de Newton, equação fundamental da dinâmica, à água na galeria em carga, supondo esta horizontal e, também, a equação da continuidade, que pretende exprimir a conservação dos caudais no ponto de inserção da chaminé.

As variáveis a considerar estão representadas na figura 3.10, que pretende esquematizar o circuito hidráulico de um aproveitamento com chaminé de equilíbrio a montante da central.

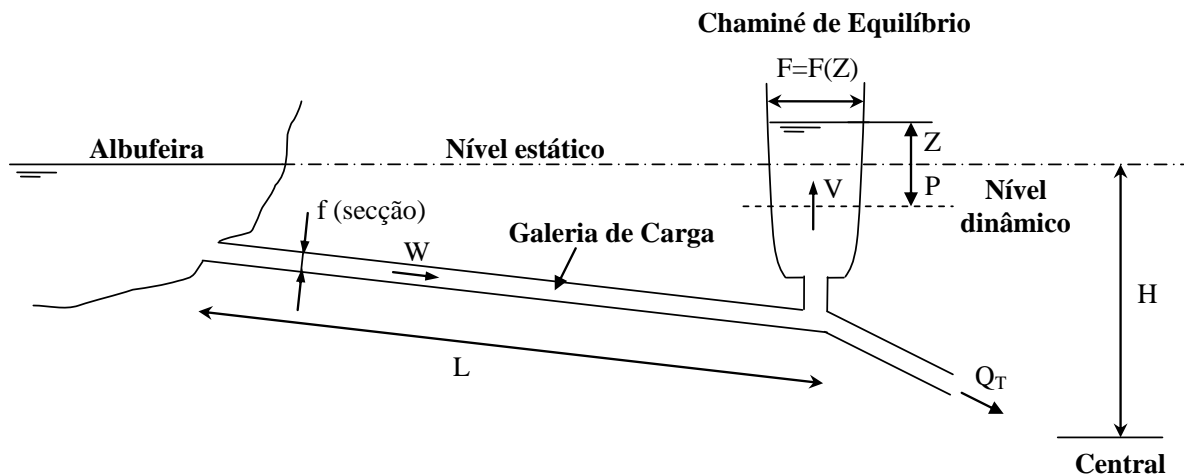


Figura 3.10 – Esquema representativo de um circuito hidráulico e das variáveis a considerar.

em que:

L – comprimento da galeria em carga [m]

f – secção da galeria em carga [m^2]

W – velocidade na galeria em carga [m/s]

P – perda de carga contínua na galeria em carga [m]

F – secção da chaminé de equilíbrio (função de Z) [m^2]

Z – nível da água no interior da chaminé de equilíbrio (medida a partir do nível estático) [m]

V – velocidade na chaminé de equilíbrio [m/s]

Q_T – caudal que passa nas turbinas [m^3/s]

t – tempo [s]

A equação da conservação da quantidade de movimento não é mais que a aplicação da lei de Newton, equação fundamental da dinâmica (força = massa x aceleração), ou seja,

$$-\gamma \cdot f \cdot (Z + P) = \frac{\gamma}{g} \cdot L \cdot f \cdot \frac{dW}{dt} \quad (3.3)$$

em que γ representa o peso volúmico da água.

Dividindo ambos os membros da equação por $\gamma \cdot f$, vem:

$$\frac{L}{g} \cdot \frac{dW}{dt} + Z + P = 0 \quad (3.4)$$

O valor das perdas de carga é obtido, experimentalmente, através de uma proporcionalidade com o quadrado da velocidade da água,

$$\frac{P}{W^2} = \pm \frac{P_0}{W_0^2} \Leftrightarrow P = \pm P_0 \left(\frac{W}{W_0} \right)^2 \quad (3.5)$$

No que diz respeito à equação da continuidade, esta relaciona os caudais no ponto de inserção da chaminé: o caudal que circula na galeria em carga divide-se pela chaminé de equilíbrio e pela conduta forçada. Esta continuidade é representada pela seguinte equação,

$$f \cdot W = F \cdot V + Q_T \quad (3.6)$$

em que Q_T representa o caudal nas turbinas e é função do tempo. É um valor normalmente conhecido, uma vez que é um dado imposto pela exploração do aproveitamento.

$$Q_T = Q_T(t) \quad (3.7)$$

Na chaminé, a velocidade é, por definição, a variação do nível da água com o tempo,

$$V = \frac{dZ}{dt} \quad (3.8)$$

Assim, a equação da continuidade, equação (3.6), pode se reescrita da seguinte forma,

$$f \cdot W = F \cdot \frac{dZ}{dt} + Q_T \quad (3.9)$$

3.2.2.1 Relação da perda de carga contínua com o revestimento da galeria

O valor da perda de carga P corresponde à soma de várias perdas de carga localizadas (grelhas, tomada de água, etc) com a perda de carga contínua ao longo da galeria em carga. O valor da perda de carga contínua na galeria, é definido a partir da fórmula de Manning-Strickler,

$$W = K_S \cdot R_H^{\frac{2}{3}} \cdot j^{\frac{1}{2}} \quad (3.10)$$

em que K_S representa o coeficiente de rugosidade da galeria, R_H o raio hidráulico da galeria e j a perda de carga unitária.

Assim, verifica-se que o acabamento da galeria em carga assume elevada importância na definição das perdas de carga contínuas, uma vez que estas são proporcionais à sua rugosidade como se mostra na seguinte equação,

$$P_{galeria} = j \cdot L = \frac{W^2}{K_S^2 \cdot R_H^{\frac{4}{3}}} \cdot L = \frac{Q^2}{K_S^2 \cdot R_H^{\frac{4}{3}} \cdot f^2} \cdot L \quad (3.11)$$

Ribeiro (1971) apresenta alguns valores para a rugosidade K_S de diferentes galerias de aproveitamentos construídas pela empresa SADE, conforme o seu revestimento, tabela 3.1:

Tabela 3.1 – Valores de rugosidade K_S para diferentes revestimentos (adaptado de Ribeiro, 1971)

Tipo de Revestimento	Valores de rugosidade K_S [$m^{1/3}s^{-1}$]
Conduas metálicas soldadas	98.4 – 96.6 – 94.6 – 83.9 e 74.3
Betão liso	93.3 – 92.8 – 91.5 – 91.4 – 86.7 – 84.9 – 84.6 – 79.3 – 74.6 – 72.8 – 72.6 – 61.7 – 55.7 e 55.2
Betão pré-esforçado	88.1 e 85.0
Betão e Gunite	87.4 – 84.9 e 83.2
Betão betuminoso	74.7
Alvenaria (já com musgos)	55.5
Terra e enrocamento	49.9

3.2.3. MÉTODO DAS DIFERENÇAS FINITAS

No desenvolvimento deste método matemático considera-se que o movimento numa chaminé de equilíbrio respeita a teoria da coluna rígida, isto é, é analisada a oscilação em massa. Para um aproveitamento com uma constituição típica, e chaminé de equilíbrio simples a montante da central, como apresentado na figura 2.6, a oscilação da massa de água ocorre entre a chaminé de equilíbrio e o reservatório a montante (albufeira).

O dimensionamento ou verificação do funcionamento de Chaminés de Equilíbrio através do Método das Diferenças Finitas consiste, basicamente, na resolução passo-a-passo das equações da conservação da quantidade de movimento e da continuidade, através da transformação dos operadores diferenciais dt , dZ e dW , em diferenças finitas Δt , ΔZ e ΔW . Estas transformações permitem transformar as equações (3.4) e (3.6) nas seguintes, respetivamente,

$$\frac{L}{g} \cdot \frac{\Delta W}{\Delta t} + Z_m + P_m = 0 \quad (3.12)$$

$$f \cdot W = F \cdot \frac{\Delta Z}{\Delta t} + Q_{Tm} \quad (3.13)$$

A aplicação do método consiste em, com o auxílio destas equações, determinar o nível de água no interior da chaminé de equilíbrio, Z , e a velocidade da água na galeria, W , do sistema no instante $(t + \Delta t)$, conhecidos esses mesmos parâmetros no instante t , de acordo com o fluxograma apresentado na figura 3.11.

Arbitrando a velocidade no instante $(t + \Delta t)$, W_2 , pode-se, então, calcular a velocidade média no intervalo Δt . Depois, resolve-se a equação (3.13), trabalhando apenas com valores médios da velocidade e do caudal. A resolução desta equação permite obter um primeiro valor de ΔZ , que será, posteriormente confirmado. Com o valor de ΔZ obtido a partir da resolução da equação (3.13), calcula-se o valor de Z_2 , nível da água na chaminé após o intervalo Δt , e o respetivo valor médio Z_m .

Parte-se, de seguida, para a resolução da equação (3.12), com os valores médios de Z e P . O valor de P_1 é conhecido, calculado pela aplicação da fórmula de Manning-Strickler, enquanto que o valor P_2 é obtido pela aplicação da equação (3.5). Conhecidos estes dois valores, facilmente se obtém o respetivo valor médio. Resolvida a equação (3.12) em ordem à incógnita ΔW , obtém-se novo valor para a velocidade média que deve corresponder ao valor inicialmente arbitrado. Caso essa igualdade se verifique, está, assim, verificado o valor obtido para ΔZ e, conseqüentemente, o valor de Z_2 , que corresponde ao nível da água na chaminé no instante $(t + \Delta t)$. Este procedimento dever-se-á repetir para os intervalos seguintes, permitindo um conhecimento pormenorizado da variação do nível da água no interior da chaminé de equilíbrio, a qual poderá ser representada por um gráfico para melhor compreensão.

A precisão deste método é tanto maior, quanto menor for o intervalo de tempo analisado. Se esse valor rondar os 5 a 10s, os resultados obtidos são bastante exatos (Ribeiro, 1971).

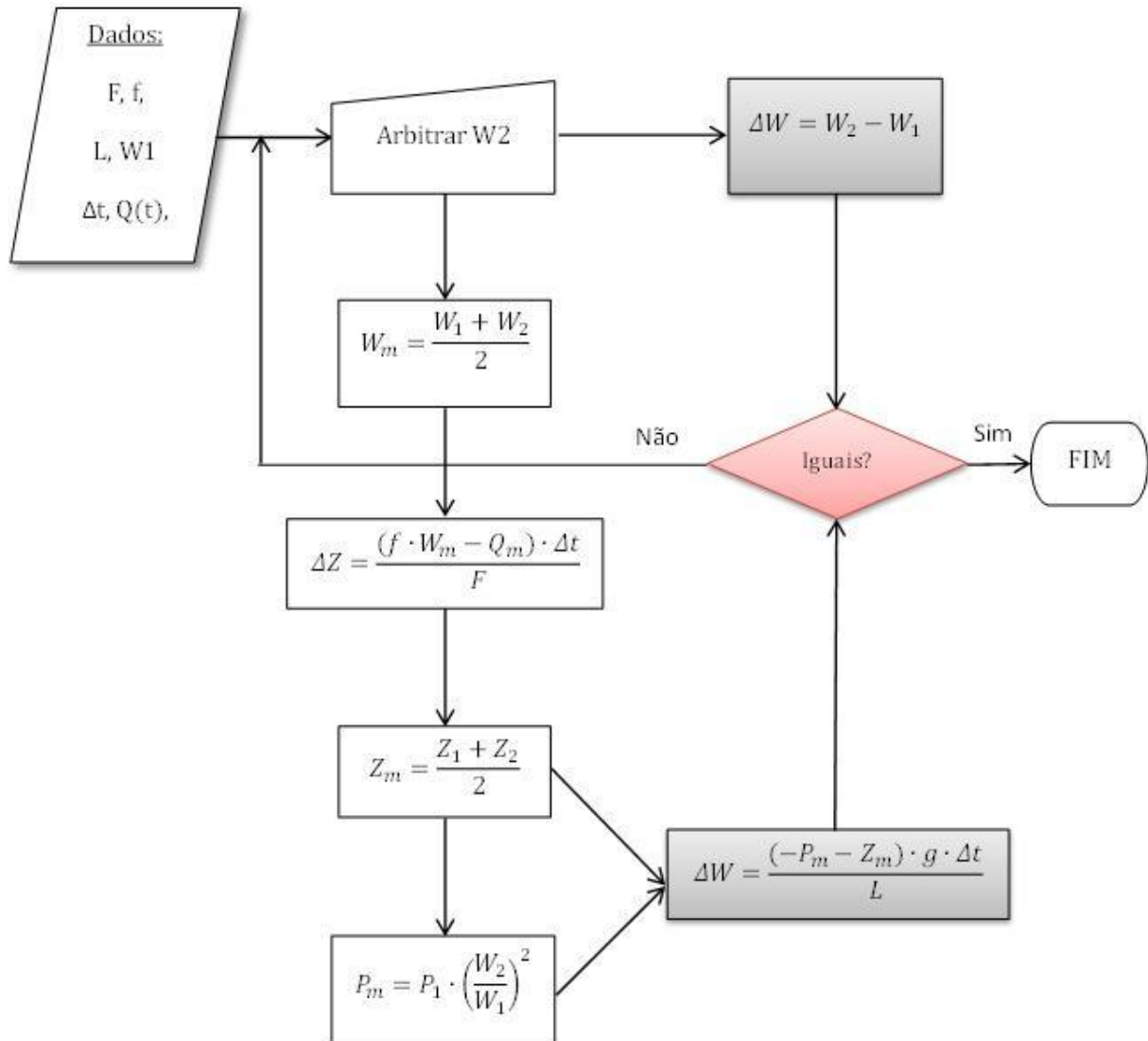


Figura 3.11 – Fluxograma representativo do Método das Diferenças Finitas

3.2.4. SIMPLIFICAÇÃO DO MÉTODO DAS DIFERENÇAS FINITAS

O Método das Diferenças Finitas apresenta, efetivamente, uma precisão bastante aceitável, e permite, de forma fácil, conhecer o movimento oscilatório do nível da água dentro da chaminé de equilíbrio. No entanto, apresenta como principal desvantagem a morosidade do seu processo, consequência da necessidade de proceder a inúmeras iterações para cada um dos intervalos de tempo a considerar. Dessa forma, surge a importância de simplificar o processo de modo a suprimir as iterações e a necessidade de arbitrar constantemente uma velocidade W_2 até que iguale a velocidade calculada.

Com base no método das diferenças finitas e das equações fundamentais associadas ao movimento oscilatório, foi desenvolvida, no âmbito deste trabalho, uma simplificação do processo iterativo.

Este novo processo tem como base a equação que relaciona os caudais inicial e final com a sua variação, conjugada com a equação fundamental do movimento (equação 3.12) obtendo-se quatro constantes, como se demonstra no procedimento de cálculo apresentado de seguida:

$$W_2 = W_1 + \Delta W \quad (3.14)$$

Considerando, pela equação (3.12), ΔW definido por:

$$\Delta W = -\frac{g \cdot \Delta t}{L} (Z_m + P_m) \quad (3.15)$$

É possível reescrever a equação (3.14) como:

$$W_2 = W_1 - \frac{g \cdot \Delta t}{L} (Z_m + P_m) \quad (3.16)$$

Atendendo ao cálculo do valor médio das perdas de carga (equação 3.5) e do valor médio de Z, vem:

$$W_2 = W_1 - \frac{g \cdot \Delta t}{L} \left(\frac{Z_1 + Z_2}{2} + \frac{P_0}{W_0^2} \cdot W_m \cdot |W_m| \right) \quad (3.17)$$

Pela equação de Manning-Strickler, as perdas de carga podem ser definidas por:

$$P_0 = \frac{W_0^2}{K_S^2 \cdot R_H^{\frac{4}{3}}} \cdot L \quad (3.18)$$

Por outro lado,

$$Z_m = \frac{Z_1 + Z_2}{2} = \frac{Z_1 + Z_1 + \Delta Z}{2} = Z_1 + \frac{\Delta Z}{2} \quad (3.19)$$

Substituindo (3.18) e (3.19) na equação (3.17), resulta,

$$W_2 = W_1 - \frac{g \cdot \Delta t}{L} \left(Z_1 + \frac{\Delta Z}{2} + \frac{L}{K_S^2 R^{4/3}} \cdot \frac{W_1 + W_2}{2} \cdot \left| \frac{W_1 + W_2}{2} \right| \right) \quad (3.20)$$

Pela equação (3.13) obtém-se,

$$\Delta Z = \frac{\Delta t}{F} (f \cdot W - Q_{Tm}) \quad (3.21)$$

Substituindo ΔZ na equação (3.20) vem,

$$W_2 = W_1 - \frac{g \cdot \Delta t}{L} \left(z_1 + \frac{1}{2} \cdot \left(f \cdot \frac{W_1 + W_2}{2} - Q_{Tm} \right) \cdot \frac{\Delta t}{F} \right) - \frac{g \cdot \Delta t}{4 K_S^2 R^{4/3}} \cdot (W_1 + W_2) |W_1 + W_2| \quad (3.22)$$

ou, ainda,

$$W_2 = W_1 - \frac{g \cdot \Delta t \cdot Z_1}{L} - \frac{g \cdot \Delta t^2}{2 L F} \cdot \left(f \cdot \frac{W_1 + W_2}{2} - Q_{Tm} \right) - \frac{g \cdot \Delta t}{4 K_S^2 R^{4/3}} \cdot (W_1 + W_2) |W_1 + W_2| \quad (3.23)$$

Daqui resultam quatro constantes:

$$C_A = - \frac{g \cdot \Delta t}{L} \quad (3.24)$$

$$C_B = - \frac{g \cdot \Delta t^2 \cdot f}{4 L F} \quad (3.25)$$

$$C_C = \frac{g \cdot \Delta t^2 \cdot Q_{Tm}}{2 L F} \quad (3.26)$$

$$C_D = - \frac{g \times \Delta t}{4 K_S^2 R_H^{4/3}} \quad (3.27)$$

Introduzindo estas constantes na equação dos caudais vem que,

$$W_1 + C_A Z_1 + C_B (W_1 + W_2) + C_C \pm C_D \times (W_1 + W_2)^2 - W_2 = 0 \quad (3.28)$$

$$\Leftrightarrow W_1 (1 + C_B) + (C_A Z_1 + C_C) \pm C_D W_1^2 \pm 2 C_D W_1 W_2 \pm C_D W_2^2 - W_2 + C_B W_2 = 0 \quad (3.29)$$

$$\Leftrightarrow \pm C_D W_2^2 + \underbrace{(\pm 2 C_D W_1 + C_B - 1)}_{C_E} W_2 + \underbrace{(W_1 (1 + C_B) + C_A Z_1 + C_C \pm C_D W_1^2)}_{C_F} = 0 \quad (3.30)$$

O que se pode representar como uma equação do segundo grau, com a incógnita W_2 , facilmente resolúvel através da fórmula resolvente:

$$\Leftrightarrow W_2 = \frac{-C_E \pm \sqrt{C_E^2 - 4 C_D \times C_F}}{2 D}, \quad \text{se } W_1 + W_2 \geq 0 \quad (3.31)$$

$$\Leftrightarrow W_2 = \frac{-C_{E1} \pm \sqrt{C_{E1}^2 - 4 C_{D1} \times C_{F1}}}{2 C_{D1}}, \quad \text{se } W_1 + W_2 < 0 \quad (3.32)$$

em que,

$$C_{D1} = -C_D \quad (3.33)$$

$$C_{E1} = -2 C_D W_1 + C_B - 1 = C_E - 4 C_D W_1 \quad (3.34)$$

$$C_{F1} = W_1 (1 + C_B) + C_A Z_1 + C_C - C_D W_1^2 = C_F - 2 C_D W_1^2 \quad (3.35)$$

Importa referir que a solução que considera a soma no numerador das equações (3.31) e (3.32) resulta em valores absurdos pelo que é de desprezar.

Chega-se, assim, a uma forma bem mais simplificada de determinar a velocidade da água num dado instante, o que permite, posteriormente, determinar a altura de água no interior da chaminé aplicando a equação (3.13).

3.2.4.1 Análise da situação sem perdas

A situação teórica mais gravosa corresponde à que considera nulas as perdas de carga ocorridas ao longo da galeria em carga, pelo que importa programar este método simplificado para responder, igualmente, a essa situação.

Tendo como base o desenvolvimento matemático apresentado no ponto anterior, o parâmetro correspondente às perdas de carga é agora nulo pelo que se elimina. Sendo o valor das perdas nulo, a constante D também se anula, desenvolvendo-se a equação da seguinte forma:

$$W_1 + C_A Z_1 + C_B (W_1 + W_2) + C_C - W_2 = 0 \quad (3.36)$$

$$\Leftrightarrow W_1 (1 + C_B) + (C_A Z_1 + C_C) + W_2 (C_B - 1) = 0 \quad (3.37)$$

$$\Leftrightarrow W_2 = - \frac{W_1(1 + C_B) + C_A Z_1 + C_C}{C_B - 1} \quad (3.38)$$

Obtido o valor de W_2 , procede-se de forma análoga à anterior para a determinação do nível Z_2 .

3.2.5. CHAMINÉS DE EQUILÍBRIO DE SECÇÃO CONSTANTE

O estudo de chaminés de equilíbrio de secção constante possui um grande valor teórico, ainda que a sua construção seja efetuada em número reduzido. É para este tipo de chaminés que o cálculo assume a sua forma mais simples e que permite aprofundar o estudo analítico. O estudo deste tipo de chaminés serve, ainda, de base para o cálculo de chaminés mais complexas.

A sua rara existência deve-se, acima de tudo, a duas razões: em primeiro lugar porque, em condições semelhantes, exigem um maior volume e um preço mais elevado do que chaminés de outros tipos; em segundo lugar porque, neste tipo de chaminé, as oscilações são mais dificilmente amortecidas, pelo que se prolongam por mais tempo.

O estudo deste tipo de chaminés é feito, analisando-se inicialmente um caso de manobra de fecho total e instantânea, desprezando as perdas de carga na galeria em carga.

3.2.5.1. Manobra de fecho total e instantâneo, desprezando as perdas de carga

Como já foi referido no subcapítulo 3.2.1, as equações fundamentais do movimento são,

$$\frac{L}{g} \cdot \frac{dW}{dt} + Z + P = 0 \quad (3.4)$$

$$P = \pm P_0 \left(\frac{W}{W_0} \right)^2 \quad (3.5)$$

$$f \cdot W = F \cdot V + Q_T \quad (3.6)$$

$$V = \frac{dZ}{dt} \quad (3.8)$$

$$Q_T = Q_T(t) \quad (3.7)$$

Por hipótese, neste cálculo admitem-se nulas as perdas de carga na galeria, analisando-se a situação mais gravosa, correspondendo a uma manobra de fecho total e instantâneo, pelo que P e Q_T assumem valores nulos. Simplifica-se, então, a equação diferencial do movimento (equação 3.4) e a equação da continuidade (equação 3.6) que passam a assumir as seguintes formas:

$$\frac{L}{g} \cdot \frac{dW}{dt} + Z = 0 \quad (3.39)$$

$$f \cdot W = F \cdot V \quad (3.40)$$

Derivando a equação em ordem ao tempo, vem, simplificando:

$$\frac{L}{g} \cdot \frac{F}{f} \cdot \frac{d^2Z}{dt^2} + Z = 0 \quad (3.41)$$

Esta equação representa a equação diferencial do movimento para o caso em estudo. Pode-se, então, obter o seu integral (Lencastre, 1996),

$$Z = Z^* \cdot \sin\left(\frac{2\pi t}{T^*}\right) \quad (3.42)$$

em que T^* representa o período do movimento do nível da água na chaminé, que é sinusoidal, e de amplitude Z^* . O período T^* é calculado pela expressão seguinte (Lencastre, 1996),

$$T^* = 2\pi \sqrt{\frac{LF}{gf}} \quad (3.43)$$

Assim, antes da manobra o caudal de regime tem um determinado valor Q_0 , e as perdas de carga são nulas pelo que o nível de água no interior da chaminé de equilíbrio corresponde ao nível estático, ou seja, $Z = 0$.

No instante $t = 0$, imediatamente após a manobra, as condições iniciais são $Z = 0$, $Q_T = 0$ e $f \cdot W_0 = Q_0$.

Derivando em ordem ao tempo essa mesma equação, também no instante $t=0$, resulta que:

$$\frac{dZ}{dt} = Z^* \cdot \frac{2\pi}{T^*} \quad (3.44)$$

Por outro lado, para o instante $t = 0$, a equação da continuidade pode ser escrita da seguinte forma:

$$Q_0 = F \cdot V_0 + 0 \quad (3.45)$$

de onde se obtém a expressão:

$$V_0 = \frac{Q_0}{F} = \frac{dZ}{dt} = \frac{2\pi}{T^*} \cdot Z^* \quad (3.46)$$

Substituindo T^* pelo seu valor, a equação desenvolve-se da seguinte forma:

$$V_0 = \frac{2\pi}{2\pi \sqrt{\frac{LF}{gf}}} \cdot Z^* \Leftrightarrow Z^* = V_0 \cdot \sqrt{\frac{LF}{gf}} = W_0 \cdot \sqrt{\frac{Lf}{gF}} \quad (3.47)$$

A equação do movimento é, então:

$$Z = W_0 \cdot \sqrt{\frac{Lf}{gF}} \cdot \sin \sqrt{\frac{gf}{LF}} \cdot t = Z^* \cdot \sin \frac{2\pi}{T^*} \cdot t \quad (3.48)$$

Verifica-se assim que, para um dado aproveitamento, Z^* é o valor máximo atingido pela água, após uma manobra de fecho total e instantâneo, considerando nulas as perdas de carga na galeria. Esse valor é, igualmente, o valor mínimo atingido pela água, após uma manobra de abertura instantânea.

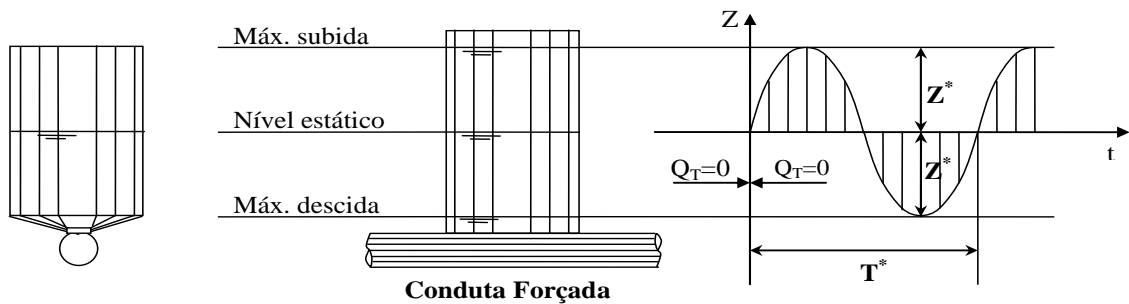


Figura 3.12 - Variação do nível da água numa chaminé cilíndrica de secção constante, para manobras de fecho total e instantânea, desprezando as perdas de carga. (adaptado de Ribeiro, 1971)

De forma semelhante, pode-se, também, determinar os níveis máximos consequentes de manobras parciais instantâneas. Para uma variação de caudal desde um valor inicial Q_A até um valor final Q_B , as equações do movimento mantêm-se as mesmas, mantendo-se, também, o movimento sinusoidal de período T^* . As condições iniciais passam a ser: $Z = 0$ e $V_0 = \frac{Q_A - Q_B}{F}$.

Consequentemente o valor máximo é dado pela expressão seguinte,

$$Z_{m\acute{a}x} = (Q_A - Q_B) \sqrt{\frac{L}{gfF}} \quad (3.49)$$

3.2.5.2. Introdução dos valores relativos

As expressões apresentadas no ponto anterior são apenas válidas para manobras instantâneas e admitindo nulas as perdas de carga na galeria em carga. Para se estudar a influência dessas mesmas perdas, utilizam-se os valores relativos introduzidos por Calame e Gaden. Estes autores propõem que os movimentos do nível da água sejam medidos relativamente ao valor Z^* , e que o tempo seja medido em relação a T^* . No que respeita às outras variáveis, estas são medidas relativamente aos seus valores iniciais. Com esta operação, consegue-se reduzir o número de variáveis a analisar o que simplifica o processo de cálculo e a sua representação gráfica. Os valores relativos, adimensionais, são, então os seguintes (Ribeiro, 1971):

$$z = \frac{Z}{Z^*}; \quad p = \frac{P}{Z^*}; \quad p_0 = \frac{P_0}{Z^*}; \quad q = \frac{Q_T}{Q_0}; \quad w = \frac{W}{W_0}; \quad v = \frac{V}{V_0}; \quad t' = \frac{t}{T^*} \quad (3.50)$$

Exprimindo as equações fundamentais do movimento através dos valores relativos, obtém-se:

$$\frac{1}{2\pi} \cdot \frac{dw}{dt'} + z + p = 0 \quad (3.51)$$

$$w = v + q \quad (3.52)$$

$$p = \pm p_0 \cdot w^2 \quad (3.53)$$

$$v = \frac{1}{2\pi} \frac{dz}{dt'} \quad (3.54)$$

$$q = q(t') \quad (3.55)$$

Como exemplo, aplicando-se as equações fundamentais do movimento a uma manobra semelhante à referida anteriormente, de fecho total e instantânea, supondo as perdas nulas, temos que, para um instante qualquer $t' > 0$, as perdas são nulas, o caudal é nulo e a velocidade na galeria é igual à velocidade na chaminé, ou seja:

$$p = 0, \quad q = 0, \quad w = v = \frac{1}{2\pi} \frac{dz}{dt'} \quad (3.56)$$

Assim, a equação do movimento simplifica-se para a expressão (3.33), obtendo-se,

$$\frac{1}{4\pi^2} \frac{d^2z}{dt'^2} + z = 0 \quad (3.57)$$

Dadas as condições iniciais de $z=0$ e $v=1$, a equação do movimento escreve-se como:

$$z = \sin 2\pi t' \quad (3.58)$$

que não é mais do que a equação do movimento (3.46) aplicada a valores relativos.

3.2.6.3. Manobras lentas de fecho parcial ou total, desprezando as perdas de carga

No estudo de manobras lentas, considerar-se-á apenas o caso de variações lineares do caudal em função do tempo, passando o caudal de um valor Q_A para um valor Q_B num dado intervalo de tempo τ . Em valores relativos, estes parâmetros representam-se por q_A , q_B , e por um tempo $\theta = \frac{\tau}{T^*}$.

Note-se que estas manobras, definidas por uma variação linear do caudal, não são idênticas a manobras de movimentos lineares na válvula. Isto justifica-se, por um lado, porque a secção de líquido na válvula não é proporcional ao movimento. Por outro lado, o caudal depende, também, da pressão sobre a válvula que, por sua vez, é função do nível de água na chaminé de equilíbrio, parâmetro que em si mesmo é variável.

Porém, aceita-se esta aproximação devido à simplificação do cálculo, e porque as diferenças daqui resultantes no que respeita às dimensões da chaminé de equilíbrio são pouco relevantes (Ribeiro, 1971). O método das diferenças finitas permite, em alternativa, obter resultados mais precisos.

Considere-se, então, que a manobra começa no instante $t'=0$, o que implica as seguintes condições:

- Antes da manobra $q = q_A$ $t' < 0$
- Durante a manobra $q = q_A + \frac{t'}{\theta} (q_B - q_A)$ $0 < t' < \theta$
- Após a manobra $q = q_B$ $t' > \theta$

Assim, em virtude da duração limitada da manobra, distinguem-se dois movimentos: um durante a manobra, e outro após a manobra.

De acordo com Stucky (1958) e Ribeiro (1971), a equação do primeiro movimento, isto é, durante a manobra ($0 < t' < \theta$), é dado por:

$$z = \frac{q_A - q_B}{2\pi\theta} \cdot [1 - \cos (2\pi t')] \quad (3.59)$$

Fazendo $t'=\theta$, determina-se z_1 , valor de z para o instante correspondente ao final da manobra. Da mesma forma, derivando a equação (3.57) e resolvendo-a para o mesmo instante, chega-se ao valor da velocidade v_1 .

$$z_1 = \frac{q_A - q_B}{2\pi\theta} \cdot [1 - \cos(2\pi\theta)] \quad (3.60)$$

$$\left. \frac{dz}{dt'} \right|_{t'=\theta} = v_1 = \frac{q_A - q_B}{\theta} \cdot \sin(2\pi\theta) \quad (3.61)$$

Estes valores z_1 e v_1 , sendo os valores finais para o primeiro movimento, correspondem às condições iniciais do segundo movimento, que representa o movimento oscilatório após o término da manobra de fecho. Assim, a equação do segundo movimento vem:

$$z = \frac{q_A - q_B}{\pi\theta} \cdot \sin(\pi\theta) \cdot \sin(2\pi t' - \pi\theta) \quad (3.62)$$

Analisando as duas equações, facilmente se conclui que a amplitude de oscilação, Z , é proporcional à variação de caudal $Q_A - Q_B$.

A tabela 3.2 apresenta uma síntese de cálculo com o valor máximo da variação da oscilação, assim como o instante em que ocorre, correspondente à primeira oscilação, em função da duração da manobra. Todos os valores são apresentados em valores relativos.

Tabela 3.2 - Valor máximo da oscilação e respetivo instante de ocorrência em função da duração da manobra, em valores relativos (Stucky, 1958).

Duração da manobra	Instante máximo	Valor máximo
$\theta = 0$	$t' = \frac{1}{4}$	$z_m = q_A - q_B$
$0 < \theta < \frac{1}{2}$	$t' = \frac{\theta}{2} + \frac{1}{4}$	$z_m = \frac{q_A - q_B}{\pi\theta} \cdot \sin(\pi\theta)$
$\theta = \frac{1}{2}$	$t' = \frac{1}{2}$	$z_m = \frac{2(q_A - q_B)}{\pi} = 0,637 \cdot (q_A - q_B)$
$\theta > \frac{1}{2}$	$t' = \frac{1}{2}$	$z_m = \frac{q_A - q_B}{\pi\theta}$
$\theta = \infty$	-	$z_m = 0$

3.2.6. ESTABILIDADE DE CHAMINÉS DE EQUILÍBRIO

O objetivo das chaminés de equilíbrio é, como já foi referido, compensar, de forma rápida e através da alteração do nível de água no seu interior, as variações que ocorrem na vazão das turbinas. Assim, afirma-se que uma chaminé de equilíbrio bem dimensionada é aquela que consegue manter as oscilações de nível sempre dentro do seu interior e, ao mesmo tempo, amortecer essas mesmas oscilações (Battiston, 2009).

Esta característica acima descrita representa a estabilidade da chaminé. Devido às condicionantes económicas, a área da chaminé deverá ser a menor possível. No entanto, no caso de esta área ser demasiado reduzida, poder-se-ão gerar efeitos que, entrando em ressonância com o causador da variação de nível, provoquem a chamada instabilidade da chaminé. Uma chaminé diz-se instável quando não consegue amortecer as oscilações de forma a estabilizar o sistema ou, inclusivamente, quando leva a uma ampliação do efeito oscilatório, podendo provocar um extravasamento.

As instabilidades geradas são de duas naturezas: instabilidades de pequena amplitude; ou instabilidades de grande amplitude. As primeiras estão, normalmente, associadas a pequenas oscilações aleatórias, como é exemplo uma pequena variação na potência das turbinas. As instabilidades de grande amplitude são produzidas por mudanças significativas no regime de funcionamento da turbina (Battiston, 2009).

A solução do problema de instabilidade em chaminés de equilíbrio foi, primeiramente, estudada por Thoma em 1910, que propôs um valor mínimo para a secção da chaminé que garante a estabilidade do sistema. Este valor mínimo corresponde ao designado critério de Thoma, que define, portanto, a área horizontal mínima que garante a estabilidade de pequenas oscilações inerentes à regulação da potência (Pinto e Ribeiro, 2012)

$$F = \frac{Q_0^2}{2gf^2} \frac{f \cdot L}{H_0 P_0} \quad (3.63)$$

em que Q_0 representa o caudal inicial (m^3/s), g a aceleração gravítica (m/s^2), A e L a secção e comprimento da galeria em carga (m^2 e m), respetivamente, H_0 a carga inicial (bruta) (m) e P_0 as perdas de carga iniciais ao longo da galeria (m).

3.2.6.1. Definição do Amortecimento

Tendo presente a necessidade de amortecer as oscilações do nível de água no interior da chaminé, é imperativo adotar-se uma secção superior à secção limite definida pelo critério de Thoma. Assim, torna-se interessante conhecer a relação entre a secção F e o amortecimento das oscilações.

O amortecimento ζ , define-se, geralmente, pelo quociente

$$\zeta = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1} \quad (3.64)$$

em que Z_1 e Z_2 são dois máximos consecutivos. No entanto, o intervalo de tempo entre estes dois máximos depende da secção F que se pretende determinar. Torna-se, assim, preferível definir esse mesmo

amortecimento num intervalo de tempo fixo, que não seja dependente da secção F da chaminé de equilíbrio. Ribeiro (1971), definiu esse intervalo por,

$$t_0 = \frac{W_0 \cdot L}{g \cdot P_0} \quad (3.65)$$

A curva envolvente dos máximos assume a forma exponencial, figura 3.12, e tem por equação, em valores relativos,

$$\Delta z = m \cdot e^{c \cdot t'} \quad (3.66)$$

em que $c = \pi \cdot \left(\frac{1}{h_0} - 2 \cdot p_0 \right)$.

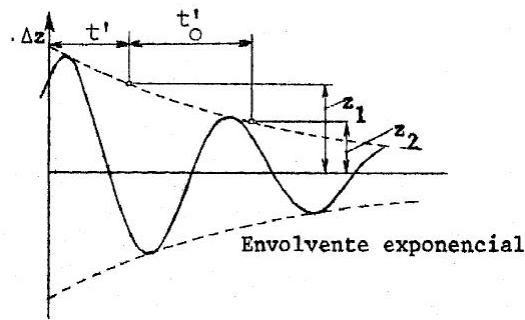


Figura 3.13 – Definição de amortecimento (adaptado de Ribeiro, 1971)

Assim, define-se Z_1 e Z_2 da seguinte forma,

$$\begin{aligned} Z_1 &= m \cdot e^{c \cdot t'} \\ Z_2 &= m \cdot e^{c(t' + t'_0)} \end{aligned} \quad (3.67)$$

Consequentemente, o amortecimento pode ser definido por,

$$\zeta = 1 - e^{c \cdot t'_0} \quad (3.68)$$

em que $t'_0 = \frac{t_0}{T}$.

A oscilação é, então, caracterizada pelo seu coeficiente de amortecimento ζ , ou seja,

- Para oscilações permanentes: $\zeta = 0$
- Para oscilações amortecidas: $\zeta > 0$
- Para oscilações amplificadas: $\zeta < 0$

Passando os valores relativos para valores reais, obtém-se:

$$\begin{aligned} \zeta &= 1 - e^{\pi \left(\frac{1}{h_0} - 2 \cdot p_0 \right) \frac{t_0}{T^*}} - 1 - e^{\pi \left(\frac{Z^*}{H_0} - 2 \cdot \frac{P_0}{Z^*} \right) \frac{W_0 \cdot L}{g \cdot P_0} \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{g}{L \cdot F}}} \\ &= 1 - e^{\frac{W_0^2 \cdot L \cdot f}{2g \cdot H_0 \cdot P_0 \cdot F} - 1} = 1 - e^{\frac{F_T}{F} - 1} \end{aligned} \quad (3.69)$$

Ou seja,

$$\frac{F}{F_T} = \frac{1}{1 + \ln(1 - \zeta)} \quad (3.70)$$

3.2.6.2. Ação de outros fatores além da perda de carga na galeria

De acordo com Pinto e Ribeiro (2012), e Ribeiro (1971), outros fatores poderão influir na estabilidade da oscilação e, conseqüentemente, na definição da área mínima que garanta essa mesma estabilidade.

Além da perda de carga na galeria, também a perda de carga na conduta forçada intervém na definição da área mínima, de forma semelhante, ainda que em sentido contrário. A energia cinética da veia líquida é outro fator a considerar, na medida em que reduz o nível na chaminé dum valor $E = \frac{W^2}{2g}$. (Ribeiro, 1971)

Por outro lado, a abertura da turbina influencia o rendimento do grupo. Isto assume relevância, na medida em que há que assegurar uma potência constante, o que leva a constantes regulações na abertura do distribuidor. Assim, Ribeiro (1971) propõe uma nova formulação da área mínima transversal,

$$F = \frac{W_0^2 \cdot L \cdot f}{2g \cdot H_0 \cdot P_0} \cdot \frac{1}{\left[1 + \frac{E_0}{P_0} + \ln(1 - \zeta) \right] \left[\frac{1 + \tan \alpha}{1 - \frac{1}{2} \tan \alpha} \left(1 - \frac{P_{cf}}{H_0} \right) - 2 \frac{P_{cf}}{H_0} \right]} \quad (3.71)$$

em que $\tan \alpha$ representa a inclinação da curva de rendimento e,

$$H_0 = H - P_0 \quad (3.72)$$

Este novo valor da área transversal define o limite para o qual as oscilações de regulação e potência constante são permanentes, tendo em conta a energia cinética E , a inclinação da curva de rendimento, $\tan \alpha$, e a perda de carga na conduta forçada.

3.2.7. CHAMINÉS DE EQUILÍBRIO COM ESTRANGULAMENTO

De modo a reduzir as dimensões da chaminé de equilíbrio opta-se, regularmente, por introduzir um estrangulamento na ligação da conduta à chaminé. Este estrangulamento produz uma perda de carga adicional, R , na ligação da chaminé à conduta. Consegue-se, assim, aumentar a perda de carga e conseqüente dissipação de energia, permitindo economizar nas dimensões da chaminé, conseguindo-se, igualmente, um amortecimento mais rápido.

Em chaminés com secções grandes, o movimento de descida e ascensão da água é feito lentamente. Isto não é conveniente, pelo facto de, por um lado, aquando de um fecho do distribuidor, se pretender parar o movimento de água na galeria criando uma contrapressão na base da chaminé e, por outro lado, aquando de uma abertura do distribuidor, ser desejável acelerar o movimento na galeria, criando uma depressão na base da chaminé.

Com a introdução do estrangulamento, a equação do movimento, equação (3.4), assume uma nova forma, sendo introduzida uma nova parcela, R , correspondente à perda de carga provocada pelo estrangulamento. A equação é, então, reescrita na forma,

$$\frac{L}{g} \cdot \frac{dW}{dt} + Z + P + R = 0 \quad (3.73)$$

A perda de carga no estrangulamento é considerada uma perda de carga localizada, pelo que pode ser quantificada por,

$$R = P_{loc} = K_L \cdot \frac{U^2}{2g} \quad (3.74)$$

em que K_L representa o coeficiente de perda de carga localizada no estrangulamento, que dependerá do tipo de estrangulamento considerado.

Para facilitar a aplicação do método das diferenças finitas através do método desenvolvido e apresentado anteriormente, procurou-se englobar a nova parcela, método desenvolvido e apresentado anteriormente, procurou-se englobar a nova parcela, R , na parcela das perdas de carga, P . Para isso, é determinado o comprimento que uma conduta teria que ter de modo a provocar uma perda de carga contínua de valor equivalente à perda de carga produzida pelo estrangulamento.

A perda de carga contínua produzida por um comprimento de conduta equivalente à perda de carga localizada produzida pelo estrangulamento é dada por,

$$P_{continua,equivalente} = j \cdot L_{eq} \quad (3.75)$$

em que L_{eq} representa o comprimento equivalente de uma conduta capaz de produzir uma perda de carga contínua igual à perda de carga produzida pelo estrangulamento, e j é obtido pela fórmula de Manning-Strickler,

$$j = \frac{U^2}{K_S^2 \cdot R^{\frac{4}{3}}} \quad (3.76)$$

Substituindo (3.76) em (3.75) e igualando esta expressão a (3.74) vem,

$$K_L \cdot \frac{U^2}{2g} = \frac{U^2}{K_S^2 \cdot R^{\frac{4}{3}}} \cdot L_{eq} \quad (3.77)$$

Simplificando, o comprimento equivalente pode, então, ser representado por,

$$L_{eq} = \frac{K_L \cdot K_S^2 \cdot R^{\frac{4}{3}}}{2g} \quad (3.78)$$

A perda de carga total, soma da perda de carga localizada provocada pelo estrangulamento e da perda de carga contínua pode, então, ser expressa por,

$$P = j \cdot (L + L_{eq}) = \frac{U^2}{K_S^2 \cdot R^{\frac{4}{3}}} \cdot (L + L_{eq}) \quad (3.79)$$

Desta forma, fica simplificada a aplicação do método das diferenças finitas, substituindo, na equação do movimento, a parcela P , pela expressão obtida na equação anterior.

No entanto, esta expressão está, ainda, dependente da determinação do valor do coeficiente de perda de carga localizada K_L . Lencastre (1996) apresenta uma possível expressão de determinação deste coeficiente, considerando um orifício simétrico:

$$K = \left[\frac{D^2}{0,6 \cdot d^2} - 1 \right]^2 \quad (3.80)$$

em que D representa o diâmetro do trecho de conduta que liga a galeria em carga à chaminé, e d o diâmetro do orifício.

No entanto, na realidade utiliza-se frequentemente um estrangulamento assimétrico, que evita os inconvenientes provocados pelas diminuições de pressões ocorridas aquando da descida da água. A assimetria do estrangulamento provoca, assim, uma perda de carga na saída, R' , menor que a perda de carga de entrada, R'' , figura 3.14 (Lencastre, 1996)

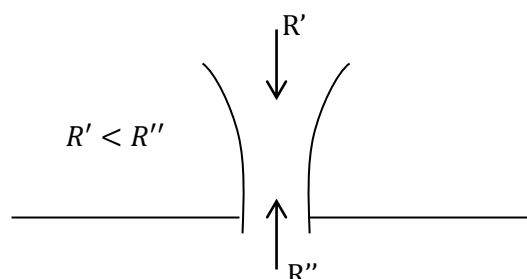


Figura 3.14 – Diferentes perdas de carga localizadas no estrangulamento, conforme a direção do fluxo (adaptado de Lencastre, 1996)

Desta forma, o cálculo da oscilação do nível de água no interior de uma chaminé de equilíbrio com estrangulamento na base, por intermédio do método das diferenças finitas, é obtido com os mesmos passos utilizados para o caso de uma chaminé de equilíbrio simples, com a diferença da parcela correspondente à perda de carga inicial assumir uma nova forma, dependendo da determinação do coeficiente de perda de carga localizada específico do estrangulamento.

3.2.8. CHAMINÉS DE EQUILÍBRIO A JUSANTE DA CENTRAL

O estudo apresentado neste trabalho diz respeito a uma chaminé localizada a montante da central. No entanto, como já referido, o posicionamento da chaminé pode variar, podendo localizar-se a jusante ou, inclusivamente, em ambos os lados da central, dependendo da extensão da galeria em carga e do circuito de restituição.

De acordo com Ribeiro (1971), “o movimento, isto é, a oscilação em massa que se produz numa chaminé a jusante da central é simétrico daquele que se estabeleceria no caso da chaminé estar a montante, tidos em atenção os sentidos positivos e os níveis estáticos respetivos”.

Neste caso, as variáveis e sentidos positivos a considerar estão representadas na figura 3.15, que pretende esquematizar o circuito hidráulico de um aproveitamento com chaminé de equilíbrio a jusante da central.

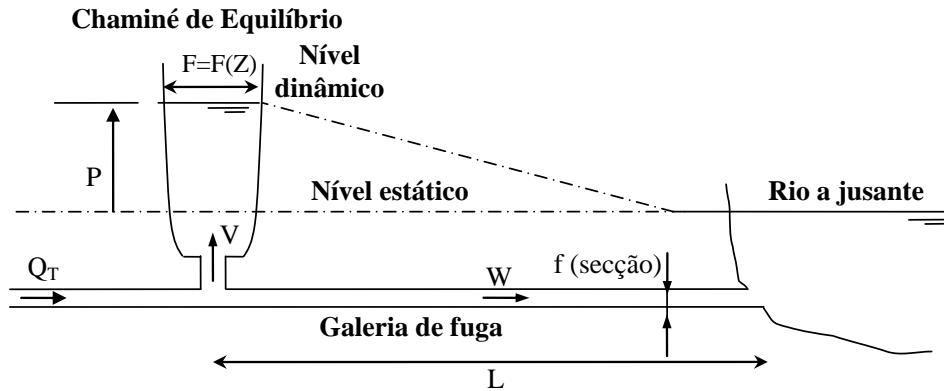


Figura 3.15 - Esquema representativo de um circuito hidráulico com chaminé de equilíbrio a jusante de central e das variáveis e sentidos positivos a considerar.

As equações do movimento são reescritas ajustando-se os novos sentidos positivos definidos, vindo assim a equação fundamental escrita sob a forma,

$$\frac{L}{g} \cdot \frac{dW}{dt} - Z + P + R = 0 \quad (3.81)$$

e a equação da continuidade sob a forma,

$$Q_T = F \cdot V + f \cdot W \quad (3.82)$$

Num cenário de fecho do distribuidor, o nível de água no interior da chaminé desce, alimentando-se, dessa forma, o escoamento ao longo da galeria de fuga. Inversamente, num cenário de abertura rápida do distribuidor o nível de água no interior da chaminé sobe, até se estabelecer o regime permanente na galeria de fuga.

Conclui-se, assim, que o movimento ocorrido numa chaminé de equilíbrio situada a jusante da central é simétrico do ocorrido no caso de uma chaminé posicionada a montante.

4

CASO DE ESTUDO

É objetivo deste trabalho simular o dimensionamento de uma chaminé de equilíbrio e verificar o seu funcionamento. Assim, procurou-se obter junto de entidades projetistas dados que permitissem tornar o mais real possível esta simulação. Infelizmente, não foram fornecidas essas informações, pelo que se recorreu a dados obtidos em publicações, referentes a algumas características do Aproveitamento em estudo, tendo sempre presente que a simulação aqui efetuada não poderá ser comparada com a realidade por falta de dados completos.

Posto isto, escolheu-se o Aproveitamento do Caldeirão como caso a analisar, baseando o estudo nos dados recolhidos numa publicação alusiva ao aproveitamento.

4.1. ENQUADRAMENTO GERAL DO APROVEITAMENTO

O aproveitamento de fins múltiplos do Caldeirão situa-se no concelho da Guarda, a poucos quilómetros desta localidade, abrangendo as freguesias de Trinta, Corujeira, Maçaínhas de Baixo, Pero Soares e Vila Soeiro. Foi construído na linha de água da ribeira do Caldeirão, na Bacia Hidrográfica do Mondego.

A sua construção teve como objetivo a produção de energia e o fornecimento de água ao concelho da Guarda e iniciou-se em 1986, com a realização de trabalhos preliminares como acessos, instalações para pessoal e redes de comunicação, água e energia. A obra principal de construção foi adjudicada em 1989, procedendo-se, posteriormente, à adjudicação de outras empreitadas e fornecimento de equipamentos. O valor da obra ascendeu a cerca de 1 milhão e 440 mil euros, e foi concluída em 1993.

O aproveitamento do Caldeirão situa-se na faixa marginal de nordeste do Parque Natural da Serra da Estrela (PNSE), pelo que, atendendo aos efeitos ambientais e sociais que a sua construção iria produzir, encomendou-se a elaboração de um Estudo de Impacte Ambiental (EIA) que identificasse os impactes positivos e negativos.

De entre os impactes identificados como negativos, destaca-se a criação de depósitos de escombros, provenientes da abertura dos túneis, a inviabilização ou redução da rentabilidade de pequenas explorações agrícolas que viriam a ser afetadas pela albufeira, e a criação de zonas internáveis, consequência da oscilação do nível de água na albufeira.

No que respeita aos impactes positivos, destacam-se, naturalmente, os principais objetivos que levaram à construção deste aproveitamento: produção de energia elétrica na ordem dos 44 milhões de kWh, em ano médio, e a capacidade de abastecimento de água à cidade da Guarda. Igualmente, tomou-se em consideração a melhoria das condições ecológicas para a fauna aquática e o resultante de-

envolvimento das atividades piscícolas, o aumento das potencialidades hídricas/turísticas e a consequente geração de emprego, e a beneficiação da rede de estradas locais, fruto da abertura de acessos definitivos e do restabelecimento daqueles prejudicados pela albufeira.

4.2. CARACTERÍSTICAS DO APROVEITAMENTO

O esquema geral da obra do Aproveitamento do Caldeirão consistiu, resumidamente, na construção de um açude no rio Mondego, com uma derivação da água, por túnel, para a ribeira do Caldeirão onde é construída uma barragem que permite a condução da água, em túnel e conduta forçada, até à central, na qual é produzida a energia elétrica. A água é, depois, restituída novamente ao rio Mondego.

Uma vez que o volume associado aos caudais afluentes da ribeira do Caldeirão é de apenas cerca de 21 milhões de m³ em ano médio, optou-se por uma solução que englobasse uma derivação de água do rio Mondego para esta ribeira, acrescentando, também em ano médio, cerca de 95 milhões de m³ de água.

Foi, assim, construído um açude de betão no rio Mondego, com 11m de altura e 62m de desenvolvimento, criando um lago com aproximadamente 8000 m². A água aí captada é conduzida por um túnel com 2700m de comprimento até à ribeira do Caldeirão.

Nessa mesma ribeira foi, então, construída a barragem de betão, do tipo abóbada de dupla curvatura, com 39m de altura e uma extensão de 122m, figura 4.1.

Esta estrutura dispõe de uma descarga de fundo, de um dispositivo que garante os caudais mínimos necessários, e de um descarregador de cheias, de lâmina livre, com uma capacidade de vazão de 240 m³/s.



Figura 4.1 – Construção da barragem de betão do Aproveitamento do Caldeirão (EDP, 1992)

4.2.1. CIRCUITO HIDRÁULICO

O circuito hidráulico com a função de produção de energia é constituído pelos seguintes elementos: tomada de água, galeria em carga, chaminé de equilíbrio, válvula de topo, conduta forçada, central e restituição, figura XX.

A tomada de água, situada junto à barragem, na margem direita, é equipada com grade grossa, grade fina e comporta tipo vagão.

A galeria em carga tem um comprimento de cerca de 997m, com um diâmetro corrente de 3,10m, o que corresponde a uma secção de 7,55 m². O revestimento é feito, inteiramente, por um anel de betão.

No fim da galeria em carga foi construída uma chaminé de equilíbrio, com secção cilíndrica de 4,20m de diâmetro e 39m de altura. Esta chaminé é dotada de uma câmara de expansão e de uma câmara de alimentação. A primeira, construída a céu aberto, é composta por um reservatório cilíndrico de 12m de diâmetro e 7,5m de altura. A câmara de alimentação é composta por duas galerias com diâmetro igual ao da galeria em carga, com 21m de comprimento cada, com uma capacidade volumétrica total de 384,6 m³.

A conduta forçada, instalada a céu aberto ao longo da vertente da encosta até próximo da central, onde volta a “mergulhar” no terreno. O seu comprimento total é de 375m e o seu diâmetro varia desde os 2,60m, na parte superior, até aos 1,67m na parte final.

Foram ainda instaladas duas válvulas: uma válvula de topo, do tipo borboleta, no troço inicial da conduta forçada, funcionando como órgão de segurança desta última; e uma válvula esférica, imediatamente a montante da turbina, também com o objetivo de funcionar como órgão de proteção e eventual ensecamento.

O edifício da central está implantado na margem direita do rio Mondego, a 650m a jusante da foz da ribeira do Caldeirão. Está equipada com um grupo gerador de eixo vertical, turbina do tipo Francis, e por um alternador. Para uma queda prevista de 193m, e um caudal máximo turbinado de 23 m³/s, a potência gerada atinge os 38000 kWh.

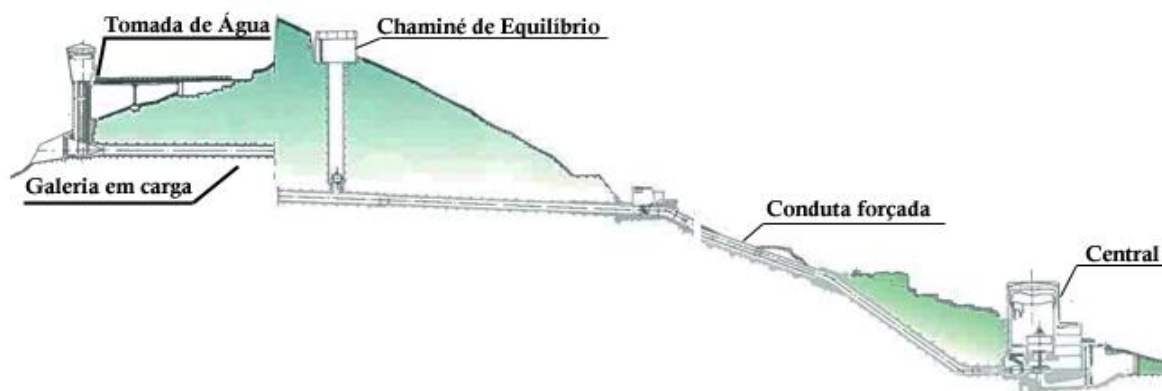


Figura 4.2 – Perfil longitudinal do circuito hidráulico (adaptado de EDP, 1992)

4.3. ESTUDO DA CHAMINÉ DE EQUILÍBRIO

4.3.1. CÁLCULO DA FASE DA ONDA

Como referido no capítulo 2, importa analisar o choque hidráulico ocorrido na conduta forçada. Para definir o tipo de manobra é necessário comparar o tempo de duração da própria manobra com o tempo de propagação da onda originada pelo choque hidráulico, ou seja, o tempo de fase da onda, μ .

Este tempo de fase é calculado pela expressão 2.1, em que o parâmetro a , celeridade da onda, é calculado pela equação 2.2.

$$\mu = \frac{2L}{a} \quad (2.1)$$

$$a = \frac{\sqrt{\frac{K}{\rho}}}{\sqrt{1 + \frac{K D}{E e} C_1}} \quad (2.2)$$

Considerou-se, para determinação da celeridade, que a conduta forçada é feita em aço, com um valor do módulo de elasticidade E de 210 000 MPa e coeficiente de Poisson ν de 0,29 (Piqueiro, 2009). Assumiu-se o valor de 2,60 m para o diâmetro e o valor de 10 mm para a espessura. O parâmetro K , correspondente ao módulo de elasticidade volumétrica da água tem o valor de 2030 MPa e a massa volúmica da água, ρ , vale 1000 KPa. Para determinação do coeficiente C_1 , considerou-se que a conduta se encontra ancorada contra qualquer deslocamento longitudinal, assumindo um valor de 0,9159. Posto isto, e pela equação 2.2, o valor da celeridade da onda é de 1037,6 m/s.

Obtido este valor, pode-se, então, calcular o tempo de fase pela equação 2.1. Para uma onda com celeridade de 1037,6 m/s, numa conduta com comprimento de 375 m, a sua fase é de 0,7228s.

Isto significa que este valor de 0,7228s define o intervalo entre uma manobra rápida e uma manobra lenta. Qualquer manobra com um tempo superior a este é uma manobra lenta. Por outro lado, se a duração da manobra for inferior, a manobra é classificada como rápida.

No estudo efetuado neste trabalho, procura-se analisar e comparar os resultados obtidos com manobras de diversas durações.

4.3.2. CRITÉRIO DE THOMA

De acordo com o exposto no capítulo 3, o critério de Thoma define uma área mínima para a secção transversal da chaminé de equilíbrio que garanta a sua estabilidade, isto é, que garanta um amortecimento das oscilações com o tempo.

Dessa forma, aplicando a equação 3.63 chegou-se a um valor mínimo de 9,34m para o diâmetro da chaminé, de acordo com o seguinte,

$$F = \frac{Q_0^2}{2gf^2} \frac{f \cdot L}{H_0 P_0} \quad (4.1)$$

em que,

- Q_0 (caudal inicial) = 23 m³/s
- f (secção da galeria em carga) = 7,55 m²
- L (comprimento da galeria em carga) = 997 m
- H_0 (carga inicial ou carga bruta) = 193 m (dado do catálogo)
- P_0 (perda de carga inicial calculada pela fórmula de Manning-Strickler) = 2,0304 m

Estes dados levaram a uma área mínima de 68,54 m², o que corresponde, no caso de uma chaminé de secção circular constante, a um diâmetro mínimo de 9,34 m.

Como referido no ponto 3.2.6.2, esta fórmula apresenta-se incompleta uma vez que há a considerar outros fatores no que respeita à estabilidade da chaminé. Para isso chegou-se a uma outra formulação (equação 3.71) que pretende traduzir melhor os efeitos que na realidade ocorrem.

No entanto, o cálculo deste coeficiente revelou-se impossível por falta de dados.

4.3.3. ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DA CHAMINÉ DE EQUILÍBRIO PARA VÁRIOS CENÁRIOS

Aplicando o método das diferenças finitas na sua versão simplificada, como apresentado no ponto 3.2.4, procurou simular-se o comportamento da chaminé de equilíbrio para vários cenários, procurando aferir sobre a influência de vários parâmetros nesse mesmo comportamento.

A aplicação do método das diferenças finitas implicou a definição dos seguintes dados de base, correspondentes às características conhecidas do aproveitamento do Caldeirão, excetuando nos casos em que as alterações são referidas:

- NPA (nível de pleno armazenamento) = 702,00 m
- Cota da base da chaminé de equilíbrio = 672,00 m
- L (comprimento da galeria) = 997 m
- f (secção da galeria) = 7,55 m²
- K_s (coeficiente de Manning-Strickler) = 80 m^{1/3}s⁻¹ (revestimento em betão)
- Q_i (caudal inicial) = 23 m³/s
- Q_f (caudal final) = 0 m³/s
- P_0 (perda de carga inicial na galeria) = 2,03 m

Com a aplicação do método pretende-se determinar a variação do nível de água no interior da chaminé ao longo do tempo. Esta variação é relativa ao nível inicial de água na chaminé, que por sua vez corresponde ao nível estático (nível de água na albufeira, admite-se o NPA, 702,00 m) diminuído das perdas de carga ao longo da galeria. Assim, este nível inicial admite-se de 699,97 m, o que implica que, para respeitar a cota da base da chaminé, a variação negativa do nível de água no seu interior nunca poderá ultrapassar os 27,97 m.

4.3.3.1. Efeito do tempo de manobra

Começou por se analisar a influência do tempo de manobra do equipamento na variação do nível de água no interior da chaminé de equilíbrio. Essa análise foi feita comparando os níveis máximos obtidos para três cenários distintos de tempo de manobra, (10s, 20s e 30s) para duas diferentes secções da chaminé de equilíbrio: área real e área obtida pelo critério de Thoma. De acordo com o apresentado no ponto 4.3.1, todos estes cenários correspondem a manobras lentas. Para todas estas situações simulou-se um cenário de fecho total, variando o caudal dos 23 m³/s para um caudal nulo.

Para uma chaminé com o diâmetro de 4,20m, correspondente ao real, a simulação dos 3 cenários correspondentes aos 3 tempos de manobra referidos, permitiu chegar aos valores de variação dos níveis máximo e mínimo da oscilação dentro da chaminé, apresentados na tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Valores máximos e mínimos de variação do nível de água no interior da chaminé de equilíbrio para um diâmetro de 4,20m.

Varição	$\tau = 10s$	$\tau = 20s$	$\tau = 30s$
Nível mínimo [m]	-17,85	-17,29	-15,39
Nível máximo [m]	19,89	18,29	17,07

Como se verifica pela análise da tabela 4.1, quanto menor o tempo de manobra, mais elevados serão, em módulo, os picos atingidos pela oscilação de água no interior da chaminé. No que respeita ao comportamento ao longo do tempo, representado na figura 4.1, verifica-se que a oscilação é, efetivamente, amortecida. A figura mostra essa mesma oscilação para um tempo correspondente a 1 hora após a manobra, durante o qual é possível constatar que ainda não se verifica o amortecimento total, registando-se, ao fim desse tempo, uma oscilação de cerca de 2 a 2,5m. Pela visualização da mesma figura percebe-se, ainda, que o amortecimento é idêntico, e que o comportamento é bastante semelhante para os três cenários simulados, registando-se, apenas, uma pequena variação no que respeita aos valores de pico atingidos, sem grande relevância, e mais significativos nos primeiros 15min.

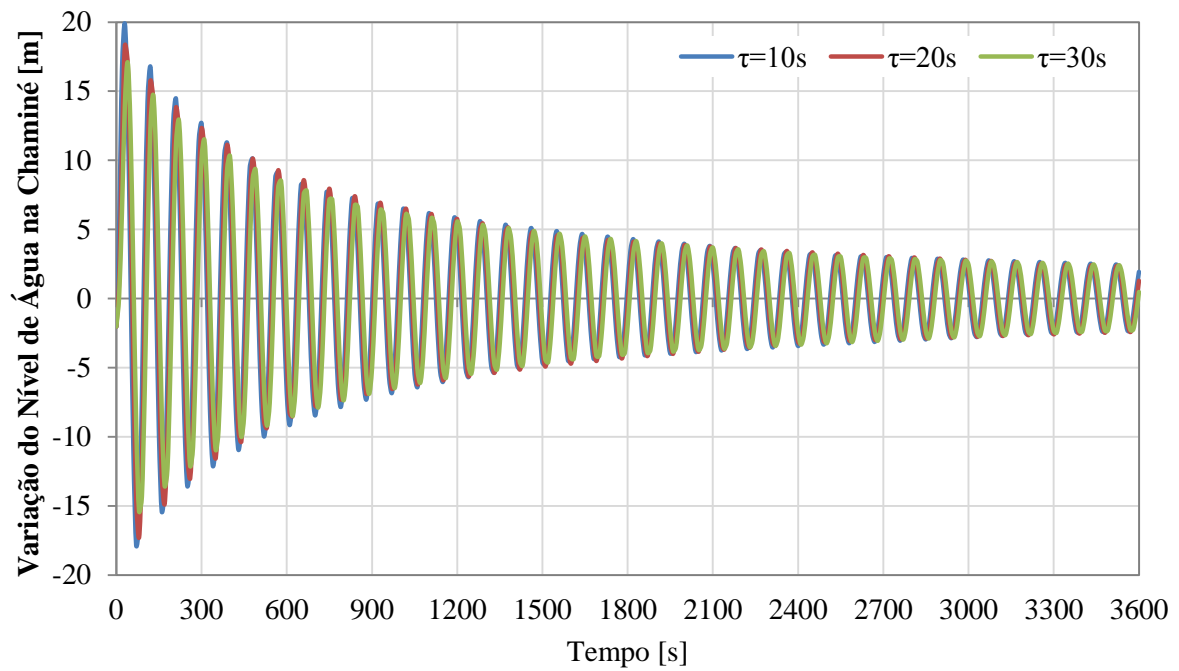


Figura 4.3 - Efeito do tempo de manobra na variação da amplitude da oscilação da água na chaminé para $D=4,20\text{m}$.

As velocidades atingidas pela água na galeria em carga apresentam valores semelhantes para os três cenários, como mostra a figura 4.4. É, ainda, possível observar que a variação e amortecimento são semelhantes.

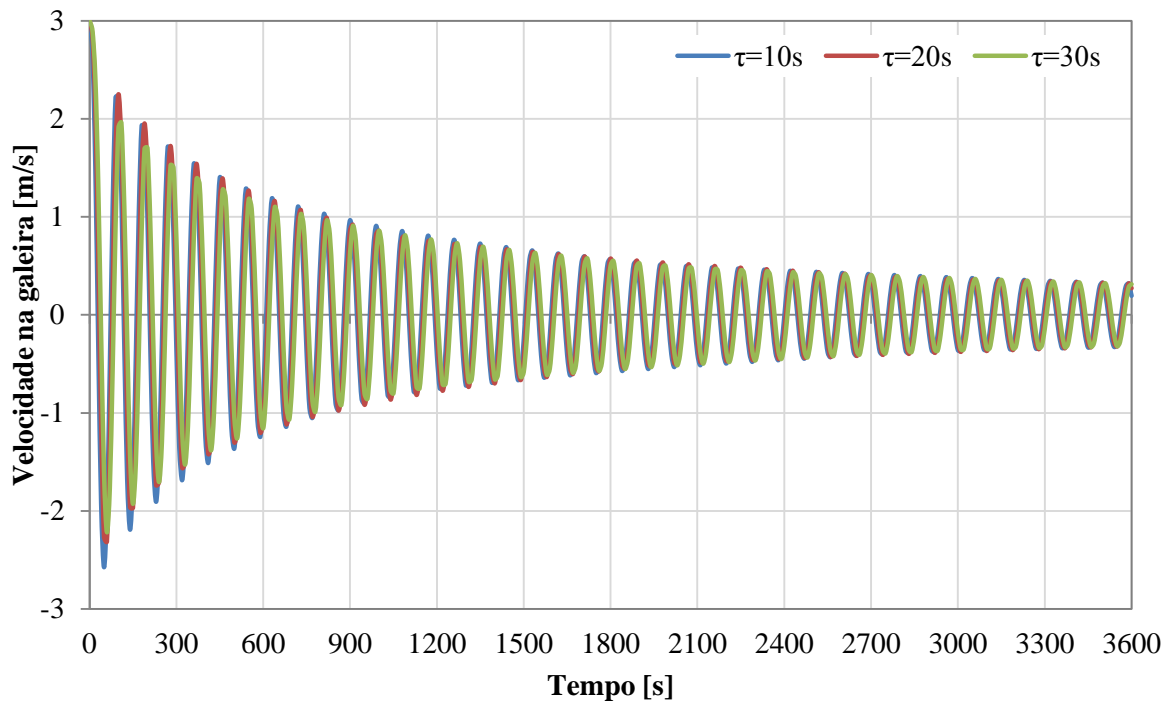


Figura 4.4 – Efeito do tempo de manobra na velocidade na galeria em carga para $D=4,20\text{m}$

No que respeita às perdas de carga as maiores diferenças ocorrem nos instantes iniciais existindo, depois, tendência para uma igualdade de valores. Verifica-se, igualmente, que estes valores são sempre positivos, como seria de esperar, figura 4.5.

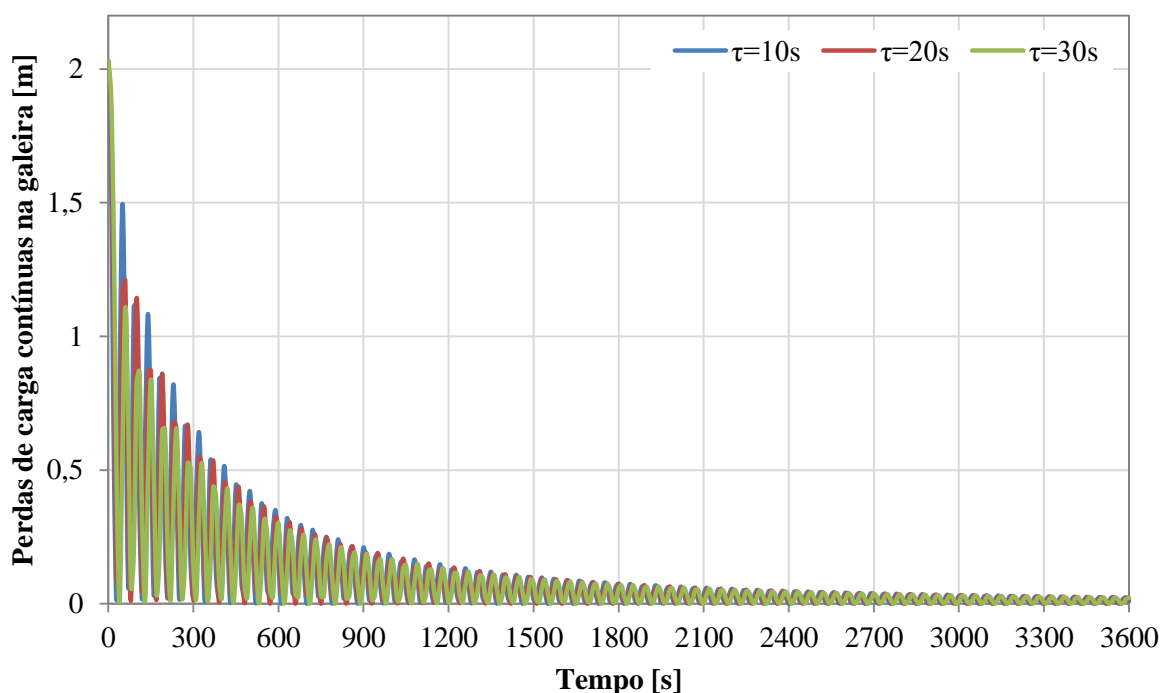


Figura 4.5 – Efeito do tempo de manobra nas perdas de carga contínuas na galeria para D=4,20m

De forma análoga, simularam-se os mesmos três cenários de tempo de manobra, desta feita para o diâmetro obtido pela aplicação do critério de Thoma, arredondado para 9,50m por simplificações construtivas.

Verificou-se uma semelhança entre os três cenários, com diferenças reduzidas nos valores máximos e mínimos, tabela 4.2, mas com grandes diferenças em comparação com os cenários correspondentes ao diâmetro real, tabela 4.1.

Tabela 4.2 - Valores máximos e mínimos de variação do nível de água no interior da chaminé de equilíbrio para um diâmetro de 9,50m.

Variação	$\tau = 10s$	$\tau = 20s$	$\tau = 30s$
Nível mínimo [m]	-6,95	-6,91	-6,80
Nível máximo [m]	8,54	8,40	8,32

A variação dos valores de pico com o tempo de manobra apresenta o mesmo comportamento que na situação anterior, verificando-se que quanto menor o tempo de manobra, mais elevados, em módulo, são os picos atingidos pela oscilação. Analisada a figura 4.6 correspondente à variação do nível de água na chaminé ao longo de 1 hora, verifica-se, novamente, que o comportamento entre os três cenários é bastante semelhante, com um amortecimento idêntico ao longo do tempo.

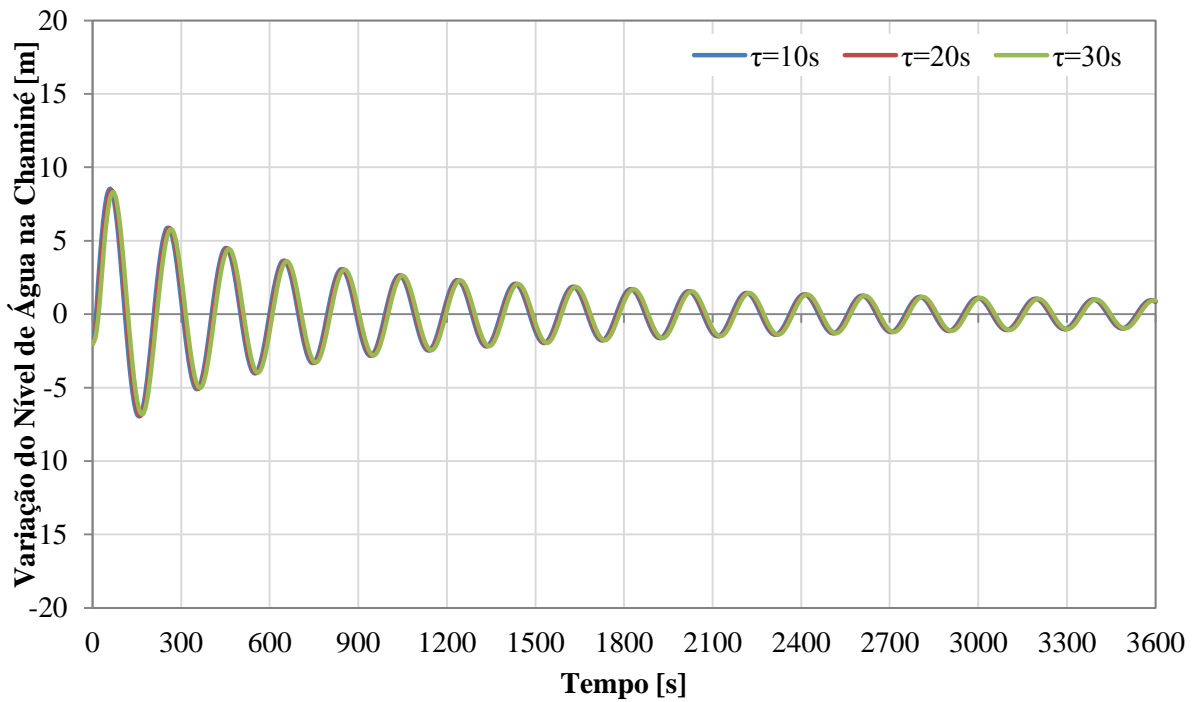


Figura 4.6 - Efeito do tempo de manobra na variação da amplitude de oscilação de água na chaminé para $D=9,50m$.

Fez-se, igualmente, uma análise da variação da velocidade e das perdas de carga ao longo da galeria. As figuras 4.7 e 4.8 mostram o comportamento desses parâmetros ao longo do tempo, verificando-se novamente a semelhança de comportamento para os três cenários considerados.

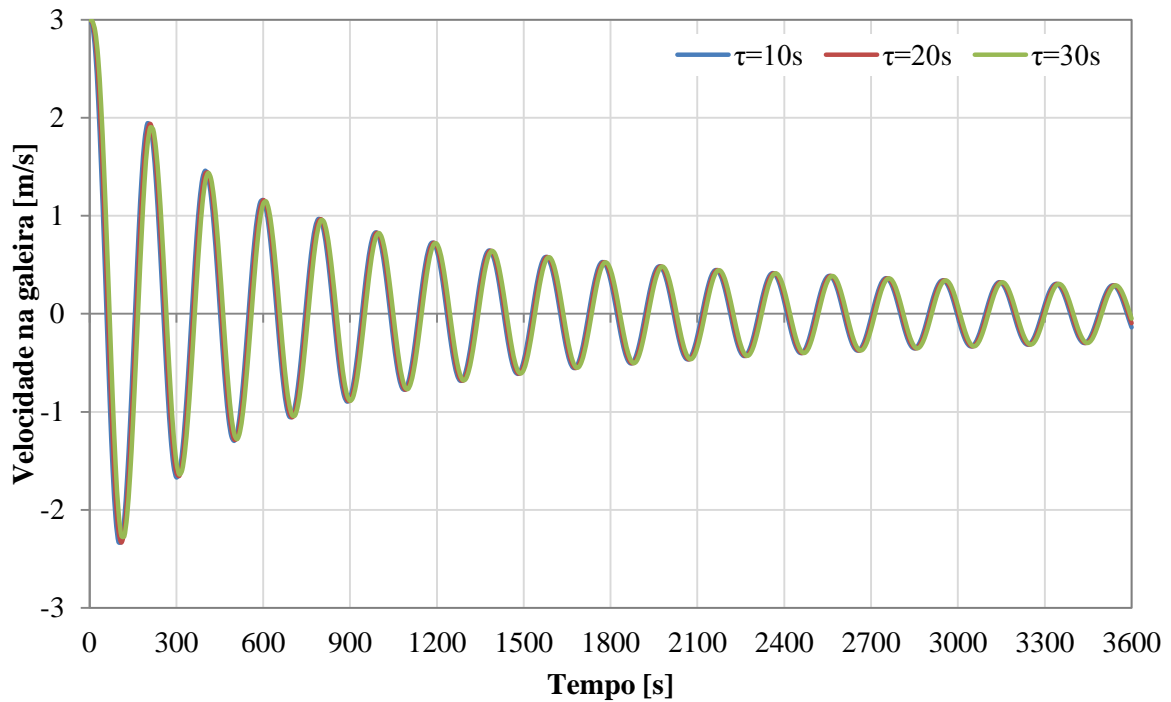


Figura 4.7 – Efeito do tempo de manobra na velocidade na galeria em carga para $D=9,50m$.

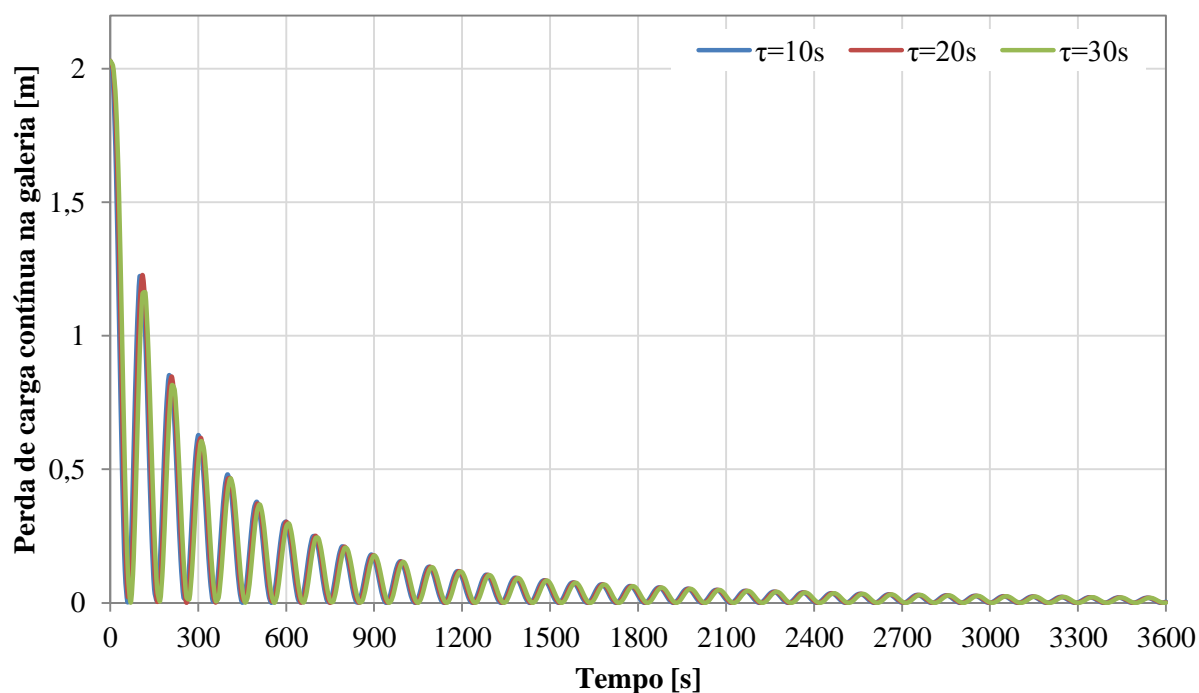


Figura 4.8 – Efeito do tempo de manobra na variação das perdas de carga contínuas na galeria para $D=9,50m$.

Pela análise das figuras e tabelas apresentadas, verifica-se que, para cada um dos diferentes cenários de diâmetro, o comportamento oscilatório é bastante semelhante para os tempos de manobra simulados. A diferença é mais notória para diâmetros menores (figura 4.1), apesar de, ainda assim, ser bastante reduzida. Conclui-se, assim, que o tempo de manobra não assume especial relevância no comportamento da chaminé e da variação do seu nível de água, apesar de ser possível afirmar que, quanto menor esse tempo, maior a amplitude das oscilações.

Posto isto, para simulações posteriores, decidiu adotar-se um tempo de manobra de 20s por se entender ser um valor mais adequado, e intermédio dos tempos normalmente adotados.

4.3.3.2. Efeito da área transversal da chaminé de equilíbrio

No que respeita ao efeito da secção da chaminé de equilíbrio, este foi analisado comparando dois cenários distintos, com o tempo de manobra adotado de 20s. Comparou-se o comportamento para um diâmetro de 4,20m e um diâmetro de 9,50m. O primeiro corresponde ao diâmetro real da chaminé do aproveitamento do Caldeirão, e o segundo corresponde ao diâmetro obtido pela aplicação do critério de Thoma.

Os valores obtidos, correspondentes aos níveis máximo e mínimo para cada um dos cenários, são apresentados na tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Valores máximos e mínimos da variação do nível de água no interior da chaminé de equilíbrio para um tempo de manobra de 20s.

Varição	D = 4,20m	D = 9,50m
Nível mínimo [m]	-17,29	-6,91
Nível máximo [m]	18,29	8,40

Verifica-se uma grande discrepância, comparando os valores obtidos para cada um dos diferentes diâmetros. A análise da figura 4.9 ilustra, graficamente, o comportamento oscilatório para cada um dos casos. Conclui-se, facilmente, que a situação mais gravosa corresponde à de menor diâmetro, 4,20m, valor que será adotado para as simulações posteriores, uma vez que corresponde ao diâmetro real da chaminé.

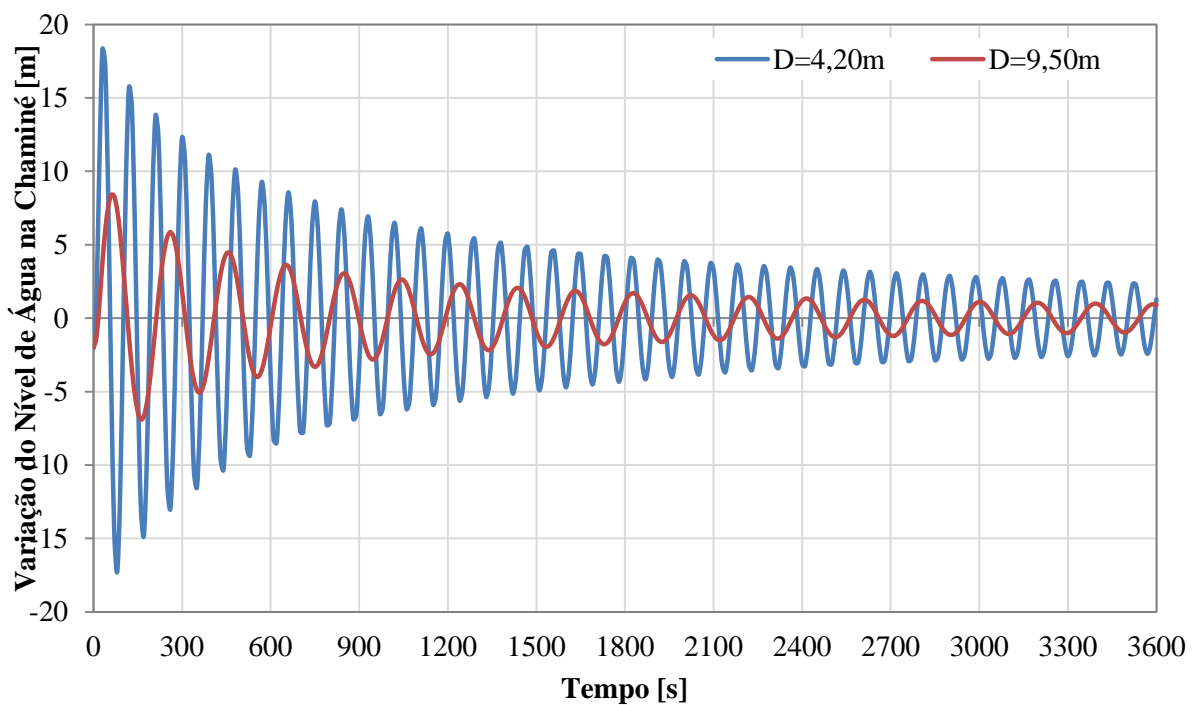


Figura 4.9 - Efeito do tempo de manobra na variação da amplitude de oscilação da água na chaminé para D=9,50m.

Note-se que os resultados obtidos não serão comparáveis com os reais, uma vez que neste trabalho é considerada uma chaminé de equilíbrio simples, de secção constante, o que não corresponde efetivamente ao que existe no aproveitamento do Caldeirão, onde a chaminé de equilíbrio existente tem uma câmara de expansão no seu topo e outra de alimentação na sua base.

4.3.3.3. Efeito do tipo de fecho: parcial ou total

Neste ponto pretende-se comparar o funcionamento para duas situações que se distinguem pelo tipo de fecho considerado: uma situação de fecho total e outra de fecho parcial. Em ambos os cenários, o diâmetro da secção transversal da chaminé de equilíbrio é de 4,20m (de acordo com o exposto no ponto anterior) e o tempo de manobra é de 20s.

O cenário de fecho total corresponde ao já simulado nos pontos anteriores, e traduz-se numa diminuição de caudal de 23 m³/s para um caudal nulo. Já o cenário de fecho parcial traduz uma diminuição de caudal de 23 m³/s para um caudal de 5 m³/s. Os valores máximos e mínimos da variação do nível de água são os apresentados na tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Valores máximos e mínimos da variação da oscilação do nível de água no interior da chaminé de equilíbrio para diferentes tipos de fecho.

Varição	Fecho Total	Fecho Parcial
Nível mínimo [m]	-17,29	-13,99
Nível máximo [m]	18,29	13,85

A figura 4.4 mostra a variação da oscilação do nível da água para ambos os cenários ao longo de uma hora. Verifica-se a diferença nos picos máximos e mínimos, de acordo com os valores apresentados na tabela 4.4, e é notória a diferença no amortecimento: neste cenário de fecho parcial, o amortecimento é quase completo ao fim de uma hora, ao passo que no cenário de fecho total, ao fim de 3600s ainda ocorrem oscilações na ordem dos 4 m.

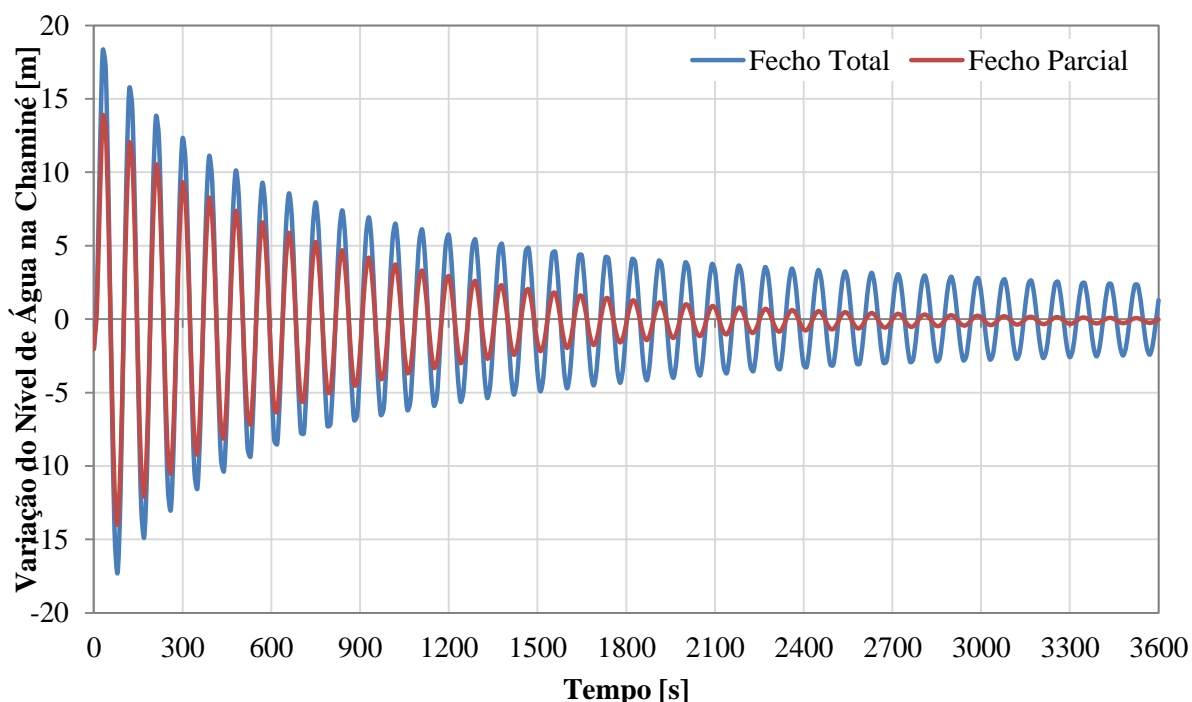


Figura 4.10 - Efeito do tipo de fecho na variação do nível de água na chaminé.

Confirma-se, assim, como era de esperar, que uma manobra de fecho parcial é menos gravosa que uma manobra de fecho total. Os níveis extremos atingidos pela primeira são, em módulo, mais baixos, e o amortecimento é atingido mais rapidamente.

4.3.3.4. Efeito das características da galeria em carga

Uma vez que a oscilação em massa, fenómeno que rege a variação do nível de água no interior da chaminé, ocorre também ao longo da galeria em carga, não seria possível desprezar o estudo da influência das suas características. Assim, decidiu-se comparar os resultados obtidos para a situação base definida nos pontos anteriores (fecho total em 20 s, e chaminé com diâmetro de 4,20 m) com diferentes características da galeria, nomeadamente diferentes comprimentos, diferentes secções e diferentes revestimentos, que se traduzem em diferentes rugosidades. Para cada uma destas características, compararam-se três diferentes cenários: o cenário equivalente aos dados reais do circuito, e cenários correspondentes a variações positivas e negativas de 10% em cada um desses parâmetros.

Começando por analisar a influência do comprimento da galeria em carga, a tabela 4.5 mostra os níveis extremos atingidos pela oscilação para os 3 cenários considerados: comprimento real, $L = 997\text{m}$, variação positiva de cerca de 10%, $L = 1100\text{m}$, e variação negativa de cerca de 10%, $L = 900\text{m}$.

Tabela 4.5 - Valores máximos e mínimos da variação da oscilação do nível de água no interior da chaminé de equilíbrio para diferentes comprimentos da galeria em carga.

Variação	L = 900m	L = 997m	L = 1100m
Nível mínimo [m]	-15,48	-17,29	-18,20
Nível máximo [m]	17,50	18,29	18,98

Pela análise dos valores da tabela 4.5 verifica-se que o comprimento da galeria assume uma pequena importância no que aos valores extremos diz respeito. Uma variação de 200m (20% do comprimento total) traduz-se, nesta situação, num aumento da variação da oscilação de cerca de 1,50m.

Pela análise da figura 4.11 constata-se que o amortecimento é semelhante para as três situações, mas destaca-se a diferença do período de oscilação nas várias situações, o que se traduz, na prática, num movimento mais acelerado, e numa mais rápida oscilação da massa de água ao longo da galeria. Os diferentes períodos estão apresentados na tabela 4.6, e são calculados pela expressão (3.41), onde se verifica, facilmente, a influência do comprimento da galeria, L .

$$T^* = 2\pi \sqrt{\frac{LF}{gf}} \quad (3.41)$$

Tabela 4.6 – Período de oscilação para diferentes comprimentos da galeria em carga.

	L = 900m	L = 997m	L = 1100m
Período de onda [s]	85,50	85,81	90,13

Apesar de a diferença ser de poucos segundos, torna-se notória ao fim de algum tempo, por acumulação dessa pequena diferença.

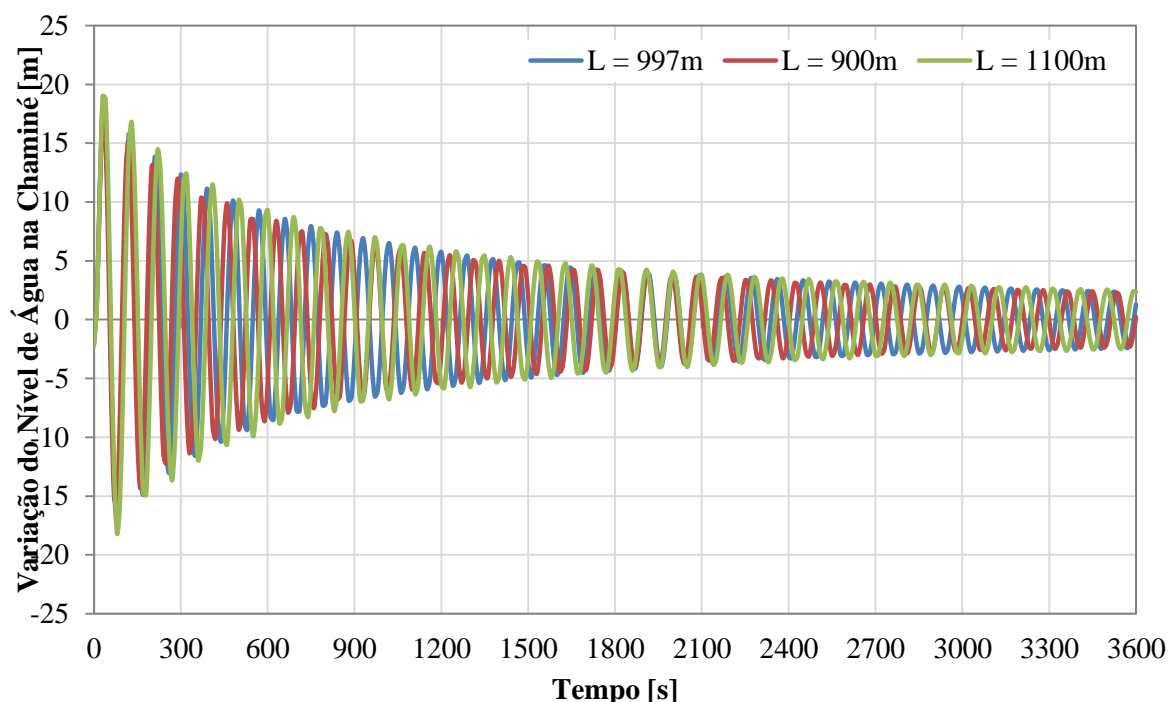


Figura 4.11 - Efeito do comprimento da galeria em carga na variação da oscilação do nível de água na chaminé.

Conclui-se, assim, para o caso em análise, que a variação do comprimento da galeria em carga tem relevância apenas na definição dos picos máximo e mínimo, em particular os iniciais, enquanto que o amortecimento se revela semelhante para todas as situações analisadas, uma vez que ao fim de uma hora a variação da oscilação é semelhante.

Quanto à variação da velocidade e das perdas de carga para os três diferentes comprimentos da galeria em carga verifica-se que a velocidade tem valores semelhantes para os mesmos instantes, apesar de períodos diferentes, figura 4.12, ao passo que as perdas de carga assumem valores diferentes uma vez que o valor da perda de carga contínua numa conduta é diretamente proporcional ao seu comprimento. No entanto, esta diferença vai-se dissipando com o tempo, figura 4.13.

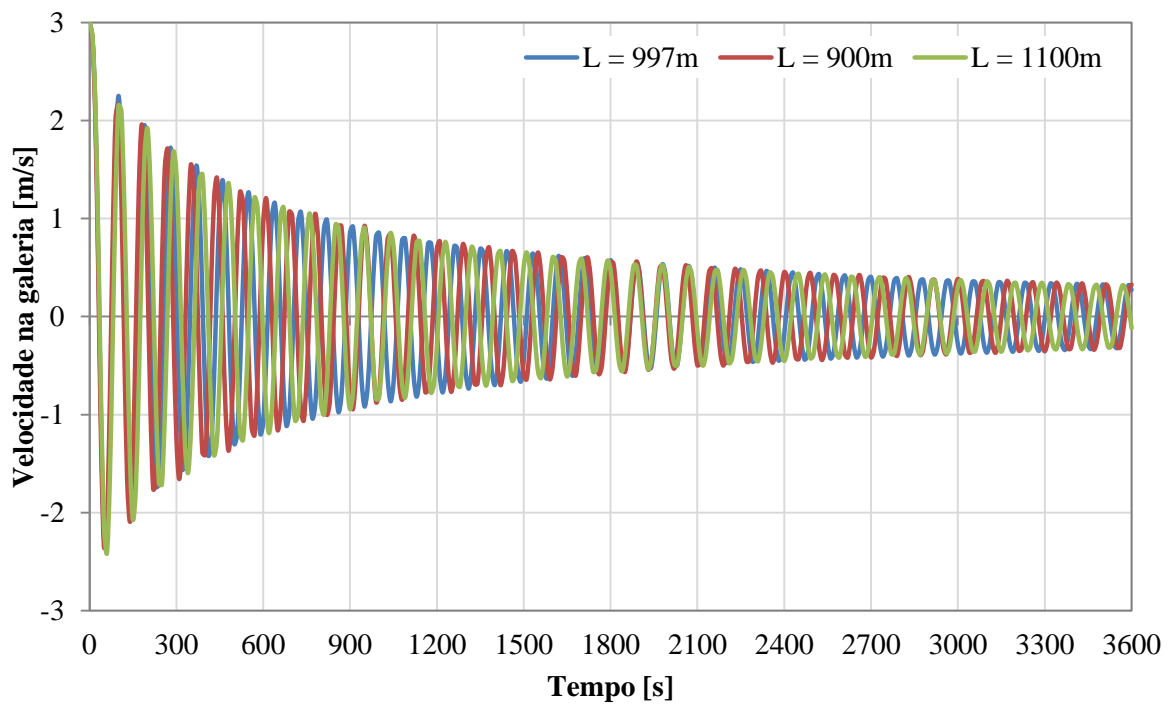


Figura 4.12 – Efeito do comprimento da galeria em carga na velocidade da água.

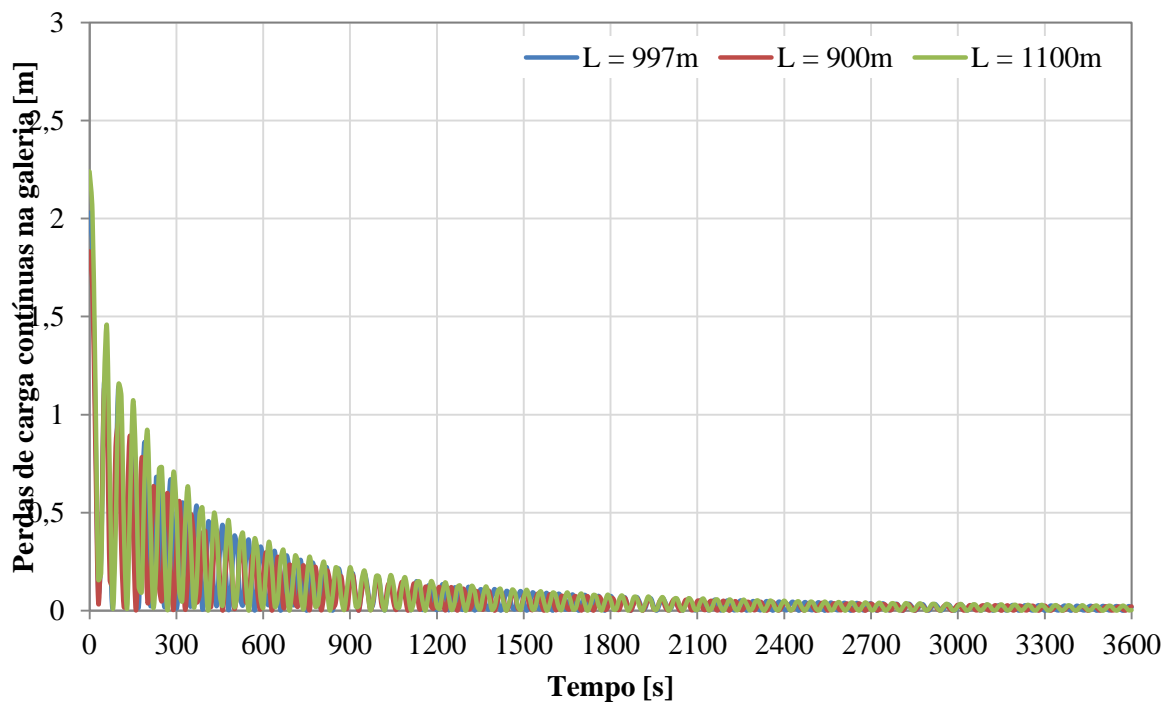


Figura 4.13 – Efeito do comprimento da galeria em carga na perda de carga contínua.

No que respeita ainda a características geométricas da galeria, simularam-se, também, cenários que considerassem a variação da sua secção. De acordo com o estudo efetuado para a variação do comprimento, também se estudou a variação positiva e negativa de 10% da secção, o que correspondeu a três

cenários distintos: secção real de $7,55 \text{ m}^2$; secção diminuída de 10%, $f = 6,8 \text{ m}^2$; e secção aumentada de 10%, $f = 8,3 \text{ m}^2$. A tabela 4.7 apresenta a variação máxima e mínima da oscilação na chaminé.

Tabela 4.7 - Valores máximos e mínimos da variação da oscilação do nível de água no interior da chaminé de equilíbrio para diferentes secções da galeria em carga

Variação	$f = 6,8\text{m}^2$	$f = 7,55\text{m}^2$	$f = 8,3\text{m}^2$
Nível mínimo [m]	-16,47	-17,29	-17,08
Nível máximo [m]	18,04	18,29	19,18

Verifica-se, portanto, que a variação dos níveis extremos não é muito significativa, pelo que se assume que a variação da secção da galeria em carga não se traduz em variações significativas da oscilação. Importa referir que os níveis extremos são maiores, em módulo, quanto maior for a secção. Isto não corresponde inteiramente ao apresentado na tabela 4.7, nomeadamente comparando o nível mínimo da secção $f=7,55 \text{ m}^2$ e secção $f=8,3 \text{ m}^2$, devido à ligeira imprecisão associada ao método das diferenças finitas, que apenas permite o cálculo por intervalos de tempo. O intervalo de tempo adotado em todos os pontos deste trabalho é de 10s, o que é um valor bastante preciso (Stucky, 1958 e Ribeiro, 1971), apesar de estar sempre sujeito a pequenos erros como o que se verifica nesta situação.

Pela análise da figura 4.14, confirma-se a semelhança no que respeita aos valores máximos e mínimos atingidos, e verifica-se que o amortecimento é muito semelhante para os três cenários. Tal como na análise ao comprimento da galeria, é notória uma diferença no período de oscilação. A tabela 4.8 apresenta os valores do período para as três situações.

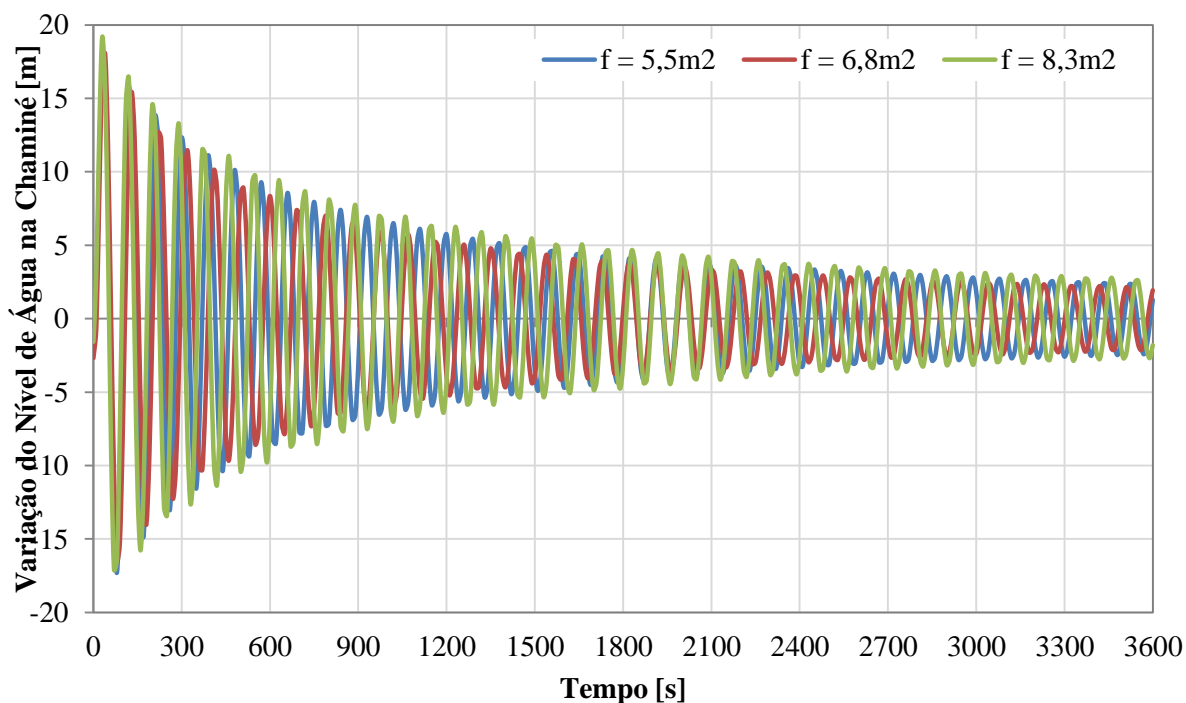


Figura 4.14 - Efeito da secção da galeria em carga na variação da amplitude de oscilação do nível de água na chaminé.

Tabela 4.8 – Período de oscilação para diferentes secções da galeria em carga

	$f = 6,8 \text{ m}^2$	$f = 7,55 \text{ m}^2$	$f = 8,3 \text{ m}^2$
Período de oscilação [s]	90,41	85,81	81,84

Foi feita, também, a análise à velocidade e perda de carga contínua na galeria em carga. Os valores da velocidade são semelhantes para os três cenários simulados, figura 4.15, ao passo que a perda de carga contínua assume valores distintos, com valores maiores para secções menores, confirmando-se assim que quanto maior a secção, menor a perda de carga contínua, figura 4.16.

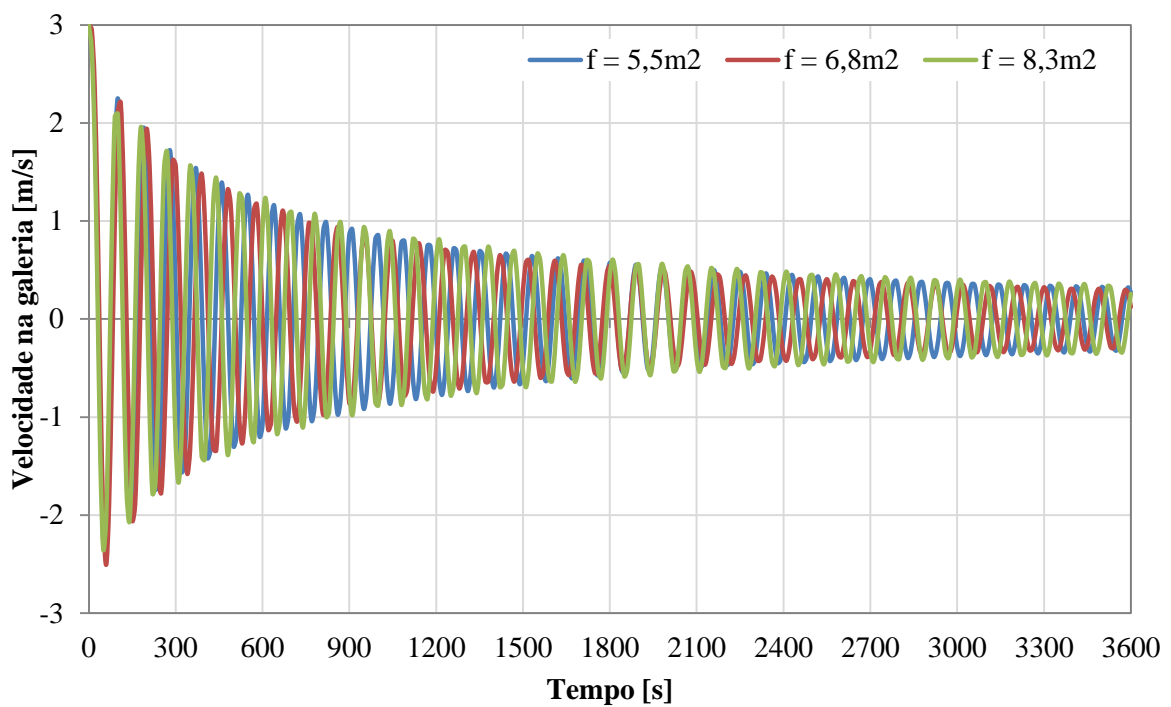


Figura 4.15 – Efeito da secção da galeria em carga na velocidade da água.

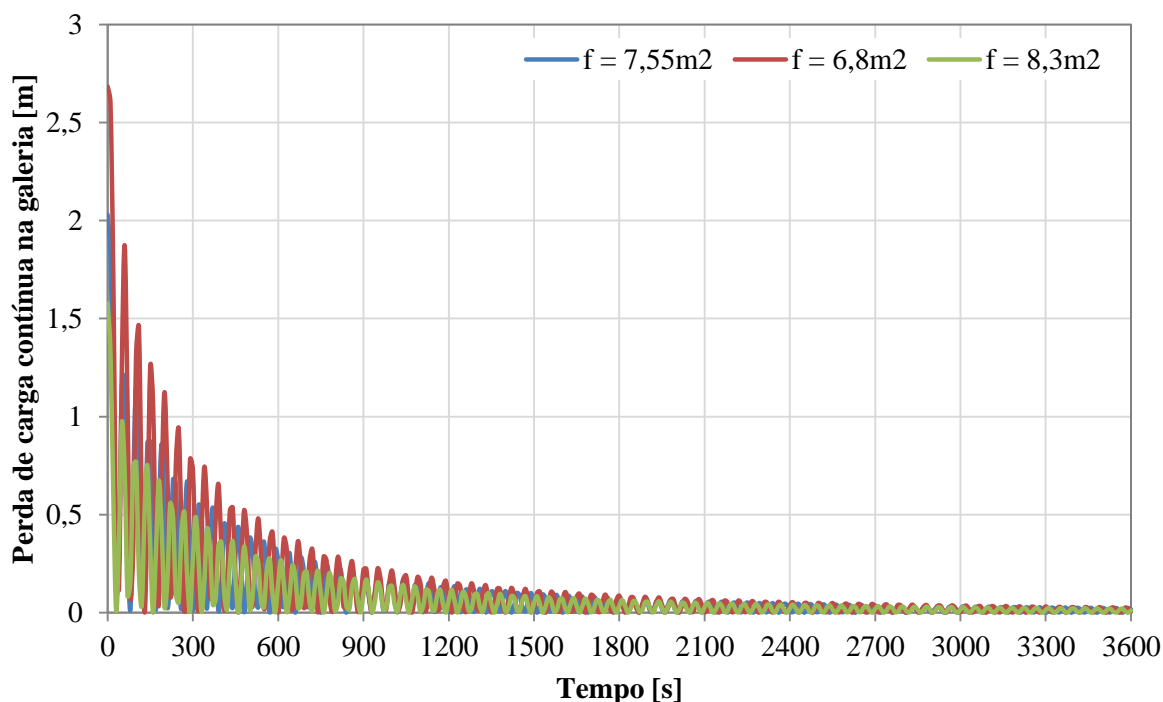


Figura 4.16 – Efeito da secção da galeria em carga nas perdas de carga contínuas

A outra característica da galeria em carga a ser analisada é a sua rugosidade, traduzida pelo coeficiente de rugosidade de Manning-Strickler, K_S . Foi igualmente considerada uma variação positiva e negativa de 10% em relação ao valor real, de $80 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$.

Os valores obtidos são os apresentados na tabela 4.9.

Tabela 4.9 - Valores máximos e mínimos da variação da oscilação do nível de água no interior da chaminé de equilíbrio para diferentes coeficientes de rugosidade da galeria em carga.

Varição	$K_S = 72 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$	$K_S = 80 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$	$K_S = 88 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$
Nível mínimo [m]	-16,85	-17,29	-17,63
Nível máximo [m]	18,01	18,29	18,49

A análise da figura 4.17 permite a visualização das conclusões observadas na tabela 4.9. As variações de K_S analisadas não revelam grande influência no fenómeno de oscilação em massa. Os níveis na chaminé de equilíbrio são bastante semelhantes, e o seu amortecimento é praticamente igual ao longo do tempo para os três cenários. Pode-se concluir, então, que o efeito do coeficiente de rugosidade é pouco significativo para os valores de K_S analisados.

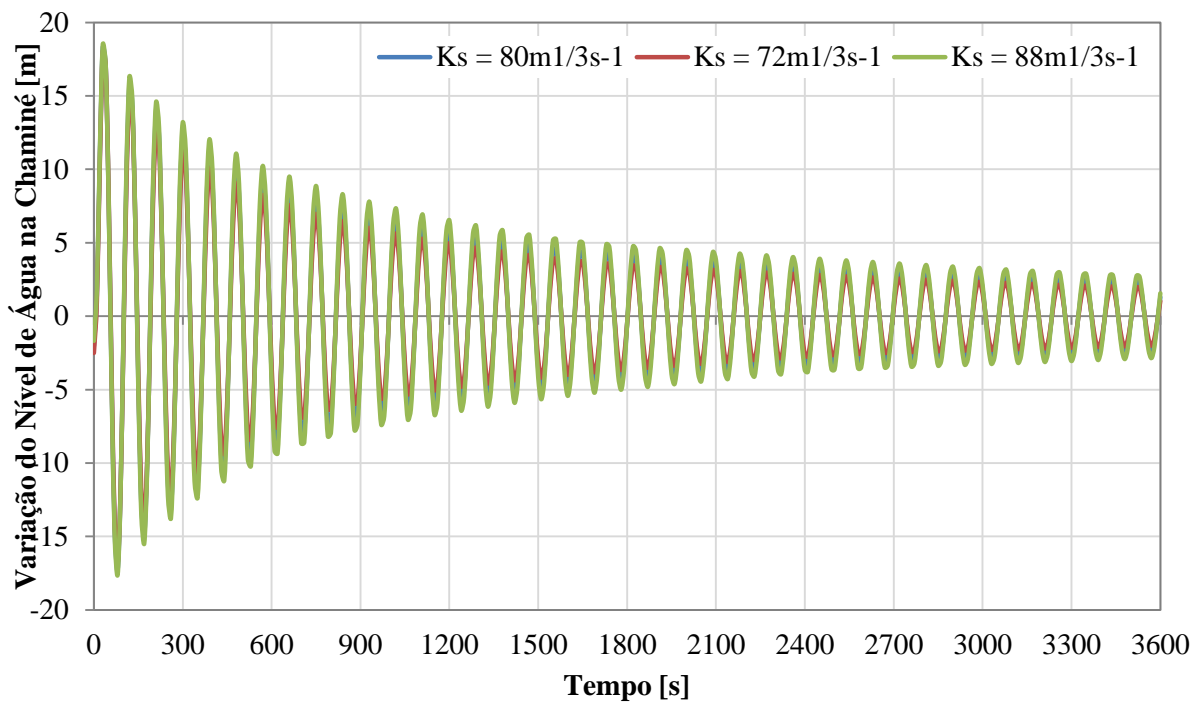


Figura 4.17 - Efeito da rugosidade da galeria em carga na variação do nível de água na chaminé.

Relativamente à velocidade e perda de carga contínua, a primeira praticamente não apresenta variações para os três cenários, figura 4.18, ao passo que a segunda apresenta diferenças naturais uma vez que depende diretamente da rugosidade do canal. Assim, a perda de carga contínua é maior quanto menor for a rugosidade da galeria em carga, figura 4.19.

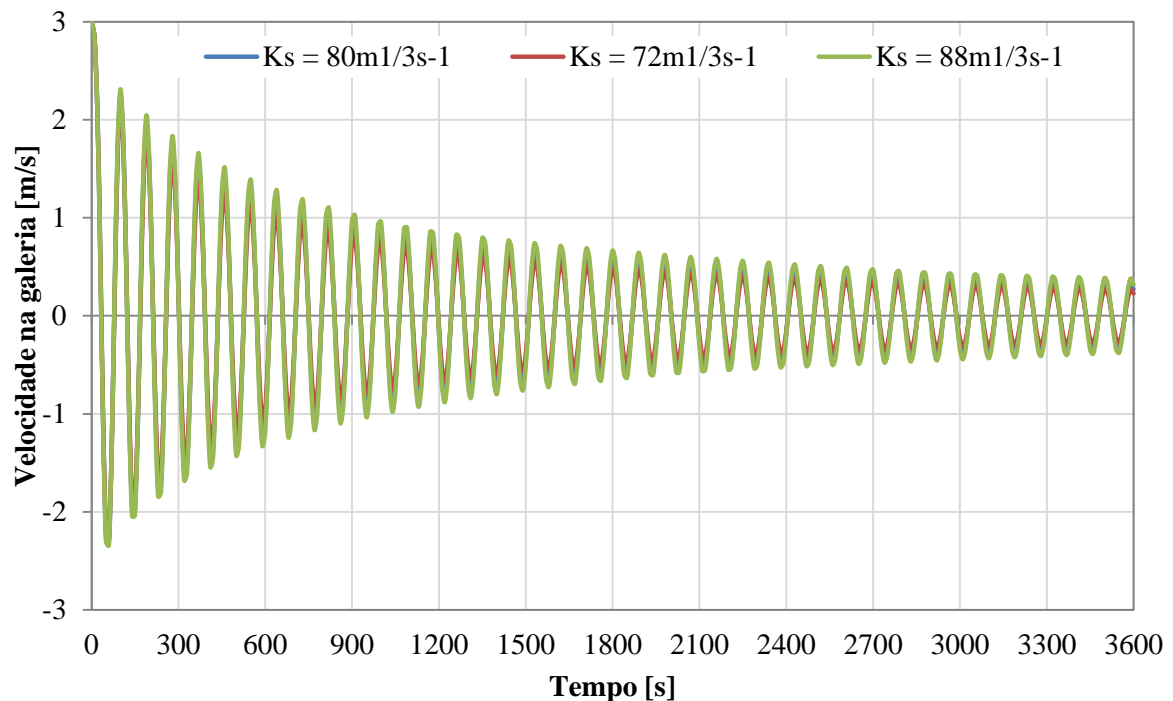


Figura 4.18 – Efeito da rugosidade da galeria em carga na velocidade da água.

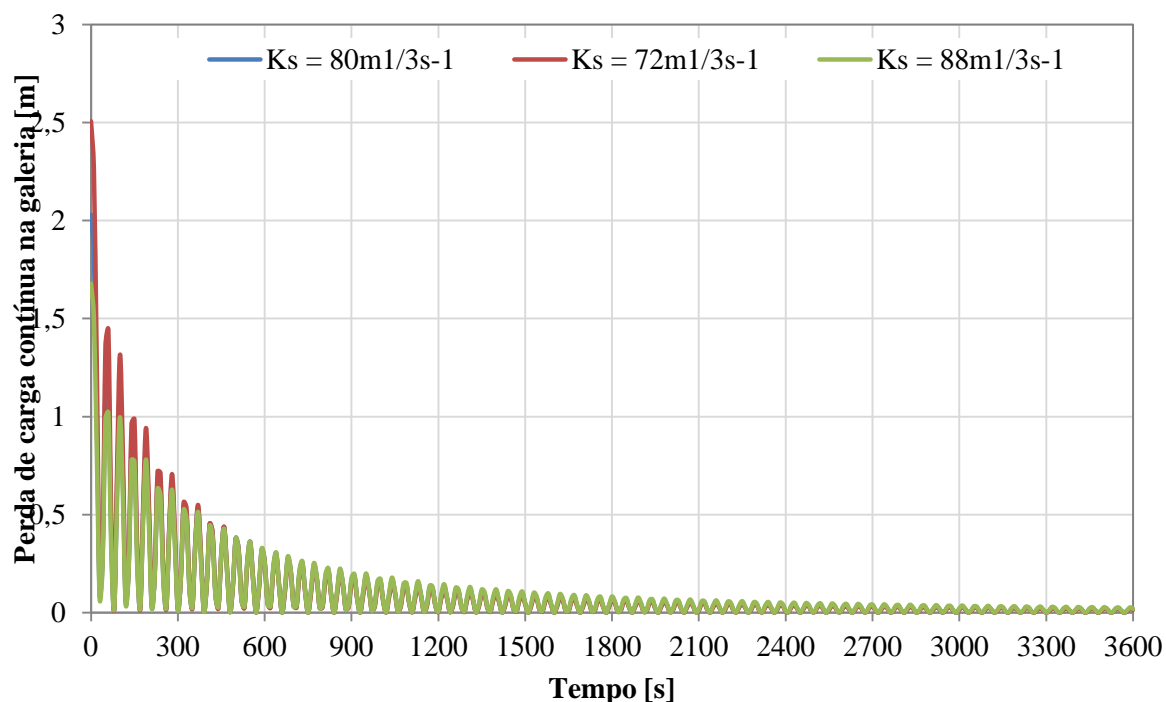


Figura 4.19 – Efeito da rugosidade da galeria em carga na perda de carga contínua.

4.3.3.5. Efeito da perda de carga inicial

Numa perspetiva meramente académica poder-se-á, igualmente, simular um cenário em que se desprezam as perdas de carga ao longo da galeria em carga. O interesse desta simulação reside no facto de esta ser a situação teórica mais gravosa.

Dessa forma, procedeu-se à simulação de um fecho total, também em 20s, aplicando a metodologia descrita no ponto 3.2.4.1. Os valores de pico atingidos foram os apresentados na tabela 4.10.

Tabela 4.10 – Valores máximos e mínimos da variação da oscilação do nível de água no interior da chaminé de equilíbrio em cenários com e sem perdas.

Varição	Com Perdas	Sem Perdas
Nível mínimo [m]	-17,29	-19,73
Nível máximo [m]	18,29	19,73

A análise da figura 4.20 permite observar, facilmente, que na situação sem perdas não há qualquer amortecimento da oscilação. Isto é natural, uma vez que o amortecimento da oscilação se deve à perda de energia que ocorre no contacto da massa de água com as paredes da galeria em carga. Desprezando este parâmetro, o amortecimento é inexistente. Daí o interesse unicamente teórico desta simulação.

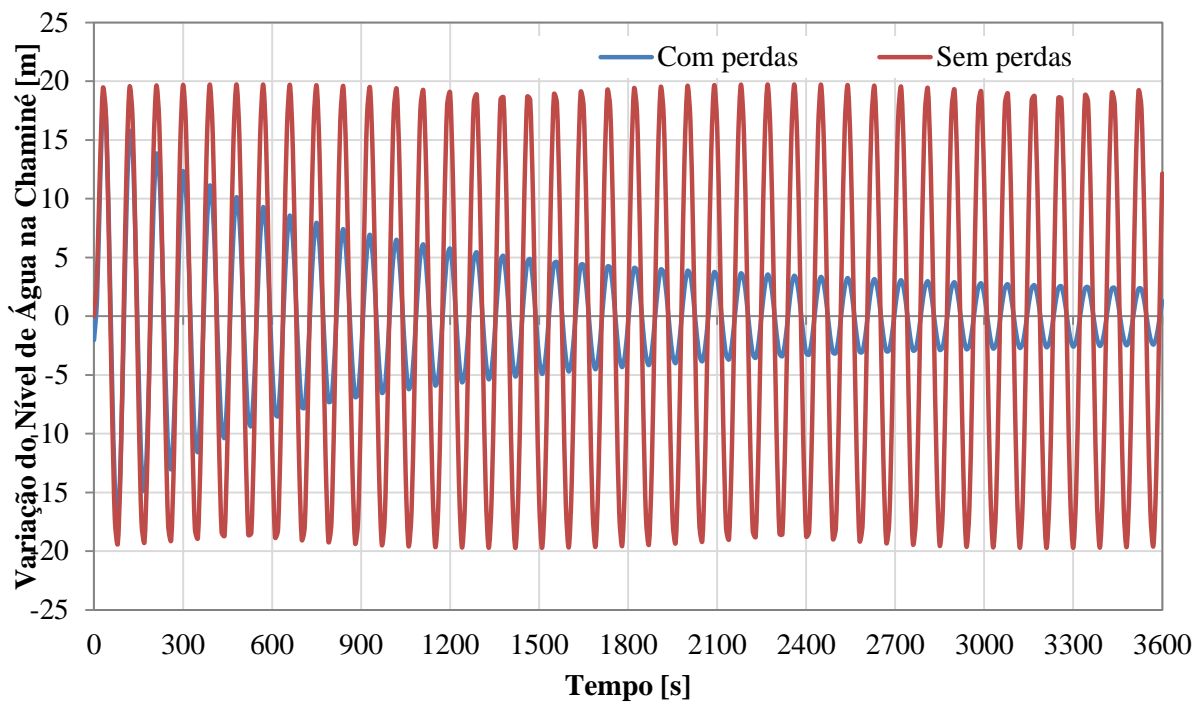


Figura 4.20 - Efeito das perdas na galeria em carga na variação do nível de água na chaminé.

Ainda no que respeita à análise da velocidade na galeria, constata-se facilmente que no cenário sem perdas a velocidade não sofre qualquer amortecimento fruto da inexistência de um parâmetro que a faça reduzir com o tempo, figura 4.21. É, igualmente, representada a diferença de comportamento do parâmetro das perdas de carga no cenário em que são consideradas, comparativamente ao cenário em que são consideradas nulas, figura 4.22.

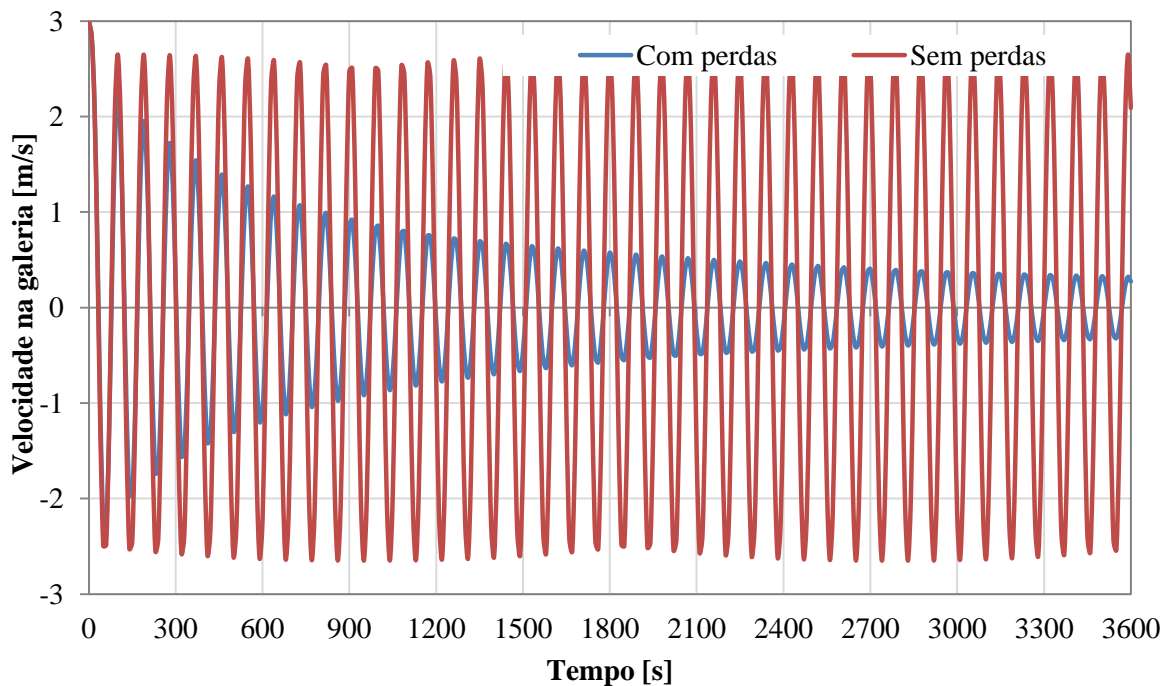


Figura 4.21 – Efeito das perdas de carga na galeria na velocidade da água.

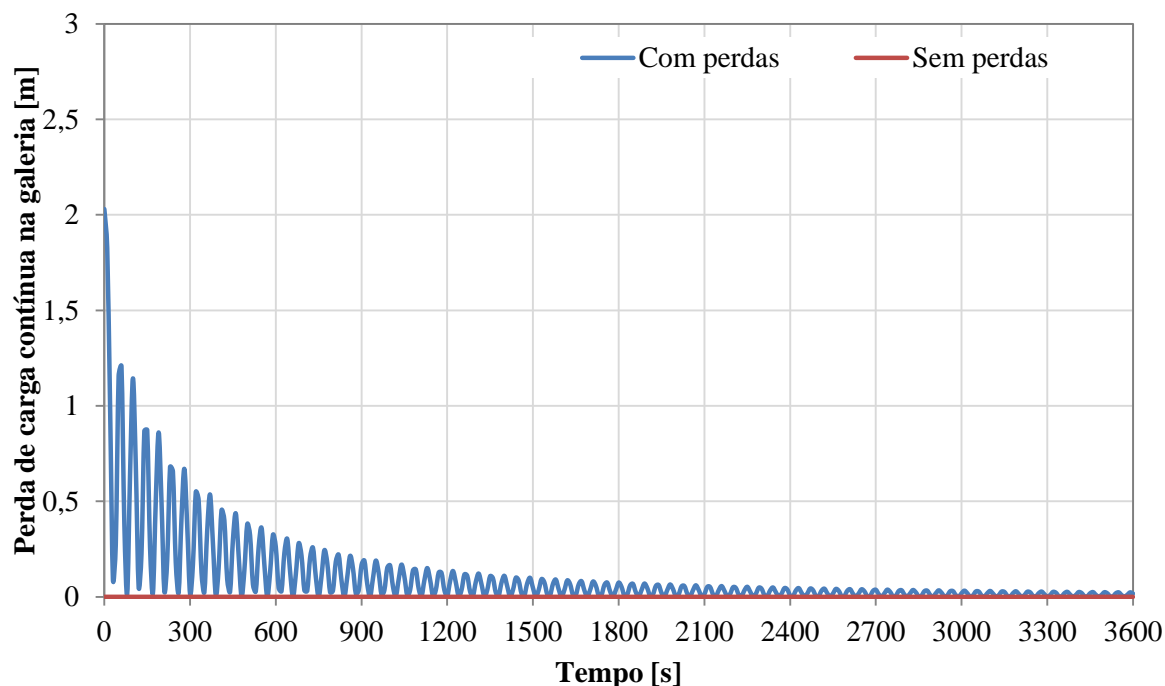


Figura 4.22 – Perdas de carga em cenários considerando e desprezando as perdas de carga contínuas.

4.3.3.6. Síntese dos resultados

A tabela 4.11 apresenta os valores da variação máxima e mínima da oscilação para todos os cenários analisados neste capítulo. Verifica-se que, no que respeita ao tempo de manobra, quanto menor for este parâmetro mais gravosa é a situação. No entanto, este cenário pode não ser realista por impossibilidade de manobrar os equipamentos em tão curto espaço de tempo.

A área da chaminé assume, como se pode verificar, uma elevada importância no dimensionamento da altura da chaminé, pelo que a sua correta definição é fundamental.

No que respeita às características da galeria em carga, constata-se que, apesar de todos os parâmetros apresentarem variações nos valores máximos e mínimos, as mais significativas ocorrem com a variação do comprimento da galeria em carga.

Verifica-se, também, que o tipo de fecho provoca comportamentos diferentes. Um fecho parcial conduz a uma situação com variações menores do que um fecho total, uma vez que o regime transitório a si associado é menos gravoso.

Por fim, confirma-se que o cenário sem perdas é mais desfavorável apesar do seu interesse puramente teórico.

Tabela 4.11 – Tabela-síntese com os valores da variação da oscilação do nível de água no interior da chaminé de equilíbrio para todos os cenários considerados.

Variação	D = 4,20m			D = 9,50m			D=4,20m $\tau= 20s$
	$\tau = 10s$	$\tau = 20s$	$\tau = 30s$	$\tau = 10s$	$\tau = 20s$	$\tau = 30s$	Fecho parcial
Nível mínimo [m]	-17,85	-17,29	-15,39	-6,95	-6,91	-6,80	-13,99
Nível máximo [m]	19,89	18,29	17,08	8,54	8,40	8,32	13,85

Variação	D = 4,20m $\tau = 20s$						
	L=900m	L=1100m	f=6,8m ²	f=8,3m ²	K _s =72m ^{1/3} s ⁻¹	K _s =88m ^{1/3} s ⁻¹	Sem perdas
Nível mínimo [m]	-15,48	-18,20	-16,47	-17,08	-16,85	-17,63	-19,73
Nível máximo [m]	17,50	18,98	18,04	19,18	18,01	18,49	19,73

De acordo com os resultados obtidos ao longo deste trabalho pode-se, então, concluir que:

- Uma variação de 200% do tempo de manobra traduziu-se numa variação de 16% dos níveis mínimo e máximo;
- Uma variação de 126% do diâmetro da chaminé representou uma variação de 150% do nível mínimo e de 117% do nível máximo;
- Variando o comprimento da galeria em carga de 20%, o nível mínimo registou uma variação de 18%, ao passo que o nível máximo registou uma variação de 9%;
- No que respeita à secção da galeria em carga, a sua variação em 20% originou uma variação de 4% do nível mínimo e de 6% do nível máximo;
- Por fim, a variação de 20% do coeficiente de rugosidade implicou uma variação de 5% do nível mínimo e de 3% do nível máximo.

5

MÉTODO CONSTRUTIVO

5.1. INTRODUÇÃO

As chaminés de equilíbrio são, na maioria das situações, estruturas subterrâneas. Dessa forma, a sua construção exige uma análise cuidadosa e diferencia-se, naturalmente, o método construtivo das chaminés, ou troços das chaminés, situadas à superfície daquelas situadas em troços subterrâneos.

Nas chaminés de equilíbrio situadas à superfície, o método construtivo revela-se relativamente simples sendo, normalmente, realizadas em betão ou aço, e cuja construção pode ser feita “*in situ*” ou por pré-fabricação, figura 5.1.



Figura 5.1 – Exemplo de uma chaminé de equilíbrio de betão, construída “*in situ*” (à esquerda), e uma chaminé pré-fabricada em aço (à direita). [3]

As chaminés de equilíbrio subterrâneas são, numa perspetiva geotécnica, um poço ou escavação, normalmente vertical, de secção limitada. Durante muito tempo, a construção deste tipo de estruturas era efetuada com recurso a técnicas de perfuração ou de explosivos. Na atualidade, de modo a evitar as dificuldades que estas técnicas apresentam, desenvolveram-se vários métodos mecânicos, os quais

apresentam vantagens relativamente às técnicas de perfuração ou de explosivos, que se podem resumir em (Díez, J., 2011):

- Maior segurança para os trabalhadores, uma vez que, geralmente, não é necessário que estes se encontrem dentro das escavações aquando da execução dos trabalhos, e nos casos em que isso é necessário, os trabalhadores dispõem de maior segurança comparativamente às situações em que são utilizados os métodos explosivos ou de perfuração;
- Menos impacto sobre o terreno, o que se traduz numa maior estabilidade da rocha, que não se deteriora com as explosões;
- Obtenção de superfícies mais lisas, o que implica menores custos nos processos de alisamento das paredes;
- Melhores rendimentos em menos tempo de execução, o que significa menores custos.

Por estas razões, e por muitas outras não enumeradas, as técnicas mecânicas têm vindo a ser cada vez mais utilizadas na engenharia civil, aproveitando-se do grande desenvolvimento a que os equipamentos estão sujeitos.

Na construção de chaminés de equilíbrio, também se verifica a tendência de utilização deste tipo de técnicas, sendo a mais utilizada, e descrita neste capítulo, a técnica do raise boring.



Figura 5.2 – Chaminé de equilíbrio em construção [4]

5.2. RAISE BORING

A técnica do raise boring pode-se incluir, dentro das técnicas mecânicas, num grupo de técnicas que se caracterizam pela utilização de um furo piloto (Diez, J., 2011).

O raise boring, consiste, muito basicamente, na execução mecânica de um poço ou chaminé, entre dois ou mais níveis, podendo estes ser todos subterrâneos, ou o superior encontrar-se à superfície (Diez, 2011).

Esta técnica deu os seus primeiros passos na década de 50, nos Estados Unidos da América e, desde então, tem vindo a sofrer grandes avanços tecnológicos, principalmente no que respeita aos seus equipamentos. De acordo com Diez (2011), a sua primeira utilização reporta a 1962, na execução de uma

mina em Michigan, EUA. Com o desenvolvimento tecnológico, esta técnica tornou-se prática comum em inúmeras construções em todo o Mundo.

A aplicação da técnica pode ser dividida em duas fases (Fevereiro, 2011):

- Uma primeira fase, em que se realiza um furo piloto, de orientação descendente, com um diâmetro reduzido, Figura 5.1.a);
- E uma segunda fase, em que, atingida a profundidade desejada pelo furo piloto, é acoplada uma cabeça de maior diâmetro, o qual fará o furo ascendente mais alargado, Figura 5.2.b).

À medida que a execução do furo vai sendo realizada, surge a necessidade de remover o escombro resultante da furação, remoção feita pelo nível inferior, Figura 5.1.c).

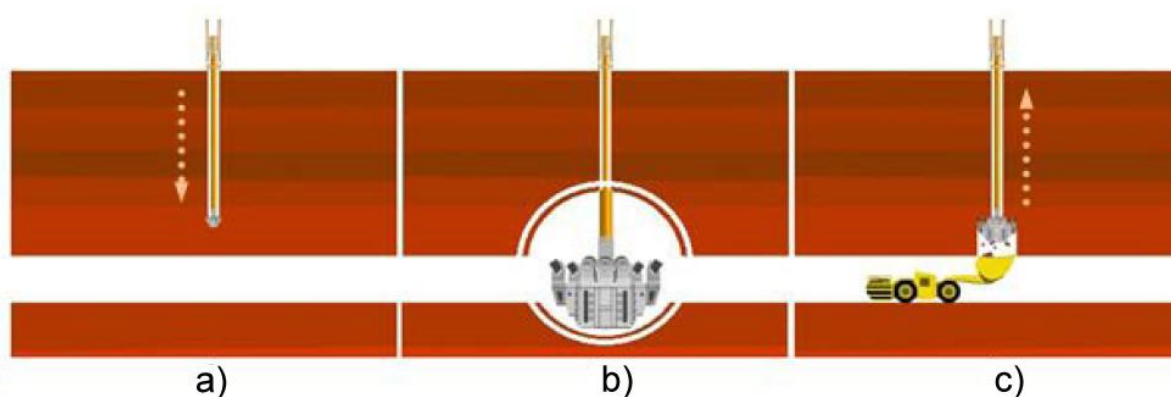


Figura 5.3 – Figura ilustrativa das diferentes fases de ação do raise boring (adaptado de Fevereiro, 2011)

5.2.1. RAISE BORING CONVENCIONAL COM FURO-PILOTO

Geralmente, o raise boring consiste, tal como descrito no ponto anterior, numa furação descendente até atingir o nível inferior, para posteriormente se acoplar uma cabeça rotativa, efetuando-se, de seguida, o movimento no sentido ascendente, aumentando, assim, o diâmetro do furo (Nunes, 2011).

O diâmetro e profundidade do poço estão limitados à capacidade do equipamento, com especial destaque à capacidade da broca perfuradora. Apesar da gama geral de equipamentos variar entre valores de diâmetro inferiores a 1m até cerca de 6m, e capazes de atingir profundidades de 200m, o maior poço realizado com esta técnica, segundo Díez (2011), localiza-se em Primsmulde, Alemanha, e atinge uma profundidade de 1260m.

A execução deste método construtivo pressupõe a necessidade de um duplo acesso: no nível superior e no nível inferior. No caso particular das chaminés de equilíbrio, o nível superior corresponde, na maioria dos casos, à superfície, ao passo que o nível inferior corresponde à galeria em carga. É, inclusivamente, ao longo da galeria em carga que é efetuada a remoção dos escombros resultantes da furação.

A máquina de raise boring (*Raise Boring Machine* – RBM) é composta por vários elementos como o corpo principal, com componentes fabricados em aço de alta qualidade, que proporcionam a base es-

trutural do equipamento, permitindo suportar as cargas solicitadas e as forças requeridas, e constituído por um buraco central que permite o deslocamento da broca principal, figura 5.4. A broca consegue a sua movimentação graças a conjunto de equipamentos mecânicos e elétricos que permitem a transmissão de energia necessária ao deslocamento e rotação das ferramentas de corte. A broca de perfuração é formada por barras e estabilizadores e atinge pesos elevados, na ordem das centenas de quilogramas (Diez, 2011).



Figura 5.4 – Máquina de Raise Boring (Net)

5.2.2. PROCEDIMENTOS DE EXECUÇÃO

Uma vez definido o local de execução dos trabalhos, e feita a preparação do local, que consiste na instalação do equipamento na posição pretendida, inicia-se a furação através do furo-piloto, figura 5.5. A broca central é fixada ao corpo principal do equipamento e inicia o movimento descendente, sempre suportada por uma série de estabilizadores que procuram minimizar o desvio relativamente ao trajeto definido. Este é, aliás, um aspeto que assume elevada importância, uma vez que se procura manter a verticalidade da furação, de modo a manter uma boa ligação da chaminé de equilíbrio à galeria em carga. A dificuldade em consegui-lo é tanto maior, quanto maior o comprimento da furação. Este eventual desvio é consequência da formação rochosa, do tipo de rocha e, igualmente, da experiência dos operários. Estes desvios, se em proporções significativas, podem acarretar custos elevados, pelo que devem ser minimizados ao máximo (Díez, 2011). No Reforço de Potência de Venda Nova II, a construção da chaminé de equilíbrio superior foi efetuada com recurso ao raise boring. A sua grande profundidade, na ordem dos 420m, constituiu um desafio no que respeita à verticalidade do furo. No entanto, o método revelou-se extremamente eficiente, uma vez que no fundo do furo, o desvio era de apenas 13,9cm. [5]



Figura 5.5 – Exemplo de furo-piloto na aplicação da técnica de raise boring (adaptado de Díez, 2011)

Deve-se iniciar o furo lentamente, com baixa rotação. Após atingir uma determinada profundidade, instala-se o primeiro estabilizador, momento em que se pode reajustar a direção do furo. À medida que o furo se vai desenvolvendo, vão-se instalando os vários estabilizadores. O furo-piloto vai furando a rocha com a ajuda de um tricône de perfuração instalado na extremidade final, figura 5.6. Este elemento deve ter dimensões reduzidas para preservar a exatidão do diâmetro do furo piloto e evitar desvios, assim como ferramentas de corte altamente resistentes ao desgaste que, no entanto, devem dispor da capacidade de serem substituídas quando esse mesmo desgaste se revelar excessivo. Chegados à extremidade final, mede-se, então, o desvio obtido em todo este processo.



Figura 5.6 – Exemplo de um tricône de perfuração (Sandvik)

De acordo com Díez (2011), recomenda-se, para o furo piloto, que a carga máxima da broca ao longo da perfuração seja, em toneladas, o triplo do diâmetro da broca medido em polegadas e, ao mesmo tempo, que a velocidade de rotação não exceda as 30 a 60 rotações por minuto. Estes valores dependem sempre das características da rocha, mas nunca devem exceder estes máximos. É preferível reduzir à velocidade de rotação do que à carga.

Finalizada a primeira fase, correspondente à furação descendente, começa a segunda fase que consiste na furação ascendente de maior diâmetro que a primeira.

Primeiramente há que executar uma série de operações preliminares como a instalação de comunicações e retirar os estabilizadores instalados ao longo do furo. O alargamento do furo é feito com recurso a uma cabeça rotativa que é acoplada ao furo piloto que fez o trajeto descendente e que é agora movimentada no sentido ascendente, aumentando o diâmetro do furo existente, figura 5.7.



Figura 5.7 – Exemplo de uma cabeça de corte (Sandvik)

Este processo deve ser feito com cuidado, de modo a evitar danos na cabeça rotativa. A escavação da rocha é feita por corte e cisalhamento até atingir o diâmetro final pretendido (Díez, 2011). Recomenda-se uma carga máxima de 27 t, e uma velocidade máxima de rotação que depende do diâmetro da cabeça de corte, de acordo com a figura 5.8:

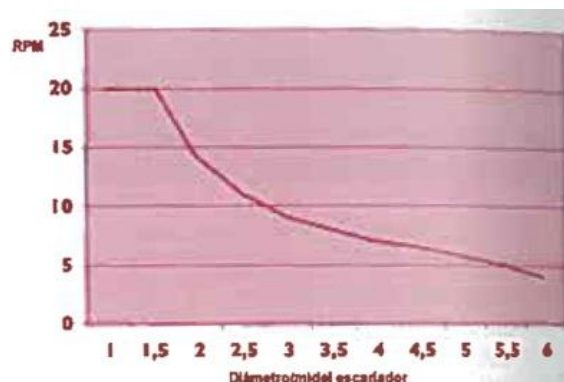


Figura 5.8 – Relação entre o diâmetro da cabeça de corte e a velocidade de rotação máxima (Díez, 2011).

Estes valores máximos devem ser sempre respeitados, sendo que é preferível reduzir a velocidade de rotação em detrimento da carga.

A escolha da cabeça de corte é de crucial relevância para o rendimento da máquina e conseqüente sucesso da obra. Geralmente, a cabeça de corte pode assumir diversas formas, como as exemplificadas na figura 5.9, sendo a forma plana a que obtém maior rendimento (Díez, 2011).

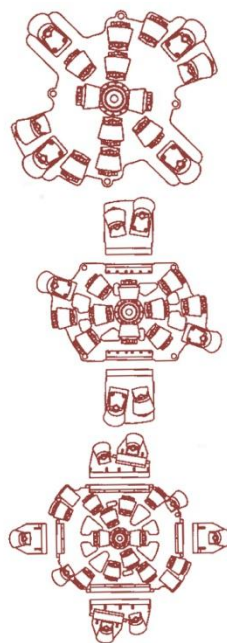


Figura 5.9 – Exemplos de diferentes formas da cabeça de corte (Díez, 2011)

Com o desenvolvimento da tecnologia, estas cabeças tendem a assumir formas mais flexíveis, em que os seus componentes são aparafusados uns aos outros facilitando a sua montagem, o que significa que se pode ter uma cabeça base à qual são ligadas partes extensíveis com mais utensílios de corte. Isto, além de aumentar a qualidade da execução da obra, variando a gama de diâmetros disponíveis, permite um transporte e manuseamento do equipamento mais fácil.

As cabeças de corte são equipadas com utensílios de corte, como discos ou ripadores, com a função de proceder ao desmantelamento da rocha, figura 5.10. Estes cortadores giram sobre si mesmos em contacto com a rocha, rompendo-a com a sua penetração. A velocidade de penetração depende do tipo de utensílio de corte e também do tipo de rocha e sua resistência à compressão simples. É necessário ter em atenção que os cortadores não atuem com força tal que levem à fissuração da rocha nas zonas envolventes, o que pode induzir a sua rotura.



Figura 5.10 – Exemplo de um utensílio de corte que se instala na cabeça rotativa (Sandvik)

Segundo Díez (2011), consideram-se três tipos de cortadores: discos cortadores, cortadores dentados e cortadores com inserções de rolos de metal.

Os primeiros, os discos cortadores, figura 5.11, aplicam-se a rochas com resistência à compressão entre os 7 MPa e os 300 MPa. São constituídos por um disco, com espessura fina, proporcionando uma reduzida área de contacto com a rocha, o que favorece uma penetração profunda e produz grandes pedaços de rocha.



Figura 5.11 – Discos cortadores (Díez, 2011).

Os cortadores dentados são formados por uma série de estruturas de corte ligadas a um único rolamento. São utilizados para rochas mais brandas, pelo que a sua utilização é mais reduzida comparativamente com a dos discos cortadores, figura 5.12.



Figura 5.12 – Cortadores dentados (Díez, 2011).

Os cortadores com inserções de rolos de metal são apropriados para rochas muito duras, e são os mais utilizados, figura 5.13. Têm a particularidade de se poder adaptar o espaçamento entre os vários rolos, pelo que a sua utilização é mais polivalente, permitindo adequar o cortador à rocha a aplicar, o que se traduz na economia do processo, figura 5.14. O aspeto negativo relacionado com este tipo de cortador tem a ver com a alta percentagem de finos produzidos como consequência da furação, o que origina problemas na sua remoção.

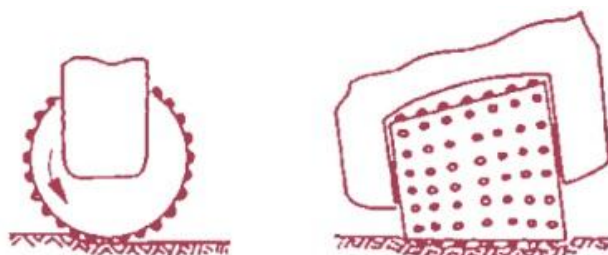


Figura 5.13 – Cortador com inserções de rolo de metal (Díez, 2011).

A manutenção destes utensílios é de elevada importância já que se encontram a trabalhar em condições extremas, com cargas elevadas e em altas temperaturas. É, assim, necessária uma constante lubrificação para evitar desgaste excessivo.

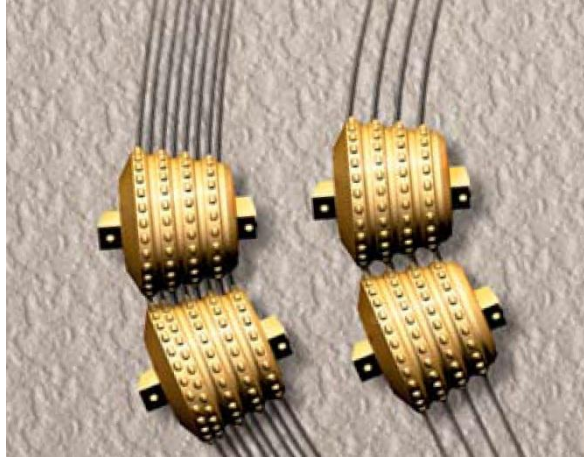


Figura 5.14 – Exemplo dos diferentes espaçamentos entre os rolos de metal (Sandvik)

De forma resumida, Díez (2011), apresenta uma tabela que relaciona o diâmetro final do furo com o número de cortadores a utilizar na cabeça de corte, Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Relação entre o diâmetro final do furo e o número de cortadores (Díez, 2011).

Diâmetro final [m]	Número de Cortadores
1,5	8
1,8	10
2,1	12
2,5	14
2,7	14
3,0	16
3,5	22
4,0	26

Díez (2011), apresenta um estudo relativo aos custos e rendimentos da técnica raise boring. Assim, na tabela 5.2 apresenta-se a percentagem que cada componente do processo representa nos custos totais da aplicação da técnica.

Tabela 5.2 – Custos da técnica do raise boring (Díez, 2011).

Componente	Porcentagem do custo total [%]
Movimentação de terras	2 – 20
Preparação do terreno	5 – 15
Preparação subterrânea	2 – 6
Custo do furo piloto	2 – 15
Custo da cabeça de corte	30 – 60
Custo de mão-de-obra	5 – 12
Manutenção	5 – 10

O rendimento, ou seja, a quantidade de rocha cortada por dia, da técnica, para diferentes diâmetros do furo piloto e do furo ascendente são apresentados na tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Rendimentos diários em função dos diâmetros de furação. (Díez, 2011)

Diâmetros	Rendimento diário [m/dia]
Furo piloto 12 ¼’’	12 a 20
Furo piloto 13 ¾’’	10 a 15
Cabeça de corte de 1,5 m	12 a 20
Cabeça de corte de 2,5 m	8 a 14
Cabeça de corte de 3,0 m	6 a 10
Cabeça de corte de 3,5 m	4 a 8

6

CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Esta dissertação teve com principal objetivo conhecer e analisar o funcionamento e dimensionamento de uma chaminé de equilíbrio simples integrada no circuito hidráulico de um aproveitamento hidroelétrico. Com esse intuito, procurou reunir-se alguma bibliografia sobre o tema, analisando-se os vários métodos utilizados para o estudo e análise do seu comportamento. A importância deste trabalho está associada ao facto de que o amortecimento dos transitórios ocorridos em circuitos hidráulicos de aproveitamentos hidroelétricos assume alguma relevância atual, e procurou-se também, elaborar esta compilação sobre chaminés de equilíbrio, retomando assim esta temática.

Como uma das suas principais funções passa pelo amortecimento dos efeitos dos regimes transitórios, começou por se analisar o fenómeno do choque hidráulico e a forma como este intervém no circuito hidráulico. Analisou-se o comportamento após uma manobra de fecho através da fórmula de Allievi-Joukowski, diferenciando o tipo de manobra: instantânea, rápida ou lenta.

No que respeita ao funcionamento de uma chaminé de equilíbrio foram inicialmente descritos os vários tipos de chaminés, sendo que este trabalho incidiu essencialmente nas chaminés simples. O seu funcionamento foi estudado analisando o fenómeno da oscilação em massa ocorrido ao longo da galeria em carga.

O conhecimento deste fenómeno tem como principal interesse saber o nível de água no interior da chaminé de equilíbrio num determinado instante, conhecendo-se, conseqüentemente, os valores máximos e mínimos desse mesmo nível. O estudo efetuado baseou-se no conhecimento das equações do movimento com a aplicação do método das diferenças finitas. No entanto, este método revelou-se algo complexo na medida em que são necessárias inúmeras iterações. Assim, desenvolveu-se um processo que, baseado igualmente nas equações do movimento e no método das diferenças finitas, permitiu eliminar o moroso processo iterativo. Este processo permitiu determinar, facilmente, a variação do nível de água no fim de um determinado intervalo de tempo. Os resultados obtidos são tanto mais exatos quanto menor for o intervalo definido.

Por outro lado, faz-se referência a outros processos de análise da oscilação em massa. Estes, não permitem o conhecimento da variação do nível de água no interior da chaminé ao longo do tempo, permitindo, apenas, a determinação dos valores extremos.

O dimensionamento das chaminés de equilíbrio depende do conhecimento desta variação do nível de água atendendo a que a sua altura é condicionada pelo valor máximo atingido por essa mesma variação, de modo a evitar transbordamento. Porém, para a determinação dessa variação é necessário um conhecimento prévio da área transversal da chaminé. O valor mínimo que essa área pode admitir é

obtido pela aplicação do critério de Thoma, que define a secção mínima que permite um amortecimento da oscilação ao longo do tempo.

A aplicação prática destes métodos foi aplicada ao caso do Aproveitamento Hidroelétrico do Caldeirão. Com um conhecimento limitado dos dados relativos ao circuito hidráulico do aproveitamento em estudo, procurou-se efetuar uma análise do dimensionamento de uma chaminé de equilíbrio simples através do conhecimento da variação de nível ocorrida e uma determinação da influência de vários parâmetros nessa mesma variação.

Importa referir que o estudo efetuado não pretende servir de comparação com a realidade. De facto, a chaminé de equilíbrio existente no Aproveitamento Hidroelétrico do Caldeirão é uma chaminé com câmara de expansão e de alimentação, pelo que, por esse motivo e por insuficiência de dados completos para um estudo detalhado, os resultados aqui obtidos não podem ser comparados com os reais, uma vez que o estudo aqui efetuado aplica-se a chaminés de equilíbrio de secção constante.

Inicialmente aplicou-se o critério de Thoma para determinação da área mínima transversal. A comparação do resultado obtido com o valor real permitiu concluir, desde logo, a impossibilidade de estabelecer qualquer tipo de paralelismo com o valor real. A diferença de valores obtidos deve-se aos dados desconhecidos pelo autor, não permitindo uma aplicação correta do critério de Thoma.

O seguinte parâmetro estudado foi a duração do tempo de manobra, concluindo-se que quanto menor esse tempo, mais elevados são os picos atingidos pela oscilação no interior da chaminé. Isto relaciona-se com o choque hidráulico na medida em que, quanto mais rápida uma manobra, maior é a variação de pressão ocorrida e, conseqüentemente, mais acentuados serão os efeitos sentidos. Esta análise foi efetuada para duas diferentes áreas transversais da chaminé: a área real e a área obtida neste estudo pelo critério de Thoma. A influência deste parâmetro foi analisada no ponto seguinte, em que se comparou os resultados obtidos pelas duas diferentes áreas, constatado-se que a área transversal assume uma relevância fundamental na variação do nível de água na chaminé. O seu efeito traduz-se num aumento significativo da variação para áreas reduzidas, comparativamente a áreas maiores.

Outra análise efetuada incidiu no efeito do tipo de fecho, parcial ou total. Aqui, indo de encontro ao concluído anteriormente, constata-se que quanto mais brusca a manobra mais acentuados são os efeitos sentidos, pelo que a variação é maior para manobras de fecho total, sendo o seu amortecimento mais lento.

No que respeita às características da galeria em carga estudou-se o efeito do seu comprimento, da sua secção transversal e da sua rugosidade, variando os seus valores em 10%. Concluiu-se que o comprimento da galeria assume uma importância considerável, uma vez que pequenas reduções traduzem variações significativas na variação do nível de água no interior da chaminé, apesar do seu amortecimento ser semelhante. Quanto à secção transversal, verifica-se que esta tem pouca influência uma vez que a variação máxima atingida é muito semelhante para as diferentes secções assumidas. Já a rugosidade da galeria, representada pelo coeficiente de rugosidade de Manning-Strickler, também não assume grande relevância pelos mesmos motivos apresentados aquando da análise do efeito da secção transversal.

Por fim, fez-se uma comparação dos resultados obtidos considerando e desprezando as perdas de carga. Esta análise tem um interesse unicamente teórico, visto que neste cenário sem perdas o amortecimento é inexistente. No que respeita aos valores máximos atingidos, estes são muito semelhantes, com a diferença de se prolongarem no tempo para o cenário que despreza as perdas, ao passo que são amortecidos no cenário com perdas.

Uma vez que este estudo incidiu, essencialmente, na análise de chaminés de equilíbrio simples, sugere-se como desenvolvimento futuro análises mais detalhadas e pormenorizadas, abrangendo outros tipos de chaminés, com aplicações práticas mais frequentes. Por outro lado, a análise da oscilação em massa foi efetuada tendo como base o método das diferenças finitas. Esta análise revela-se, assim, limitada às potencialidades deste método, pelo que deverão ser utilizados no futuro métodos alternativos. Igualmente, sugere-se o estudo do fenómeno da oscilação em massa na sequência, não só de um fecho do distribuidor, mas igualmente de uma abertura ou, inclusivamente, combinando estas duas possibilidades, como por exemplo um fecho seguido de uma abertura num instante desfavorável.

Uma das grandes limitações deste trabalho residiu na inexistência de dados completos de um caso real passível de ser comparado com os resultados obtidos. Dessa forma, os resultados estão sempre limitados aos dados obtidos, sendo muitos outros admitidos pelo autor.

BIBLIOGRAFIA

- Andrzejewski, E. (2009), *Avaliações Numéricas de Chaminés de Equilíbrio: Subsídios para Projetos de Circuitos de Geração*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil.
- Battiston, C. (2005), *Influência de Parâmetros Físicos no Dimensionamento de Chaminés de Equilíbrio Simples de Usinas Hidrelétricas*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.
- Costa, H. (2009), *Modelação do Funcionamento de um RAC – Reservatório de Ar Comprimido*. Dissertação de Mestrado, FEUP, Porto, Portugal.
- Covas, D. (2012), *Regimes Transitórios Hidráulicos em Pressão – da teoria clássica à realidade física do fenómeno*. IST, Lisboa, Portugal.
- Diez, J.R. (2011), *Excavación Mecánica de Pozos y Chimeneas*. Capítulo 19, Manual de Túneles y Obras Subterráneas, U.D. Proyectos, Madrid, Espanha.
- Featherstone, R. E. & Nalluri, C. (2001), *Civil Engineering Hydraulic*. Blackwell Science.
- Fevereiro, J. (2011), *Lean Construction Aplicado a Barragens – Estudo de Caso*. Dissertação de Mestrado, FEUP, Porto, Portugal.
- Lencastre, A. (1996), *Hidráulica Geral*. Lisboa, Portugal.
- Manzanares, A. (1980), *Hidráulica Geral - II Escoamentos Líquidos*. Lisboa, Portugal.
- Martins, A. (2009), *Choque Hidráulico em condutas elevatórias. Metodologias para a sua quantificação. Aplicação informática – CHCE*. Revista da Faculdade de Ciência e Tecnologia. Porto, Portugal
- Novak, A.I.B., Moffat, C., Nalluri, C, Narayanan, R.(2007), *Hydraulic Structures*. T & F Books, Reino Unido.
- Nunes, S. (2010), *Caracterização e Zonamento Geotécnico Preliminar de Circuitos Hidráulicos - Aproveitamento Hidroelétrico de Padroselos*. Dissertação de Mestrado, FCT, Lisboa, Portugal.
- Pinto, P., Ribeiro, V. (2012), *Two Surge Tanks Hydropower Schemes. Design Criteria and Case Studies*. 4th IAHR International Symposium on Hydraulic Structures, 9-11 February, Porto, Portugal.
- Piqueiro, F. (2009), *Choque hidráulico*. Apontamentos da disciplina de Hidráulica Urbana e Ambiental do Ano Letivo 2009/2010, 4º Ano do Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Proença, M. (2010), *Aproveitamentos Hidroelétricos*. Apontamentos da disciplina de Hidrologia e Recursos Hídricos, Ano Letivo 2010/2011, 3º Ano do Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal.
- Ribeiro, Á. (1971), *Câmaras ou Chaminés de Equilíbrio*. Apontamentos da disciplina de Hidráulica Aplicada. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal.
- Schreiber, G.P. (1978), *Usinas Hidrelétricas*. Editora Blucher, Ltda. Brasil.
- Stucky, A. (1958), *Chambres d'Équilibre*. Sciences & Technique, Lausanne, Suíça.
- Eletrobrás (2003), *Crítérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas*.
- EDP (1992), *Aproveitamento de Fins Múltiplos do Caldeirão*.

Sandvik, *Raise boring equipment*, Sandvik Mining and Sandvik Construction.

[1] – www.inag.pt, Consultado em 11/04/2012

[2] - <http://www.nps.gov/olym/naturescience/images/Elwha-dam.jpg>, Consultado em 11/05/2012

[3] - <http://www.waterpowermagazine.com/graphic.asp?sc=2055073&seq=6>, Consultado em 13/06/2012

[4] - <http://jcrs.uol.com.br/site/noticia.php?codn=42043>, Consultado em 13/06/2012

[5] - <http://www.hydroworld.com/articles/print/volume-15/issue-4/articles/design-and-construction-innovations.html>, Consultado em 15/06/2012