

MODELAÇÃO DO FUNCIONAMENTO DE UM RAC – RESERVATÓRIO DE AR COMPRIMIDO

Definição de Parâmetros de Operação

HUGO DANIEL MESQUITA COSTA

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

Orientador: Professor Doutor José Carlos Tentúgal Valente

Co-Orientador: Professor Doutor Manuel Maria Pacheco Figueiredo

JULHO DE 2011

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2010/2011

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 – 2010/2011 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2010.*

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

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

A meus Pais e ao meu irmão

Eu não falhei, apenas encontrei 10.000 maneiras que não funcionam

Thomas Edison

AGRADECIMENTOS

Quando procurarmos ser justos na formulação de um agradecimento, damos o primeiro passo para cometermos esquecimentos e omissões imperdoáveis.

O presente trabalho não teria sido possível sem o apoio de um conjunto variado de pessoas e organizações que de diferentes formas contribuíram para a sua concretização.

Ao meu orientador Professor Doutor José Carlos Tentúgal Valente, uma palavra de enorme gratidão pela forma sabedora e dedicada com que me acompanhou, pelos conhecimentos e ensinamentos transmitidos e pela disponibilidade em todas as fases de execução deste trabalho.

Ao co-orientador Professor Doutor Manuel Maria Pacheco Figueiredo, pelas horas de trabalho despendidas e pelo apoio que me deu na realização deste Projecto, pelo muito que me ensinou e ajudou, quer no esclarecimento de dúvidas, quer na disponibilização de documentos.

À Águas do Noroeste, S.A., nas pessoas dos seus colaboradores Eng^a Cristiana Barbosa, Eng^o Jorge Lopes, Eng^o Paulo Rego, Sr. Rui Oliveira e Sr. Pedro Barbosa, que sempre mostraram toda a disponibilidade para executar as diversas tarefas necessárias para a elaboração da componente prática do presente estudo e que me forneceram todos os elementos indispensáveis para a realização do mesmo.

À família que, se viu privada da minha disponibilidade e do tempo que não lhes dediquei, bem como a força transmitida e o acompanhamento no desenvolvimento deste trabalho.

Uma palavra especial à Sylvie pela sua enorme paciência e que num ou noutro momento de desilusão ou desânimo me incentivou a continuar.

Aos meus colegas e amigos, em particular ao Zé e ao João, que me acompanharam e apoiaram ao longo de todo o percurso académico.

Finalmente, aqueles aquém se destinam os conteúdos e propostas apresentadas neste trabalho, porque são eles a verdadeira razão da sua existência.

RESUMO

Em sistemas hidráulicos que integram condutas sob pressão, o fechamento de um órgão obturador (condutas gravíticas) ou a paragem abrupta no funcionamento do grupo elevatório (condutas elevatórias), causam alterações ao escoamento permanente dando origem a regimes variáveis caracterizados pela modificação da velocidade média e pressão ao longo da conduta e com variabilidade temporal.

O fenómeno de propagação da onda de pressão causado por essas alterações ao escoamento é denominado de “Choque Hidráulico” ou “Golpe de Aríete”.

O presente projecto constitui um estudo de avaliação das principais variáveis e parâmetros de funcionamento de um reservatório de ar comprimido integrado num sistema adutor elevatório como órgão de protecção à ocorrência deste fenómeno a que ficará sujeito a variações de pressão resultantes e focado, essencialmente, na análise de pressões em várias secções do sistema elevatório.

O desenvolvimento do estudo incide particularmente na especificidade e na complexidade que ocorrem na modelação do funcionamento de um reservatório de ar comprimido em que a sua ligação à conduta elevatória principal é realizada em trechos de diâmetros muito diferentes. Esta situação é corrente na grande parte das instalações em exploração sem, contudo, ser devidamente considerado o efeito ou efeitos daí resultantes.

A análise e avaliação dos principais parâmetros de funcionamento do RAC, teve como princípio a comparação de resultados obtidos por modelos teóricos e as medições locais efectuadas num sistema elevatório integrado no Sistema Multimunicipal de Abastecimento de Água concessionado à empresa Águas do Noroeste, SA, designado por Barradas e localizado em Vila Nova de Famalicão.

Os principais critérios de escolha dos modelos teóricos utilizados resultam do facto de serem “softwares” livres, disponíveis a toda a comunidade científica e em que a base do seu algoritmo de programação seja estruturado pelo Método das Características, que é o método matemático actualmente mais utilizado.

PALAVRAS-CHAVE: Choque Hidráulico, Regimes variáveis, Pressão; RAC, Método das Características

ABSTRACT

In hydraulic systems incorporating pipelines under pressure, closing a valve (gravity pipelines) or an abrupt stopping of a pump (pumping line) causes changes in the flow leading to hydraulic transients regimes characterized by changes in the average speed and the pressure over the pipeline along the time.

The phenomenon of pressure wave propagation caused by these changes in the flow is known as "hydraulic shock" or "water hammer".

This project is a study of the main variables and operating parameters of an air chamber integrated into a pump pipeline system as a mean to prevent the occurrence of this phenomenon and is mainly focused on the analysis of the pressures in various sections of the water pumping system.

The study focuses particularly on the specificity and complexity that occur when modeling the behavior of an air chamber which connection to the main pipeline is made by sections of very different diameters. This is a usual situation in the most of the systems in service, although, without properly consider the effects resulting therefrom.

The analysis and evaluation of the main operating parameters of the air compressed reservoir - RAC, was based in the comparison of the results obtained by theoretical models and "*in-situ*" measurements made in Barradas water pumping system which is integrated in the Sistema Multimunicipal de Abastecimento de Água (Multi-city Water Supply System) operated by Águas do Noroeste, S.A, and located in Vila Nova de Famalicão.

The main criteria to select the theoretical models resulted from the fact that they are freeware software, available to the entire scientific community and with a programming algorithm based on the Method of Characteristics, which is currently the most used mathematical method.

KEYWORDS: Water Hammer, unsteady flows, pressure, RAC, Method of Characteristics.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS.....	i
RESUMO	iii
ABSTRACT.....	v
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. ESTRUTURA DO TRABALHO	2
2. ENQUADRAMENTO.....	3
2.1. ESTADO DE ARTE	3
2.2. DESENVOLVIMENTO HISTÓRICO: BREVE SUMÁRIO	5
3. CONCEITOS BÁSICOS DO CHOQUE HIDRÁULICO	7
3.1. COMPRESSIBILIDADE.....	7
3.2. CELERIDADE	7
3.3. CAVITAÇÃO/SEPARAÇÃO DA COLUNA LÍQUIDA	9
4. CHOQUE HIDRÁULICO.....	11
4.1. O FENÓMENO DO CHOQUE HIDRÁULICO.....	11
4.2. TIPOS DE ESCOAMENTOS TRANSITÓRIOS SOB PRESSÃO	13
4.3. EQUAÇÕES FUNDAMENTAIS. HIPÓTESES E SIMPLIFICAÇÕES	14
4.3.1. EQUAÇÃO DO EQUILÍBRIO DINÂMICO	15
4.3.2. EQUAÇÃO DA CONSERVAÇÃO DA MASSA.....	16
4.4. RESOLUÇÃO DAS EQUAÇÕES FUNDAMENTAIS.....	18
4.5. MÉTODOS NUMÉRICOS PARA A RESOLUÇÃO DAS EQUAÇÕES	21
4.5.1. MÉTODO NUMÉRICO DE ALLIEVI	23
4.5.2. MÉTODO DAS CARACTERÍSTICAS.....	25
5. INTERPRETAÇÃO FÍSICA DO FENÓMENO DO CHOQUE HIDRÁULICO	37
5.1. CONDUTAS GRAVÍTICAS	38
5.2. CONDUTAS ELEVATÓRIAS	42
5.3. TEMPOS DE MANOBRAS E ENVOLVENTES DE PRESSÕES	46
5.3.1. CONDUTAS GRAVÍTICAS.....	46
5.3.2. CONDUTAS ELEVATÓRIAS	47

6. DISPOSITIVOS DE PROTECÇÃO	51
6.1. VOLANTES DE INÉRCIA.....	52
6.2. RESERVATÓRIO DE AR COMPRIMIDO RAC.....	53
6.3. CHAMINÉS DE EQUILÍBRIO.....	55
6.4. RESERVATÓRIO UNIDIRECCIONAL.....	56
6.5. CONDUTA DE ASPIRAÇÃO PARALELA.....	56
6.6. VÁLVULA DE DESCARGA AUTOMÁTICA.....	57
7. RESERVATÓRIO DE AR COMPRIMIDO	59
7.1. TRABALHOS PIONEIROS.....	59
7.2. FUNCIONAMENTO DE UM RAC.....	59
7.3. DIMENSIONAMENTO.....	61
7.4. LEGISLAÇÃO APLICÁVEL.....	63
7.4.1. INSTALAÇÃO.....	63
7.4.2. CONDIÇÕES DE EXPLORAÇÃO.....	65
8. CASO DE ESTUDO	67
8.1. SUBSISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA DE AREIAS DE VILAR.....	67
8.2. SISTEMA ELEVATÓRIO DE BARRADAS.....	68
8.3. RESERVATÓRIO DE AR COMPRIMIDO DE BARRADAS.....	72
8.4. ENSAIOS REALIZADOS.....	73
8.4.1. METODOLOGIA.....	73
8.4.2. TESTE EXPERIMENTAL – 1.....	77
8.4.3. TESTE EXPERIMENTAL – 2.....	80
8.5. SOLUÇÕES PROPOSTAS.....	88
9. CONCLUSÕES	93
10. BIBLIOGRAFIA	97

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig.3.1 – Efeito da espessura da parede de vários materiais de tubagens na celeridade.....	9
Fig.3.2 – Fenómeno de Cavitação. Ruptura da Veia Líquida	10
Fig.4.1 – Ruptura de um troço de conduta devido a sobrepressões em Oigawa no Japão	12
Fig.4.2 – Colapso num segmento da conduta por efeitos de pressões negativas ou subpressões em Oigawa no Japão	12
Fig.4.3 – Na Central Hidroeléctrica em Big Creek, nos Estados Unidos, deu-se a rotura de uma conduta devido às variações de pressão.....	13
Fig.4.4 – Trecho elementar de conduta	15
Fig.3.5 – Esquema de um sistema elevatório	18
Fig.3.6 – Curva característica de uma bomba	21
Fig.3.7 – Ondas F e ondas f.....	24
Fig.3.8 – Linhas características	27
Fig.3.9 – Mudança de inclinação da conduta.....	29
Fig.3.10 – Localização do RAC no circuito hidráulico.....	30
Fig.3.11 – Lei da Continuidade no RAC.....	32
Fig.3.12 – Método das Características – Aplicação à Fronteira de Montante	34
Fig.3.13 – Dimensões de tubeira no RAC.....	34
Fig.5.1 – Exemplo de um sistema de adução gravítico	38
Fig.5.2 – Variação de pressão na vizinhança do órgão obturador.....	39
Fig.5.3 – Evolução no tempo da perturbação numa conduta gravítica.....	40
Fig.5.4 – Variação de pressão na vizinhança da bomba não considerando perdas de carga.....	43
Fig.5.5 – Variação de pressão na vizinhança da bomba considerando perdas de carga.....	43
Fig.5.6 – Manobra instantânea numa conduta gravítica	46
Fig.5.7 – Manobra rápida numa conduta gravítica.....	46
Fig.5.8 – Manobra lenta numa conduta gravítica.....	47
Fig.5.9 – Manobra instantânea numa conduta elevatória	49
Fig.5.10 – Manobra rápida numa conduta elevatória.....	50
Fig.5.11 – Manobra lenta numa conduta elevatória.....	50
Fig.6.1 – Representação esquemática de perfil longitudinal de uma conduta elevatória com vários dispositivos de protecção	52
Fig.6.2 – Representação esquemática volante de inércia	53
Fig.6.3 – Fotografia de um volante de inércia associado a uma bomba.....	53

Fig.6.4 – Layout básico de um RAC.....	54
Fig.6.5 – Fotografia exterior de um RAC – E.E.Barradas	54
Fig.6.6 – Representação gráfica da localização de uma chaminé de equilíbrio numa central hidroeléctrica	55
Fig.6.7 – Chaminé de equilíbrio de aço em Montevideu, Uruguai	55
Fig.7.1 – Funcionamento do RAC	60
Fig.7.2 – Imagem RAC no interior de um edifício	64
Fig.7.3 – Reservatório de Ar Comprimido da ETA de Areias de Vilar sujeito a operação de fiscalização. Pormenor de inscrição no mesmo.....	65
Fig.8.1 – Área geográfica dos municípios integrados no sistema multimunicipal de abastecimento de água e de saneamento do Noroeste	67
Fig.8.2 – Mapa da rede do subsistema de Areias de Vilar Vista panorâmica da ETA de Areias de Vilar	68
Fig.8.3 – Fotografia Aérea do Sistema Elevatório	69
Fig.8.4 – Representação esquemática em planta da Estação Elevatória de Barradas	69
Fig.8.5 – Conduitas de aspiração na câmara de manobras do Reservatório de Montante. Representação esquemática em planta.....	70
Fig.8.6 – Fotografia do interior da estação elevatória de Barradas	70
Fig.8.7 – Curva característica e fotografia da Bomba EFAFLU, tipo 3-250 KZ 40.5 com motor Siemens 355kW	71
Fig.8.8 – Vista panorâmica do Reservatório de Cerite.....	71
Fig.8.9 – Representação esquemática em planta do RAC de Barradas antes da intervenção	72
Fig.8.10 – Fotografia do actual “poço de manobras” do RAC.....	73
Fig.8.11 – Representação esquemática em planta da localização das secções de medição	74
Fig.8.12 – Equipamentos de medição instalados na conduita de compressão	74
Fig.8.13 – Exemplo de Faseamento Ensaio 1	78
Fig.8.14 – Registo de pressões nas quatro secções nos vários ensaios.....	79
Fig.8.15 – Instalação de um datalogger na conduita de ligação ao RAC	80
Fig.8.16 – Velocidades teóricas no RAC.....	82
Fig.8.17 – Correlação de valores teóricos.....	84
Fig.8.18 – Correlação de de valores reais	84
Fig.8.19 – Comparação modelo teórico e dados experimentais do ensaio 5	85
Fig.8.20 – Comparação modelo teórico e dados experimentais do ensaio 6	86
Fig.8.21 – Comparação de pressões para vários k_{eq} no modelo teórico e dados experimentais do ensaio 5.....	87

Fig.8.22 – Comparação de pressões para vários k_{eq} no modelo teórico e dados experimentais do ensaio 6.....	87
Fig.8.23 – Comparação de pressões para k_{eq} elevados no modelo teórico e medições na compressão do ensaio 5.....	88
Fig.8.24 – Solução proposta com conduta de ligação em DN150	89
Fig.8.25 – Variações volume de ar e nível de água no RAC com conduta de ligação em DN150	90
Fig.8.26 – Evolução de pressões no RAC.	90
Fig.8.27 – Envolvente de pressões na conduta elevatória com conduta de ligação ao RAC em DN150	91

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 – Etapas a considerar na análise do fenómeno de Choque Hidráulico	37
Quadro 2 – Quadro resumo do fenómeno de choque hidráulico em condutas gravíticas	41
Quadro 3 – Quadro resumo do fenómeno de choque hidráulico em condutas elevatórias	45
Quadro 4 – Coeficiente de Inclinação da Conduta.....	48
Quadro 5 – Coeficiente de inércia do grupo electrobomba.....	48
Quadro 6 – Características dos vários dispositivos de protecção.....	58
Quadro 7 – Alguns dos principais autores de ábacos para dimensionamento e verificação hidráulica de reservatórios de ar comprimido.....	62
Quadro 8 – Distâncias de segurança para diferentes classes de Perigo.....	63
Quadro 9 – Identificação e localização das Secções de Medição	73
Quadro 10 – Ensaio Realizados.....	77
Quadro 11 – Perdas de carga reais totais na conduta de ligação ao RAC e perdas contínuas teóricas no trecho Bomba-secção de ligação	81
Quadro 12 – Coeficientes de perda de carga globais e equivalentes.....	84

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

- a – Celeridade [$L T^{-1}$]
D – Diâmetro [L]
E - Módulo de elasticidade [$L M T^{-2}/L^2$]
e – Espessura [L]
g – Aceleração gravítica [$L T^{-2}$]
H – Energia mecânica por unidade de peso [L]
 H_b – Energia, por unidade de peso, fornecida ao sistema pelo exterior [L]
j – Perda de carga unitária
 k_{eq} – coeficiente de perda de carga equivalente
 K_G – coeficiente de perda de carga global
 K_{Loc} – coeficiente de perda de carga localizada
L – Comprimento de um trecho de conduta [L]
M – Quantidade de massa [M]
 M_0 – momento actuante sobre as massas girantes da bomba [$L^2 M T^{-2}$]
P – Pressão relativa [$L M T^{-2}/L^2$]
 P_{atm} – Pressão Atmosférica [$L M T^{-2}/L^2$]
Q – caudal [L^3/T]
S – Área de secção [L^2]
T –Tempo de manobra [T]
U – Velocidade média do escoamento [$L T^{-1}$]
V – Volume [L^3]
Z – Cota em relação a um dado plano horizontal de referência [L]
 α_b -aceleração angular das massas girantes da bomba [$L T^{-2}$]
 γ – Peso volúmico [$L M T^{-2}/L^3$]
 δ – extensão [L]
 ΔH – Perda de carga (ou energia) [L]
 ε – Módulo de elasticidade da água [$L M T^{-2}/L^2$]
 η –rendimento
 λ – Coeficiente de resistência ou de Darcy-Weisbach
 μ – Fase [T]
 ρ – Densidade do fluído (água) [M/L^3]

RAC – Reservatório de Ar comprimido

RUD – Reservatório Unidireccional

CAP – Conduto de aspiração paralela

VDA – Válvula descarga automática

ITC – Instrução técnica complementar

ESP – Equipamento sob pressão

ASAE – Autoridade de Segurança Alimentar e Económica

DRE – Direcção Geral de Economia

1

INTRODUÇÃO

Os sistemas hidráulicos constituídos por condutas com escoamento em regime permanente sob pressão, quando sofrem alterações nas condições do seu funcionamento ocasionam regimes variáveis. Essas alterações caracterizam-se pela modificação da velocidade média e da pressão, ao longo do tempo, em qualquer secção da conduta. Essas alterações ao escoamento dão origem a um fenómeno de propagação de ondas de pressão denominado de “Choque Hidráulico” ou “Golpe de Aríete”, gerando variações de pressão e de caudal capazes de mobilizarem forças de natureza elástica resultantes da compressibilidade da água e da deformabilidade da conduta.

Durante a ocorrência desse fenómeno, os escoamentos transitórios originados podem comprometer funcionalmente e estruturalmente todos os equipamentos e dispositivos constituintes do sistema elevatório.

Dessa forma, para atenuar as elevadas variações de pressão geradas, idealizaram-se vários dispositivos de protecção, dos quais se salienta o Reservatório de Ar Comprimido, por ser um dos mais eficazes e mais utilizados actualmente.

Este dispositivo consiste num reservatório de água fechado em permanente ligação com a conduta que se pretende proteger e que contém no seu interior um gás comprimido, geralmente ar. Poderá a superfície de separação ar-água ser livre, mas também poderá tal separação ser realizada através de uma manga de borracha ou equivalente, que possibilita a separação dos fluídos no seu interior.

Considerado um equipamento potencialmente perigoso devido às suas condições de funcionamento (sob pressão), é essencial que o seu funcionamento seja bem analisado e estudado, e adaptado a cada situação específica, pois caso isso não se verifique poderá a segurança dos equipamentos ficar comprometida, assim como do ambiente envolvente e, muito principalmente, de pessoas.

Assim sendo, considera-se que será importante desenvolver um estudo experimental que analise e avalie o funcionamento de um Reservatório de Ar Comprimido com características muito próprias e diferentes das idealizadas teoricamente e a sua adaptabilidade a modelos teóricos que constituam uma base para análises futuras em situações análogas.

A finalidade deste projecto é desenvolver um estudo prático acerca do funcionamento de um Reservatório de Ar Comprimido que contrariamente ao idealizado na teoria da especialidade, a sua ligação à conduta principal é realizada por uma conduta composta por trechos de diâmetros muito diferentes, tal como acontece em grande parte das aplicações práticas.

1.1 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho é constituído por nove capítulos, nos quais se insere o presente capítulo em que se faz uma breve introdução. Além disso, o presente estudo é constituído por vários Anexos onde se incluem os quadros e gráficos dos registos experimentais realizados, bem como outros aspectos auxiliares essenciais à demonstração de conclusões e incluídos no texto do presente relatório.

No capítulo 2 “Enquadramento” é realizado uma breve descrição de alguns trabalhos realizados ao longo dos tempos até à actualidade na temática do choque hidráulico, bem como a origem do seu estudo e as novas tendências para estudos futuros.

O capítulo 3 “ Choque Hidráulico” destina-se à explicação do fenómeno do choque hidráulico, descrevendo e caracterizando matematicamente as variáveis a ele associadas. É feita também uma referência aos métodos numéricos usados na sua modelação, nomeadamente o Método de Allievi e o Método das Características.

O capítulo 4 descreve e esclarece alguns dos conceitos básicos a ter em conta na interpretação e análise do choque hidráulico.

O capítulo 5 é dedicado à interpretação qualitativa física do fenómeno supracitado, propondo uma análise separada da ocorrência do fenómeno tanto em condutas gravíticas como em condutas elevatórias.

No capítulo 6 é realizada uma breve descrição do funcionamento dos dispositivos de segurança ao choque hidráulicos usualmente utilizados.

O capítulo 7 é focado essencialmente no objecto de estudo deste projecto, o Reservatório de Ar Comprimido. Começa por introduzir historicamente o seu desenvolvimento e posteriormente é descrito o seu funcionamento, além de abordar também, ainda de que forma muito breve os métodos historicamente usados para o seu dimensionamento. Este capítulo termina com uma descrição de algumas das normas em vigor que se devem ter sempre em conta quando se lida com um dispositivo deste tipo.

O capítulo 8 “Caso de Estudo” inicia-se pelo enquadramento e descrição física dos sistema elevatório de Barradas e explicação do seu funcionamento. É descrito o modo como se realizaram os vários ensaios experimentais, bem como a adaptação das variáveis deste sistema elevatório aos modelos teóricos utilizados, fazendo uma análise crítica dos resultados obtidos. Além disso são propostas soluções que visam melhorar o funcionamento do RAC em estudo.

Por fim, o Capítulo 9 reúne as conclusões que foram possíveis retirar no decurso do trabalho, propondo algumas considerações e ideias que possam ser susceptíveis de constituir desenvolvimentos em trabalhos futuros.

2

ENQUADRAMENTO

2.1 ESTADO DE ARTE

A problemática do choque hidráulico foi inicialmente estudada por Manabrea que, em 1858, estabeleceu pela primeira vez as equações que determinam as subpressões em condutas gravíticas. No entanto, alguma literatura relativa a esta área de conhecimento, atribui essa distinção geralmente a Michaud que examinou o controlo do choque hidráulico através de câmaras de ar (chaminés de equilíbrio) e válvulas de controlo. Este concluiu que a expressão para obtenção das variações de pressão, para manobras lentas do dispositivo obturador, é dada por:

$$\frac{\Delta P}{\gamma} = \Delta H = \frac{2LU_0}{gT} \quad (2.1)$$

De realçar que os estudos que analisam a relação entre as variações de pressão com a velocidade foram primeiramente desenvolvidos por Weston, Carpenter e Frizell (1897) na passagem para o século XX [1]

No entanto, do ponto de vista de engenharia, só se começaram a realizar os primeiros trabalhos importantes neste domínio através do seu contemporâneo Jowkowsky, com a análise do fenómeno em ensaios sistemáticos de condutas de abastecimento de água. A sua contribuição para o entendimento do fenómeno é bastante importante também a nível da fundamentação teórica, uma vez que em 1898 estabelece a “Equação Fundamental do Choque Hidráulico”, também designada por “Equação de Joukowsky”, “Equação de Allievi-Joukowsky” ou ainda “Equação de Allievi” [1], [2]:

$$\Delta P = \pm \rho a \Delta U \quad (2.2)$$

ou

$$\Delta H = \frac{\Delta P}{\gamma} = \frac{\pm \rho a \Delta U}{\gamma} = \pm \frac{a \Delta U}{g} \quad (2.3)$$

consoante expressas em termos de pressões ou de variações de carga.

Estas expressões associam a cada variação instantânea de velocidade (ΔU) a variação de pressão (ΔP ou variação de carga, ΔH), não considerando as perdas de carga na conduta e desprezando a velocidade do fluido em comparação com a celeridade. Note-se que esta simplificação é a principal

diferença comparativamente à abordagem para escoamentos em superfície livre. Define-se assim a lei que permite determinar a pressão máxima provocada pelo fechamento brusco de uma válvula instalada numa tubagem, em que:

a-celeridade da onda de propagação

P – Pressão, dada por $P = \pm \rho g (H - Z)$

Z – Cota Topográfica

ρ – massa volúmica

γ – Peso volúmico da água

g –aceleração da gravidade

H –altura piezométrica

ΔU – variação instantânea da velocidade

A formulação anterior não considera alguns aspectos na sua dedução, tais como as elevadas perdas de carga contínuas, fenómenos de cavitação e rotura da veia líquida, a lei não uniforme de velocidades, a existência de bolsas de ar acumulado e ainda as vibrações na conduta e nos equipamentos associados.

Assim sendo, os valores obtidos pela fórmula de Joukowsky, excede na maioria dos casos os valores para variações de pressões medidas em instalações reais, pelo que pode revelar-se anti-económica [3].

As referidas expressões são alvo de análise na bibliografia consultada, nomeadamente “Manual de Saneamento Básico”- Betâmio de Almeida [3] .

Posteriormente, nos inícios do mesmo século, com base nos trabalhos anteriores de Joukowsky, Allievi (1902) [4] apresentou a fundamentação teórica das perturbações de fluxo em tubagens, através da simplificação da integração das indefinidas que modelam o regime variável em pressão de um modo bastante exaustivo através da não consideração das perdas de carga, dos efeitos do peso e dos termos convectivos, simplificação que nem sempre se poderá justificar na prática[4],[5].

Este autor, em 1913, publica o primeiro documento relativamente completo acerca do tratamento analítico deste fenómeno intitulado “Teoria del copo d’ariete”.

Em virtude da necessidade do conhecimento do desenvolvimento deste fenómeno em sistemas mais complexos, Schnyder em 1930, desenvolveu um método gráfico que viria a ser trabalhado e apresentado por Bergeron em 1933.

Surge assim o Método Gráfico de Schnyder-Bergeron nos anos 30 do século XX, que apresenta ainda nos dias de hoje bastante utilidade, uma vez que permite a compreensão dos fenómenos de choque hidráulico com determinadas condições fronteira e a influência de alguns parâmetros nestas, considerando pela primeira vez as perdas de carga, ainda que de forma aproximada.

Mais recentemente, com a crescente evolução da capacidade e utilização do cálculo automático, os métodos usados no estudo deste fenómeno têm convergido no sentido de otimizar o mesmo com recurso às potencialidades informáticas cada vez mais poderosas. Nesse sentido, o Método das Características tem-se imposto como o método mais potente e versátil tendo em vista as aplicações em engenharia.

No entanto, em estudos posteriores, verificou-se que em algumas medições geralmente havia falhas no cálculo com precisão do amortecimento e dispersão da frente de onda, uma vez que os valores obtidos

divergiam dos cálculos efectuados segundo a teoria clássica . A razão dessa discrepância nos valores seria o facto de alguns efeitos não serem tidos em conta, tais como o ar livre e dissolvido na conduta, depósito de sedimentos solidificados nas paredes, o comportamento não-elástico do material das paredes, a interacção fluido-estrutura, entre outros.

Como consequência, na segunda metade do século XX, Richard Skalac publicou um artigo intitulado “An extension of the theory of water hammer” [6], visando complementar a teoria clássica do choque hidráulico. A sua teoria foca-se na previsão da influência da interacção fluido-parede e no modo de propagação das frentes das ondas de choque. O seu modelo matemático inclui, em relação à teoria clássica do choque hidráulico, os efeitos da inércia radial do líquido e da tubagem, bem como as ondas longitudinais de pressão nas paredes desta. Esforços de flexão e inércia rotacional na parede da conduta foram também tidos em conta, sendo negligenciadas as deformações aximétricas de cisalhamento, a viscosidade do fluido e modos de vibração da parede.

Nos dias de hoje, os estudos emergentes acerca do choque hidráulico convergem para duas áreas muito importantes que estão a desenvolver um papel de relevo na modelação de transitórios hidráulicos. Essas áreas são a detecção de fugas em tubagens sujeitas a variações no escoamento, através da estimação de um parâmetro de fuga, e a previsão de alterações na qualidade da água potável em sistemas de abastecimento de água [1].

2.2 DESENVOLVIMENTO HISTÓRICO: BREVE SUMÁRIO

O interesse no estudo do fenómeno do choque hidráulico tem origem nos finais do século XIX, em que a Europa se encontrava no auge da revolução industrial, com elevado crescimento da população e da indústria em zonas urbanas que conduziam a uma procura de energia eléctrica mais elevada.

A energia hidroeléctrica desempenhou um papel de relevo na resposta a essa crescente procura de fornecimento energético, no entanto ainda não apresentava a mesma proporção na produção da energia dos dias de hoje.

A necessidade do controlo do escoamento da água nas turbinas e nas comportas levou a problemas na análise do escoamento de transição a que, usualmente, se designa por transiente hidráulico ou simplesmente escoamento transitório. Surge assim a necessidade por parte das organizações de produção hidroeléctrica de um conhecimento mais aprofundado do fenómeno do choque hidráulico, bem como dos métodos de controlo e os modos de atenuação dos seus efeitos.

Os escoamentos transitórios foram assim tidos como factores de elevado relevo no dimensionamento de grande número de sistemas de condutas, desde a sua aplicação a nível industrial como ao nível do abastecimento de água.

A crescente pesquisa nesta área, principalmente em condutas de pequeno diâmetro e elevada velocidade nos sistemas de distribuição de água, conduziu à constatação da importância da resistência das paredes das tubagens e das perdas de carga ao longo do seu desenvolvimento, levando à consideração desses factores na abordagem do problema em análise [1].

3

CONCEITOS BÁSICOS DO CHOQUE HIDRÁULICO

Antes de proceder ao desenvolvimento mais detalhado do fenómeno visado neste trabalho, é realizada, no presente subcapítulo, a uma breve abordagem a conceitos frequentemente usados no estudo do mesmo.

3.1 COMPRESSIBILIDADE

A compressibilidade dos fluidos, nomeadamente da água e do ar, traduz-se pela redução do volume ocupado pela massa fluida (consequente aumento da massa volúmica), quando aumenta a pressão a que está sujeita. Esta característica dos fluídos e o seu efeito na variação da massa volúmica, é muito pequena ou até desprezável no caso dos líquidos, o que já não acontece no caso dos gases[7].

De acordo com o seu comportamento e sob a acção de uma pressão aplicada exteriormente, os fluidos podem ser classificados da seguinte forma:

- **Incompressíveis:**

A variação do volume é independente da pressão da temperatura. Quando nos fenómenos de escoamento ou repouso de líquidos as variações de pressão são pequenas, logo também pequenas as variações da massa volúmica, o fluído pode geralmente considerar-se incompressível;

- **Compressíveis:**

No caso dos gases, o volume do fluído varia com a sua pressão e temperatura.

É de notar que nenhum fluído real é perfeitamente compressível. Contudo, para efeitos de estudo de grande parte das aplicações práticas este pode ser considerado como tal devendo salientar-se a excepção no caso do movimento variável em condutas sobre pressão sujeitas ao choque hidráulico, pois caso este fosse considerado incompressível, ter-se-ia uma propagação instantânea de qualquer modificação do caudal que fosse provocada pela variação das condições de escoamento, o que não é representativo da realidade.

3.2 CELERIDADE

A celeridade é a velocidade de propagação da onda de choque ou de pressão originada pela alteração ao regime permanente do escoamento.

Este parâmetro apresenta elevada importância na análise dos escoamentos transitórios, sendo a sua expressão obtida por Korteweg em 1878 e posteriormente apresentada por Allievi.

Segundo Marques et al [8], a referida expressão do cálculo da celeridade surge da aplicação da equação da continuidade considerando a compressibilidade do fluido, em que após algumas simplificações permite escrever :

$$a = \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho \times \left(\frac{\Delta P}{\varepsilon} + \frac{dS}{S} \right)}} \quad (3.1)$$

No caso de uma conduta infinitamente rígida, a variação relativa das características da conduta seria nula, $dS/S=0$, que conduz pela expressão anterior, à expressão da velocidade de propagação do som num fluido.

$$a = \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho \times \left(\frac{\Delta P}{\varepsilon} + 0 \right)}} = \sqrt{\frac{\varepsilon}{\rho}} \quad (3.2)$$

No geral, as condutas utilizadas em sistemas hidráulicos apresentam uma relação espessura/diâmetro inferior a 1/20, sendo por isso válida a fórmula dos tubos para a obtenção da tensão circunferencial.

Pela fórmula dos tubos tem-se que para uma conduta com comportamento elástico linear a extensão é dada por:

$$\delta = \frac{\Delta P \times D}{2 \times e \times E} \quad (3.3)$$

Caso não existam constrangimentos à deformação longitudinal, a deformações da conduta serão condicionadas pelas extensões diametrais, pelo que:

$$\frac{dS}{S} = 2 \times \delta \quad (3.4)$$

Então, através das expressões 3.1 e 3.4 obtém-se a expressão apresentada por Allievi, válida para condutas finas ($e/D < 1/20$) com juntas de dilatação (sem constrangimentos axiais).

$$a = \sqrt{\frac{1}{\rho \times \left(\frac{1}{\varepsilon} + \frac{D}{e \times E} \right)}} = \frac{\sqrt{\frac{\varepsilon}{\rho}}}{\sqrt{1 + \frac{\varepsilon}{E} \times \frac{D}{e}}} \quad (3.5)$$

É de notar pela expressão 3.5 que a celeridade depende das características elásticas do líquido e da conduta. O efeito das propriedades físicas (módulo de elasticidade – E) das condutas circulares, em secção cheia, na celeridade da onda de propagação do choque hidráulico é apresentado na figura 3.1 para uma vasta gama de espessuras (D/e) e tipos de materiais.

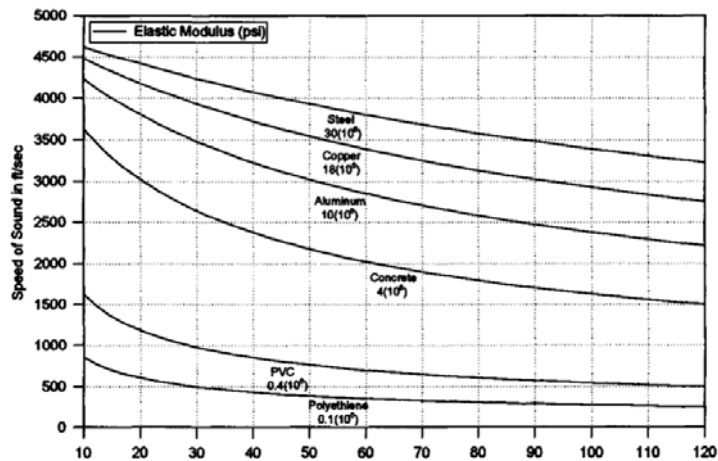


Fig.3.1 - Efeito da espessura da parede de vários materiais de tubagens na celeridade [9]

3.3 CAVITAÇÃO/ SEPARAÇÃO DA COLUNA LÍQUIDA

A palavra cavitação tem origem do latim “cavus” que significa buraco ou cavidade e é utilizada para descrever o processo de nucleação, crescimento e colapso de bolhas de vapor num fluido.

Este fenómeno físico ocorre muitas vezes em sistemas hidráulicos e nos seus componentes, uma vez que surge associado a variações significativas de pressão e conseqüente alteração nas características do comportamento do escoamento.

Durante a fase de subpressão, as variações de pressão originadas pelo choque hidráulico podem fazer com que em determinadas secções da conduta a pressão seja inferior à pressão atmosférica, levando a que gases presentes na água se “libertem” sob a forma de bolhas. Como conseqüência disso a celeridade das ondas de choque diminuirá.

Quando numa determinada secção da conduta a pressão baixa para valores próximos ou iguais à pressão de vaporização do líquido, neste caso da água, dá-se a rotura da veia líquida ou separação da coluna líquida. Essa separação é originada pelo parcial ou total preenchimento da secção em causa por vapor de água resultante da variação de pressão anteriormente referida e pela difusão dos gases dissolvidos na água.

As zonas da conduta em que tipicamente ocorre o fenómeno descrito são os pontos altos intermédios ao longo do seu perfil longitudinal (Fig. 3.2), e as zonas vizinhas de órgãos obturadores/fronteiras.

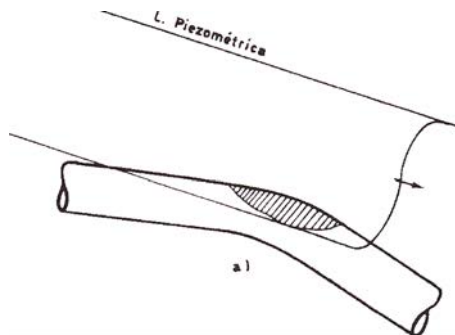


Fig. 3.2– Fenómeno de cavitação. Roptura da veia líquida [3]

Os seus efeitos são de todo indesejáveis, podendo provocar: (i) redução da eficiência dos equipamentos hidráulicos, (ii) vibração, ruído excessivo, (iii) instabilidade do escoamento, ocorrência de sobrepressões demasiadamente elevadas devido ao choque das colunas líquidas separadas (iv) desgaste superficial nas paredes das superfícies metálicas por erosão, podendo esta provocar a contaminação do fluido (água) e fugas, (v) bloqueios e dificuldades de operação no sistema (vi) Esmagamento da conduta devido à incapacidade de resistir à pressão externa [3],[10] e [11].

Sendo um fenómeno prejudicial/nocivo para o normal funcionamento de um sistema hidráulico, devem ser considerados meios de prevenção do seu aparecimento, de localização da secção de formação, bem como alterações aos modos de operação do sistema hidráulico. Segundo Koivula [10], os métodos de localização directa são frequentemente impossíveis de aplicar devido à complexidade dos componentes pertencentes a um sistema hidráulico sendo necessário o recurso a métodos indirectos em que as medições são focadas tipicamente no choque de ondas gerado pela implosões das cavidades.

4

O CHOQUE HIDRÁULICO

4.1 O FENÓMENO DO CHOQUE HIDRÁULICO

Os sistemas hidráulicos constituídos por condutas em regime permanente sob pressão, quando sofrem alterações nas condições do seu funcionamento ocasionam regimes variáveis. Essas alterações caracterizam-se pela modificação da velocidade média e da pressão, ao longo do tempo e em qualquer secção da conduta. O fenómeno de propagação da onda de pressão gerada por essas alterações ao escoamento é denominado de “Choque Hidráulico” ou “Golpe de Aríete”, originando variações de pressão e de caudal capazes de mobilizarem forças de natureza elástica resultantes da compressibilidade da água e da deformabilidade da conduta.

A onda de pressão gerada, responsável pela alteração do regime hidráulico, é caracterizada pela sua velocidade de propagação ou celeridade. Os extremos da conduta funcionam como obstáculo à sua propagação, reflectindo a onda, mudando a sua orientação ou não de acordo com as condições físicas encontradas [12].

As referidas alterações ao comportamento permanente inicial do escoamento (aparecimento de escoamentos variáveis na conduta), originam regimes de escoamento transitórios, levando a que a velocidade na vizinhança de uma fronteira passe bruscamente do valor em regime permanente (U_0) para um valor próximo de zero. Desta forma, no caso de uma conduta gravítica, por exemplo, criam-se ao longo da conduta, numa primeira fase, variações negativas de pressão (depressões) que desenvolvem forças de inércia capazes de originar fenómenos de cavitação, e posteriormente numa segunda fase, variações de pressão positivas, ou sobrepressões, que poderão eventualmente exceder a capacidade resistente do material constituinte da conduta, ou vice-versa, dependendo do tipo de sistema hidráulico. Uma abordagem qualitativa do fenómeno em diferentes sistemas hidráulicos será abordada posteriormente.

Aquando da variação temporal da velocidade, quanto mais rápida for a sua variação maior será o aumento da pressão (em módulo). É relevante mencionar que os referidos distúrbios no escoamento, planeados ou acidentais, segundo Ghidaoui et al [1] são essencialmente unidireccionais (i.e. segundo a direcção axial), desde que os fluxos de massa, momento, e energia sejam superiores aos seus homólogos radiais. Os mesmos autores referem também que a validade da abordagem unidireccional no estudo do choque hidráulico em condutas é fundamentado pelas pesquisas de Mitra e Rouleau no caso de choque hidráulico laminar, e por Vardy e Hwang no caso deste ser turbulento.

Assim sendo, é fácil perceber que uma situação de choque hidráulico poderá ser particularmente gravosa para o comportamento mecânico e hidráulico de uma conduta sujeita a esse fenómeno.

No caso de ocorrência de elevadas subpressões, poderá ocorrer a separação indesejada da coluna líquida, fenómeno será descrito mais pormenorizadamente no ponto 3.3. Por outro lado, elevadas pressões poderão acarretar vários problemas, tais como a rotura de condutas ou infiltração de água ou ar do exterior para o interior da mesma.

É de notar que no caso de grandes obras hidráulicas, o fenómeno do choque hidráulico poderá ser altamente perigoso, com elevado risco de segurança de pessoas e equipamentos.

A título de exemplo, em 1950 no Japão, na Central Hidroeléctrica de Oigawa, um repentino fechamento de uma válvula borboleta gerou ondas de choque que destruíram as turbinas levando à inundação da sala de maquinaria, resultando em três vítimas fatais (Fig.4.1. /Fig. 4.2.).

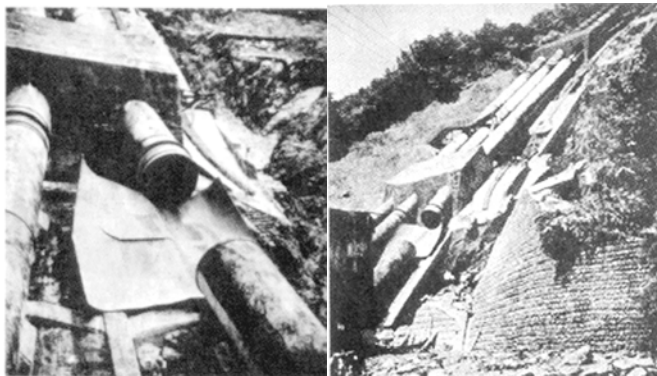


Fig.4.1 - Ruptura de um troço de conduta devido a sobrepressões em Oigawa no Japão [13].

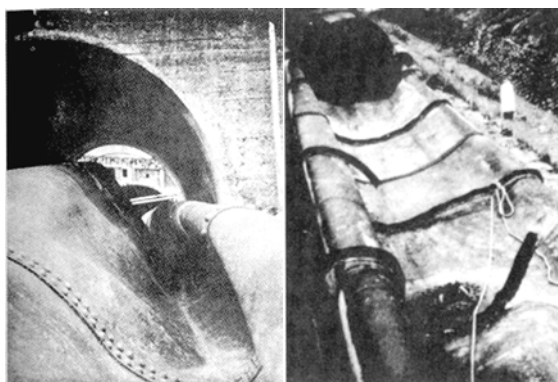


Fig.4.2 – Colapso num segmento da conduta por efeitos de pressões negativas em Oigawa no Japão [13].

Nos Estados Unidos, a ruptura do corpo de uma válvula de agulha na barragem de Bartlett e a quebra de uma conduta forçada de aço no aproveitamento hidroeléctrico de Oneida (Fig. 4.3.), deveram-se ao choque de ondas de pressão originadas pelas elevadas variações de pressão criadas. Como consequência, verificou-se a morte de cinco pessoas [14].



Fig.4.3 – Na Central Hidroelétrica em Big Creek, nos Estados Unidos, deu-se a rotura de uma conduta devido às variações de pressão [13].

A análise dos seus efeitos é particularmente importante nos seguintes sistemas hidráulicos: (i) condutas elevatórias e gravíticas de águas para abastecimento ou residuais, nos sistemas de saneamento básico; (ii) circuitos hidráulicos de aproveitamentos hidroeléctricos com ou sem bombagem (Fig.4.1. /Fig.4.2. e Fig.4.3.); (iii) Condutas sistemas de rega; (iv) circuitos de refrigeração de centrais termoeléctricas ou nucleares; (v) condutas de transporte de fluidos, nomeadamente oleodutos de produtos combustíveis e químicos [15].

4.2 TIPOS DE ESCOAMENTOS TRANSITÓRIOS SOB PRESSÃO

Tal como referido no capítulo anterior, o fenómeno em análise altera o regime permanente de um escoamento sob pressão, resultando em alterações das variáveis que caracterizam o mesmo durante um intervalo de tempo, originando um regime de escoamento variável.

O intervalo de tempo com que se dá essa alteração, de regime permanente para variável, poderá ser muito diferenciado de caso para caso, levando a que surjam também diferentes condições de compatibilidade interna para as diferentes situações. Desta forma, os regimes variáveis podem ser divididos em duas categorias, regimes gradualmente variáveis ou quase-permanentes e regimes rapidamente variáveis.

Na primeira categoria, tal como o nome indica, a transição entre os regimes do escoamento é feita de forma progressiva, em que as variações dos parâmetros do escoamento se dão de forma lenta, atingindo-se as condições de compatibilidade quase sem atraso. Na segunda, as condições de compatibilidade interna são estabelecidas com um atraso significativo, resultando em elevadas variações de pressão e caudal que por sua vez mobilizam forças de natureza elástica resultantes da compressibilidade do fluido e da deformabilidade da conduta [16].

Escoamento transitório ou transiente hidráulico é um regime rapidamente variável entre dois regimes permanentes ou quase-permanentes, resultante de uma alteração no escoamento e posteriormente na estabilização do mesmo, até este atingir as condições iniciais.

Este tipo de escoamento caracteriza-se pelas variações de caudal e pressão capazes de mobilizar forças elásticas, surgindo assim associado ao fenómeno de choque hidráulico.

4.3 EQUAÇÕES FUNDAMENTAIS. HIPÓTESES E SIMPLIFICAÇÕES

A fundamentação matemática do choque hidráulico é baseada na aplicação de três princípios da física, o do equilíbrio dinâmico, o da conservação da massa e primeira lei da termodinâmica, bem como pela lei linear e volumétrica de *Hooke*.

A aplicação destes princípios a um tubo de corrente elementar definido por um trecho elementar da conduta sob pressão, permite desenvolver esses mesmos princípios, possibilitando a dedução das equações fundamentais (globais) através da consideração de algumas simplificações e princípios que se enunciam de seguida.

No que se refere ao comportamento e características do escoamento, considera-se que:

- A distribuição de velocidades e de pressão é uniforme na secção transversal e o escoamento unidimensional;
- Não consideração de fenómenos de cavitação (ver ponto 3.3), uma vez que se considera que o fluído é e se mantém homogéneo e monofásico durante todo o regime transitório;
- O fluído é compressível, sendo a compressibilidade do mesmo caracterizada pelo módulo de elasticidade de volume ε , definido por:

$$\varepsilon = -V \frac{dP}{dV} = \rho \frac{dP}{d\rho} \quad (4.1)$$

Este conceito é sujeito a uma breve descrição no ponto 3.2.

No regime transitório o cálculo das perdas de carga para cada instante é feito através da aplicação das expressões utilizadas para o calculo de perdas de carga num escoamento permanente tangente.

É considerada desprezável a altura cinética, definindo-se a carga H por:

$$H = Z + \frac{P}{\gamma} \quad (4.2)$$

A massa volúmica no interior do tubo de corrente elementar é considerada constante a cada instante, pelo que se pode considerar:

$$\frac{\delta\rho}{\delta x} = 0 \quad (4.3)$$

O comportamento da conduta também é alvo de algumas simplificações e hipóteses, de forma a possibilitar a definição matemática dos escoamentos transitórios sob pressão. Assim sendo, segundo Pacheco Figueiredo [16] é necessária a consideração dos seguintes pressupostos:

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

$$\frac{dz}{dt} = 0 \quad (4.4)$$

- b) A conduta (o invólucro) tem um comportamento elástico regido pela lei de Hooke, sendo caracterizado pelo seu módulo de elasticidade E e pelo coeficiente de Poisson ν .
- c) Em cada instante o diâmetro, espessura do invólucro e características elásticas do trecho elementar da conduta são constantes, admitindo-se que:

$$\frac{\delta S}{\delta x} = 0 \quad (4.5)$$

4.3.1 Equação do Equilíbrio Dinâmico

A equação do equilíbrio dinâmico resulta da aplicação da Equação Geral da Dinâmica ao movimento de um fluido, traduzindo o equilíbrio de um sistema de forças (exteriores e de “inércia”) actuantes num determinado corpo ou volume.

$$\Sigma \vec{F}_{\text{exterior}} + \Sigma \vec{F}_{\text{inércia}} = 0 \quad (4.6)$$

Na sua dedução é considerado um trecho elementar de fluido delimitado por duas secções próximas, contidas em dois planos paralelos distanciadas de dx , e perpendiculares ao eixo da conduta, tal como a figura 3.4 ilustra.

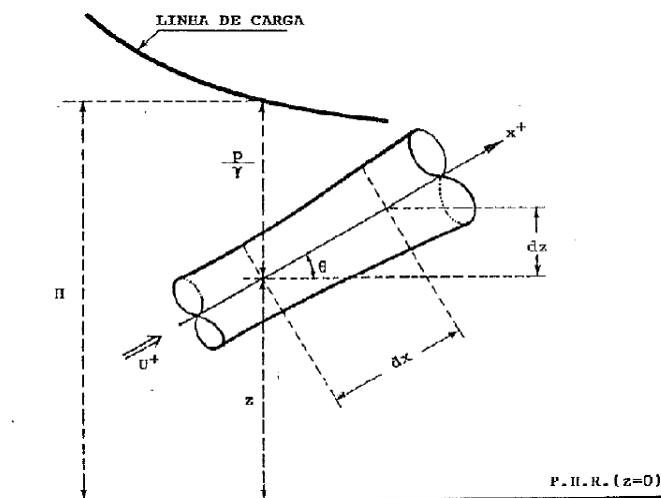


Fig.4.4 - Trecho elementar de conduta [11]

Nas equações a seguir apresentadas, as variáveis dependentes são a pressão P (ou altura piezométrica H) bem como a velocidade média V (ou caudal Q) numa determinada secção S . Como variáveis independentes surgem a distância x sobre o eixo da conduta a partir da extremidade de montante, e o tempo t .

Tal como referido anteriormente, de acordo com Pacheco Figueiredo [16] a equação do movimento reflecte um somatório de forças, as quais são definidas da seguinte forma:

- Forças resultantes da diferença de pressões entre as duas secções da conduta

$$PS - \left(P + \frac{\partial P}{\partial x} dx\right) \left(S + \frac{\partial S}{\partial x} dx\right) = -S \frac{\partial P}{\partial x} dx \quad (4.7)$$

- Força resultante da componente do peso do fluído contido no tubo de corrente elementar

$$-\gamma S \sin \theta dx \quad (4.8)$$

- Força resultante da resistência devido ao atrito do fluído com a conduta. Esta força é tangencial sendo distribuída pela superfície lateral da conduta, em sentido contrário ao escoamento.

$$-\frac{\gamma \lambda U |U| S}{2gD} dx \quad (4.9)$$

Após a simplificações sucessivas das equações anteriormente referidas e considerando o caudal em vez da velocidade, a equação do equilíbrio dinâmico toma a seguinte aspecto:

$$\left[\frac{1}{S} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{Q}{S^2} \frac{\partial Q}{\partial x} + g \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\lambda Q |Q|}{2DS^2} = 0 \right] \quad (4.10)$$

4.3.2 Equação da Conservação da Massa

O princípio da conservação da massa ,numa perspectiva de equação de balanço, estabelece que a diferença de quantidade de massa que entra e sai no interior de um trecho elementar do tubo de corrente iguala a diminuição da quantidade de massa nesse mesmo trecho. Dessa forma pode-se estabelecer que:

$$Ms - Me = \Delta Mi \quad (4.11)$$

Em que a massa que entra no volume de controle, durante um intervalo dt é dada por:

$$Me = \rho Q dt = \rho U S dt \quad (4.12)$$

E a massa que sai nesse mesmo intervalo de tempo é:

$$Ms = \left(\rho + \frac{\partial \rho}{\partial x}\right) \left(U + \frac{\partial U}{\partial x} dx\right) \left(S + \frac{\partial S}{\partial x} dx\right) dt \quad (4.13)$$

A variação da massa no interior do volume elementar é escrita da seguinte forma:

$$\Delta Mi = -\frac{\partial(\rho s)}{\partial t} dxdt \quad (4.14)$$

Substituindo as equações anteriores na equação do balanço, desenvolvendo e arrumando as diferentes parcelas no primeiro membro da igualdade, chega-se à seguinte expressão:

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{S} \frac{\partial S}{\partial t} = 0 \quad (4.15)$$

A substituição destas equações não possibilita um tratamento numérico adequado, sendo necessário alterá-la de modo a que as variações de secção S e massa volúmica do fluido ρ sejam expressas à custa das variáveis do problema como o caudal Q (ou a velocidade U) e a pressão (ou carga H).

Para tal, considere-se que a segunda parcela da equação (4.15) é equivalente a :

$$\frac{1}{\varepsilon} \frac{d\rho}{dt} \quad (4.16)$$

tal como demonstrado em [16], chegando-se à seguinte equação da conservação da massa:

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{1}{\varepsilon} \frac{d\rho}{dt} + \frac{1}{S} \frac{\partial S}{\partial t} = 0 \quad (4.17)$$

Tendo em conta a expressão (4.5), bem como a consideração de que a derivada parcial da secção em ordem ao tempo pode ser expressa pela derivada total, após a multiplicação por ρ , o desenvolvimento da 3ª parcela conduz à introdução de uma nova variável na expressão da conservação da massa, a celeridade - a .

Como será analisado posteriormente, a celeridade desempenha um papel de extrema importância no fenómeno em estudo. De acordo com o enunciado no ponto 3.1 a celeridade pode ser definida por:

$$a = \frac{1}{\sqrt{\frac{\rho}{\varepsilon} + \frac{\rho dS}{S dP}}} \quad (4.18)$$

a equação anterior transforma-se em:

$$\rho \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{1}{a^2} \frac{dP}{dt} = 0 \quad (4.19)$$

Após sucessivas deduções e considerando os pressupostos definidos no capítulo anterior, tais como a consideração da imobilidade do eixo (Eq. 4.4) ou o facto de se considerar desprezável a variação da massa volúmica comparativamente à variação de carga, é possível obter a equação de Conservação da Massa para um escoamento transitório considerando como variáveis o caudal Q ou U e a carga H , tal como se indica nas seguintes expressões:

$$\left[\frac{\partial H}{\partial t} + U \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{a^2}{g} \frac{\partial U}{\partial x} - U \sin \theta = 0 \right] \quad (4.20)$$

$$\left[\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{Q}{S} \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{a^2}{gS} \frac{\partial Q}{\partial x} - \frac{Q}{S} \sin \theta = 0 \right] \quad (4.21)$$

Finalmente é de referir a primeira lei da termodinâmica está presente pelo facto de se considerar a perda de carga no princípio da conservação de massa.

4.4 RESOLUÇÃO DAS EQUAÇÕES FUNDAMENTAIS

As equações do Equilíbrio Dinâmico e da Conservação da Massa atrás introduzidas constituem um par de equações indefinidas do regime variável sob pressão, sendo necessário definir condições fronteira para que estas possam ser integradas, isto é, tornando possível a obtenção de uma solução analítica. As fronteiras têm uma grande importância nesta análise pois são estas que definem a forma como se desenvolve o regime transitório.

De forma a identifica-las e defini-las, considere-se a conduta elevatória ilustrada na figura 4.5 constituída por uma bomba hidráulica (B), uma válvula de retenção (VR) colocada imediatamente a jusante da bomba, acopladas a uma conduta de comprimento L que permite a condução da água até um reservatório (R) implementado a uma cota superior.

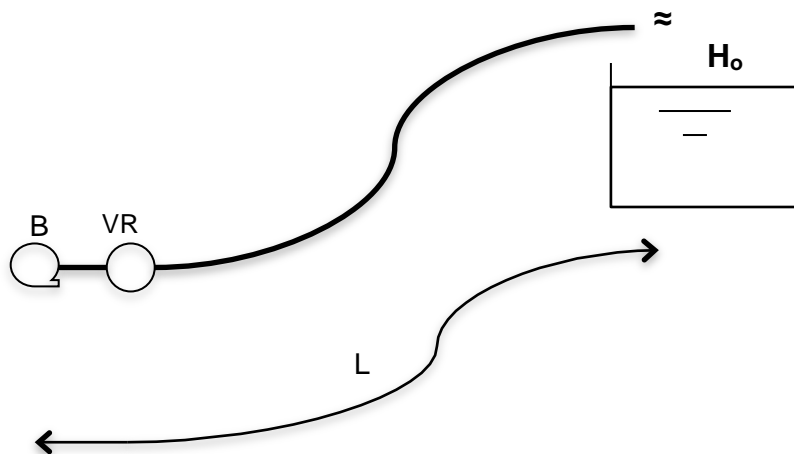


Fig.4.5 - Esquema de um sistema elevatório

Neste caso as condições a considerar encontram-se nas extremidades da conduta (domínio unidimensional), são as secções do reservatório e da bomba hidráulica.

No que concerne à secção do reservatório o nível de água é considerado constante, logo a carga também o será. A tradução analítica desta condição para cada valor de caudal pode ser escrita como:

$$H = H_0 = \text{constante} \quad (4.22)$$

Para se estabelecer uma condição fronteira na bomba é necessário definir uma relação entre parâmetros que caracterizam o funcionamento desta. Recorrendo-se à curva característica da bomba, é possível relacionar a altura manométrica H , com o caudal Q a bombear. As condições atribuídas a uma bomba são dependentes da influência que o seu comportamento tem nas alterações do escoamento. No exemplo em análise, a bomba apresentará um comportamento activo no escoamento, isto é, o seu comportamento influencia directamente o modo como este se dá, uma vez que interessa perceber o efeito produzido pela sua paragem devido a uma falha súbita de corrente,

Assim, para este caso, Pacheco Figueiredo [16] estabelece duas equações para reger a condição de fronteira dinâmica da bomba:

- a) A equação diferencial que estabelece a relação dinâmica entre a cinemática do movimento de rotação das massas girantes e o momento actuante sobre as mesmas.

Como ponto de partida para a dedução desta equação admite-se que as massas girantes da bomba são rígidas, tornando possível escrever a seguinte equação diferencial:

$$M_0 = M_m - M_r = \alpha_b I_0 \quad (4.23)$$

em que:

M_0 – momento actuante sobre as massas girantes da bomba

M_m – momento motor

M_r – momento resistente

α_b -aceleração angular das massas girantes da bomba

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

Após algumas considerações para os valores dos momentos resistente e do motor, é possível obter uma equação diferencial das massas girantes, que integrando entre os instantes t_i e t_{i+1} recorrendo a uma técnica de diferenças finitas se obtém:

$$N_{i+1} - N_i = -\frac{900\gamma}{\pi^2 I_0} \left[\frac{Q_b H_b}{N\eta} \right]_{t_1+k\Delta t} (t_{i+1} - t_i) \quad (4.24)$$

Na expressão apresentada a variável N exprime a velocidade de rotação da bomba em rotações por minuto (r.p.m) entre o instante t_{i+1} e t_i , H_b a altura de elevação da bomba, γ e η o peso volúmico da água e o rendimento da bomba respectivamente.

No entanto, torna-se conveniente adoptar a integração explícita ($k=0$) para evitar um processo iterativo, resultando a lei de paragem da bomba que se escreve do seguinte modo:

$$N_{i+1} - N_i = -\frac{900Y}{\pi^2 I_0} \left[\frac{Q_b H_b}{N \eta} \right]_{t_1} (t_{i+1} - t_i) \quad (4.25)$$

O valor do momento de inércia I_0 relaciona o parâmetro PD^2 da bomba que pode ser obtido através de expressões experimentais, com a potência e regime da bomba. No entanto é aconselhável a utilização do valor recomendado pelo fabricante para este parâmetro. A expressão que relaciona PD^2 com I_0 é:

$$PD^2 = 4gI_0 \quad (4.26)$$

expresso em $N.m^2$

b) A equação representativa das curvas características da bomba, que estabelece a relação existente entre a altura manométrica H_b , a velocidade de rotação da bomba N e o caudal bombeado Q_b . No caso de bombas centrífugas essas relações podem ser dadas por:

$$H_b = AN^2 + BNQ_b - CQ_b^2 \quad (4.27)$$

sendo A, B e C coeficientes que dependem da bomba e podem ser obtidos através da curva característica da bomba para determinada velocidade de rotação em regime permanente.

Para a determinação da lei de funcionamento é suficiente conhecer a zona normal de funcionamento de bombagem.

Geralmente num sistema elevatório está presente uma válvula de retenção a jusante da bomba que impede o retorno da água, pelo que o caudal bombeado não pode ter valores negativos. Deste modo, a curva estará presente apenas no primeiro quadrante com as curvas a prolongarem-se pela recta $Q_b=0$ para valores de H_b superiores ao do funcionamento no vazio (Fig.4.6).

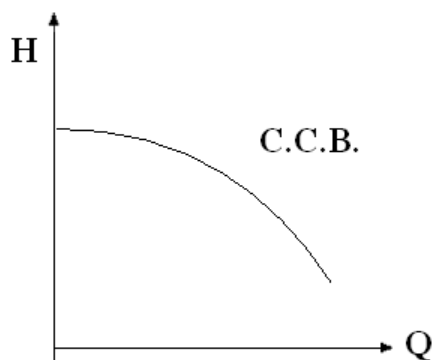


Fig.4.6 - Curva Característica de uma bomba

4.5 MÉTODOS NUMÉRICOS PARA A RESOLUÇÃO DAS EQUAÇÕES

Como referido anteriormente, o estudo do regime variável é regido pelas equações da Dinâmica e da Conservação da Massa (eq. 4.10 e 4.21)

A impossibilidade de obtenção de uma solução exacta quando se integra as referidas equações de forma a encontrar expressões que exprimam o comportamento do caudal Q e da carga H em função das variáveis independentes x e t , leva à necessidade de se recorrer a métodos mais ou menos complexos que permitam a obtenção de valores aproximados.

Nos vários métodos de estudo, alguns deles são mais complexos do que outros (métodos gráficos e analíticos) baseados em diferentes suposições restritivas. Numa solução explícita, por exemplo, os valores de H e Q podem ser calculados para qualquer valor dado de x e t . Por sua vez, numa solução numérica, a solução destas equações é obtida para valores conhecidos de H e Q num determinado instante.

Os primeiros métodos, ainda que simples, são atribuídos a Allievi que no início do século XX concebeu um método numérico e a Schnyder-Bergeron na década de 30 apresentam um método gráfico.

Allievi no seu método define condições fronteira de forma muito simplificada e considera as perdas de carga desprezáveis, facto que muitas não é justificável na prática, obtendo assim para alguns casos simples soluções formais. O último admite que no seu método, as perdas de carga são conseguidas através de diafragmas localizados em determinadas secções.

Estes métodos apesar da sua simplicidade e conseqüente facilidade de compreensão para o estudo do fenómeno do choque hidráulico obtiveram muita popularidade. No entanto, devido à sua menor aproximação à solução pretendida, estes métodos revelaram-se insuficientes para análise de grandes sistemas pois estes apresentam condições fronteira complexas, o que tornaram os referidos métodos inutilizáveis nessas situações.

Com o advento do computador, desenvolveram-se vários modelos computacionais, que permitiram evoluir para métodos numéricos mais complexos, como por exemplo, o Método das Diferenças Finitas (implícito ou explícito), o Método das Características, o Método dos Elementos Finitos, o Método Espectral e o Método dos Elementos de Contorno [17].

Os métodos computacionais tornam-se assim uma ferramenta vantajosa no ponto de vista da engenharia, na medida em que permite a análise de sistemas mais complexos num menor intervalo de tempo, obtendo resultados mais precisos.

De referir que o método das características, actualmente é um dos métodos mais utilizado devido à sua eficiência e pela possibilidade de definir condições fronteira ou de contorno muito diversas.

Outros pontos fortes deste método, são por exemplo a facilidade de escrever e implementar um programa de computador, por meio de uso do esquema explícito e o facto da sua conceituação e fundamentação exprimir adequadamente a natureza física real do escoamento variável sob pressão.

4.5.1 Método Numérico de Allievi

Para determinar as equações de Allievi resultantes da integração das equações indefinidas (4.10) e (4.21) é necessário considerar a horizontalidade da conduta ($\text{sen}\theta = 0$), que o valor das perdas de carga(λ) face ao efeitos das subpressões causadas pelo choque é desprezável, bem como os termos convectivos. Assim obtém-se uma nova versão das equações diferenciais para o regime transitório sob pressão, resultando no seguinte sistema de equações a resolver:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \frac{1}{s} \frac{\partial Q}{\partial t} = -g \frac{\partial H}{\partial x} \quad (4.28)$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{gS} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \Leftrightarrow \frac{\partial U}{\partial x} = -\frac{g}{a^2} \frac{\partial H}{\partial t} \quad (4.29)$$

Aplicando o teorema de Swartz, é possível derivar as equações apresentadas anteriormente em ordem a x e a t respectivamente.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial U}{\partial t} \right) = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial U}{\partial x} \right) \Leftrightarrow \begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial U}{\partial t} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(-g \frac{\partial H}{\partial x} \right) = -g \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} \\ \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial U}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial t} \left(-\frac{g}{a^2} \frac{\partial H}{\partial t} \right) = -\frac{g}{a^2} \frac{\partial^2 H}{\partial t^2} \end{cases} \Leftrightarrow a^2 \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 H}{\partial t^2} \quad (4.30)$$

Definindo agora um novo sistema de equações diferenciais, de forma análoga à anterior, alterando apenas as variáveis em análise, tem – se que:

$$\frac{\partial H}{\partial x} = -\frac{1}{gS} \frac{\partial Q}{\partial t} \quad (4.31)$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} = -\frac{a^2}{Sg} \frac{\partial Q}{\partial x} \quad (4.32)$$

Aplicando o teorema supracitado, integrando agora a expressão 4.31 em ordem a t e 4.32 em ordem a x resulta:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial H}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial H}{\partial t} \right) \Rightarrow \begin{cases} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial H}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial t} \left(-\frac{1}{gS} \frac{\partial Q}{\partial t} \right) = -\frac{1}{gS} \frac{\partial^2 Q}{\partial t^2} \\ \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial H}{\partial t} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(-\frac{a^2}{Sg} \frac{\partial Q}{\partial x} \right) = -\frac{a^2}{Sg} \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} \end{cases} \Rightarrow \frac{1}{S} \frac{\partial^2 Q}{\partial t^2} = \frac{a^2}{S} \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} \quad (4.33)$$

Estas equações diferenciais de segunda ordem(equações hiperbólicas) são do tipo das “Equações das Cordas Vibrantes” cuja integral geral apresenta a seguinte forma:

$$\left[\begin{array}{l} H(x, t) = H_0 + F\left(t - \frac{x}{a}\right) + f\left(t + \frac{x}{a}\right) \\ Q(x, t) = Q_0 + \frac{gS}{a} \left[F\left(t - \frac{x}{a}\right) - f\left(t + \frac{x}{a}\right) \right] \end{array} \right] \quad (4.34)$$

$$(4.35)$$

Estas equações, são as Equações de Allievi, em que $F(x,t)$ e $f(x,t)$ têm as dimensões de uma altura e são interpretadas como ondas de pressão indeformáveis, válidas ao longo de trechos de condutas com as mesmas características.

Quando se dá um abaixamento de pressão na conduta devido à paragem da bomba a perturbação propaga-se para jusante através de ondas de pressão F que se deslocam com uma grande celeridade (a). Estas ondas reflectem-se no reservatório, dando origem a ondas f (Fig.4.7).

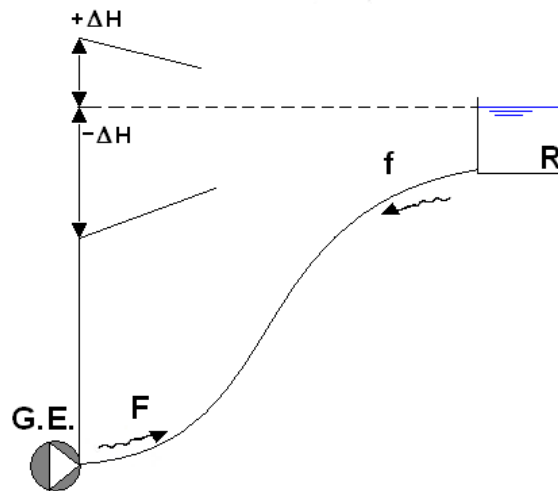


Fig. 4.7. – Ondas F e ondas f

A equação 4.34 mostra que a pressão existente numa determinada secção da conduta numa secção x e no instante t da perturbação é a soma de três tipos de pressão:

- Pressão estática H_0 , correspondente ao regime permanente
- Pressão $F\left(t - \frac{x}{a}\right)$ variável no espaço e no tempo. No entanto, se $t - \frac{x}{a}$ for constante, significa que a onda de pressão (depressão) se desloca da bomba em direcção ao reservatório com uma determinada celeridade, pois:

$$\frac{d}{dt} \left(t - \frac{x}{a} \right) = 0 \Rightarrow \frac{dx}{dt} = a \quad (4.36)$$

- Pressão $f\left(t + \frac{x}{a}\right)$, que de modo análogo ao da onda F , se conclui que a onda se desloca com uma celeridade $-a$ na direcção da bomba.

$$\frac{d}{dt} \left(t + \frac{x}{a} \right) = 0 \Rightarrow \frac{dx}{dt} = -a \quad (4.37)$$

Em suma, conclui-se que para se conhecer os valores de pressão (H) e caudal(Q) em qualquer secção da conduta elevatória durante o regime transitório é necessário obter os valores de F e f, ficando assim o problema com quatro incógnitas por resolver(H,Q,F e f).

Assim sendo, torna-se necessário definir condições de fronteira no reservatório, nas bombas e outros equipamentos que possam existir como por exemplo, um RAC. Para um estudo mais completo do método de Allievi (definição das condições fronteira) e do seu algoritmo de cálculo, recomenda-se a bibliografia consultada, nomeadamente Pacheco Figueiredo [16].

4.5.2 Método das Características

Neste método, a interpretação do fenómeno segue uma lei de propagação de ondas ao longo de uma conduta associando o tempo t e a coordenada ao largo do desenvolvimento da conduta x através da celeridade. As equações indefinidas (4.10) e (4.21) são transformadas em equações diferenciais ordinárias integráveis pelo método das diferenças finitas, resultando assim num sistema de equações parciais hiperbólicas quase lineares [16],[17].

Tal como no método de Allievi anteriormente introduzido, desprezando os termos convectivos das equações (4.10) e (4.21) adquire-se a seguinte abreviação das equações:

$$L_1=0 \Leftrightarrow \frac{\partial Q}{\partial x} + gS \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\lambda Q|Q|}{2DS} = 0 \quad (4.38)$$

$$L_2=0 \Leftrightarrow gS \frac{\partial H}{\partial t} + a^2 \frac{\partial Q}{\partial x} - gQ \sin \theta = 0 \quad (4.39)$$

Como L_1 e L_2 são iguais a zero, a combinação das equações lineares através da multiplicação da equação do movimento por um parâmetro β , é também nula:

$$L = L_1 + \beta L_2 = 0 \quad (4.40)$$

Resultando:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \beta a^2 \frac{\partial Q}{\partial x} + \beta gS \left(\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{1}{\beta} \frac{\partial H}{\partial x} \right) + F|Q|Q - \beta gQ \sin \theta = 0 \quad (4.41)$$

considerando que

$$F = \frac{\lambda}{2DS} \quad (4.42)$$

Desta forma, a cada valor de β corresponde uma nova equação diferencial. Assim, interessa escolher um determinado par de valores de β que transforme as duas equações diferenciais parciais ($L_1=0$ e $L_2=0$), em duas equações diferenciais ordinárias ($A_1=0$ e $A_2=0$).

Para obter as referidas equações, pode-se optar por dois caminhos distintos, a integração em ordem ao espaço ou em ordem ao tempo.

Como referido por Pacheco Figueiredo [16], ambos os pares de equações obtidas são equivalentes. No entanto quando se procede a uma integração no espaço, as equações características C^+ e C^- apresentam formas finais mais próximas da adequada à integração. Pelo motivo mencionado, no presente trabalho apenas será demonstrada a integração ao espaço

Considerando os diferenciais totais das variáveis dependentes Q e H e dividindo-as por dx , tem-se que:

$$\frac{dQ}{dx} = \frac{\partial Q}{\partial t} \frac{dt}{dx} + \frac{\partial Q}{\partial x} \quad (4.43)$$

$$\frac{dH}{dx} = \frac{\partial H}{\partial t} \frac{dt}{dx} + \frac{\partial H}{\partial x} \quad (4.44)$$

sendo que:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{1}{\beta} = \beta a^2 \Rightarrow \frac{dt}{dx} = \frac{1}{\beta a^2} = \beta \quad (4.45)$$

Esta condição tem duas consequências, a fixação do valor de β e a definição da relação entre as variáveis independentes x e t para qual é válida a combinação linear das equações diferenciais citada anteriormente.

Da expressão anterior deduz-se facilmente que

$$\frac{1}{\beta} = \beta a^2 \Rightarrow \beta = \pm \frac{1}{a} \quad (4.46)$$

Assim, resulta que a relação entre x e t devido ao conhecimento de β :

$$\frac{dx}{dt} = +a \text{ para } \beta = +\frac{1}{a} \quad (4.47)$$

Ou

$$\frac{dx}{dt} = -a \text{ para } \beta = -\frac{1}{a} \quad (4.48)$$

Substituindo na combinação linear das equações diferenciais 4.41 as equações 4.43, 4.44 e 4.45, obtêm-se dois novos conjuntos de equações que se podem escrever do seguinte modo:

- **Equações C^+** , para um conjunto de equações $\beta = +\frac{1}{a}$

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

$$\frac{dx}{dt} = +a \quad (4.50)$$

- **Equações C-**, para um conjunto de equações $\beta = -\frac{1}{a}$

$$\frac{dH}{dx} - \frac{a}{gS} \frac{dQ}{dx} + \frac{F|Q|Q}{gS} + \frac{Q}{as} \sin \theta = 0 \quad (4.51)$$

$$\frac{dx}{dt} = -a \quad (4.52)$$

Se se considerar uma representação cartesiana das variáveis x e t como na figura ilustrada a seguir, em que a celeridade a é constante, a integração das equações 4.50 e 4.52 conduz respectivamente a :

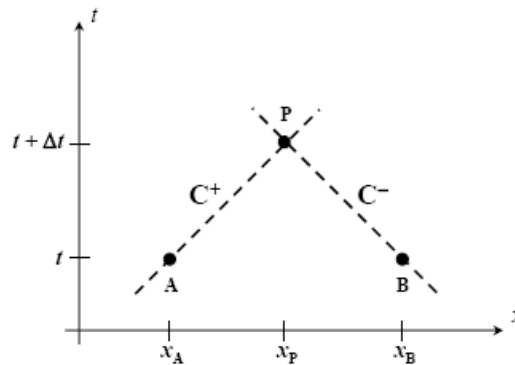


Fig. 4.8 - Linhas características [13]

$$x_P - x_A = a(t_P - t_A) \quad (4.53)$$

$$x_P - x_B = a(t_P - t_B) \quad (4.54)$$

Simplificando as equações 4.49 e 4.51 e integrando-as entre A e P e entre B e P, obtém-se respectivamente:

$$\left\{ \begin{array}{l} C^+: H_P - H_A + \frac{a}{gS} (Q_P - Q_A) + I^+ = 0 \end{array} \right. \quad (4.55)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} C^-: H_P - H_B + \frac{a}{gS} (Q_P - Q_B) + I^- = 0 \end{array} \right. \quad (4.56)$$

Em que I^+ e I^- correspondem à integração das perdas de carga e do efeito produzido pela inclinação da conduta, que integradas por métodos numéricos aproximados podem ser escritas sinteticamente:

$$I^+ = (1 - K)(R_A - T_A)|Q_A|Q_A + K(R_P - T_P)|Q_P|Q_P \quad (4.57)$$

$$I^- = -(1 - K)(R_B + T_B)|Q_B|Q_B + K(R_P - T_P)|Q_P|Q_P \quad (4.58)$$

Em que para uma dada secção da conduta se definem os parâmetros R (perdas de carga) e T (inclinação da conduta) da seguinte forma:

$$R = \frac{\lambda}{2gDS^2} \Delta x \quad (4.59)$$

$$T = \frac{\sin \theta}{aS|Q|} \Delta x \quad (4.60)$$

No que se refere ao factor de ponderação K, é conveniente adoptar o valor 0,5 para considerar uma integração numérica que valorize do mesmo modo as perdas de carga e a inclinação da conduta nos extremos dos intervalos de integração.

Agora, é possível reescrever as equações características em que conhecendo os valores de Q e H nas secções A e B permitam constituir um sistema em que as incógnitas são H_p e Q_p .

$$\left\{ \begin{array}{l} C^+ : H_p + [A + K(R_P - T_P)|Q_P|]Q_p - C_A = 0 \end{array} \right. \quad (4.61)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} C^- : H_p + [A + K(R_P + T_P)|Q_P|]Q_p - C_B = 0 \end{array} \right. \quad (4.62)$$

desde que se considere:

$$A = \frac{a}{gS} \quad (4.63)$$

$$C_A = H_A + [A - (1 - K)(R_A - T_A)|Q_A|]Q_A = 0 \quad (4.64)$$

$$C_B = H_B - [A - (1 - K)(R_A + T_B)|Q_B|]Q_B = 0 \quad (4.65)$$

De notar que é necessário desdobrar o parâmetro relativo à inclinação da conduta, em particular quando se refere à secção P, pois quando ocorre uma mudança de inclinação nessa secção, o referido parâmetro toma valores diferentes à esquerda e à direita (Fig.4.9).

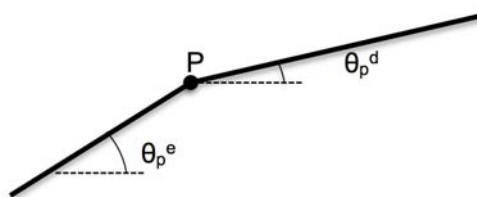


Fig.4.9 – Mudança de inclinação da conduta

Retomando o cálculo de Q_p e H_p através da soma e da subtração ordenada das equações características referidas anteriormente, resolvendo em ordem a H_p e Q_p respectivamente obtém-se:

$$H_p = \frac{K(T_p^e + T_p^d)|Q_p|Q_p + C_A + C_B}{2} \quad (4.66)$$

$$Q_p = \frac{C_A - C_B}{A_1} \quad (4.67)$$

sendo

$$A_1 = A + \sqrt{A^2 + 2K(R_p + \frac{T_p^d}{2} - \frac{T_p^e}{2})|C_A - C_B|} \quad (4.68)$$

Assim, conhecendo previamente os valores do caudal e de carga em A e B relacionados pelas equações características 4.53 e 4.54, é possível determinar os seus valores em P através das expressões 4.66 e 4.67.

Por fim, falta ultrapassar a dificuldade criada pelo surgimento do parâmetro da perda de carga na equação resolvente do caudal 4.67, uma vez que esse parâmetro é função do caudal.

Este obstáculo pode ser contornado considerando o escoamento turbulento rugoso, o que significa que a perda de carga é apenas dependente da rugosidade da conduta.

$$R = constante \Rightarrow \lambda = \lambda\left(\frac{K}{D}\right) \quad (4.69)$$

Pacheco Figueiredo [16] sugere alternativamente um processo iterativo, em que tomando o valor de Q_p no instante anterior se obtém uma primeira aproximação de R_p , permite convergir para valores Q_p e R_p compatíveis. Resolvendo desta forma a equação 4.67, determinação H_p através de 4.66.

Obtidas as equações características, torna-se necessário definir as condições fronteira correspondentes aos elementos pertencentes ao sistema elevatório, que no presente trabalho, será logicamente constituído por um Reservatório de Ar Comprimido na fronteira de montante, conjuntamente com a presença da bomba, tal como ilustra a figura 4.10.

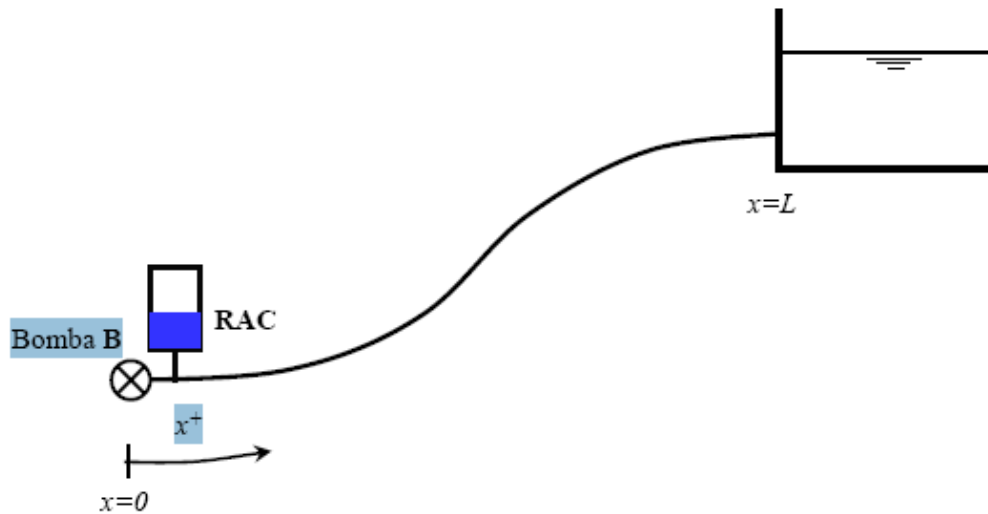


Fig.4.10 – Localização do RAC no circuito hidráulico [18]

Para o caso da modelação da fronteira de jusante, tal como referido no ponto 4.4, a carga no reservatório de jusante é constante e igual à cota topográfica da superfície da água ou da extremidade da conduta caso a descarga seja feita para a atmosfera.

Substituindo as equações C^+ e C^- por condições fronteira adequadas, têm-se respectivamente as equações resolventes do caudal e da carga. Assim, na secção imediatamente a montante da extremidade da conduta o caudal é expresso por:

$$Q_P = \frac{2C_A - Z_R}{A_2} \quad (4.70)$$

em que

$$A_2 = A + \sqrt{A^2 + 4(K_L + KR_P - KT_P^e)|Z_R - C_A|} \quad (4.71)$$

A carga na mesma secção é dada por:

$$H_P = Z_R + K_L|Q_P|Q_P \quad (3.72)$$

O valor de H_P pode ser obtido pela substituição do caudal determinado com recurso à expressão anteriormente escrita, na expressão 4.66 ou 4.72.

De referir que o parâmetro K_L correspondente ao coeficiente de perda de carga localizada pode apresentar valor nulo quando se considerarem desprezáveis essas perdas.

No grupo elevatório, a obtenção da equação resolvente do caudal é obtida pela substituição da curva característica da bomba na equação C^+ , sendo a expressão daí resultante inserida na equação C^- . Recorrendo a uma integração numérica explícita ($K=0$), a raiz positiva obtida é dada por:

$$Q_P = \frac{BN-A}{2C} + \frac{1}{2C} \sqrt{(BN-A)^2 + 4C(DN^2 - C_B)} \quad (4.73)$$

A carga H_P pode ser determinada por:

$$H_P = AQ_P + C_B \quad (4.74)$$

Esta expressão só é válida no caso de $C_B \leq DN^2$, caso contrário, se $C_B > DN^2$ e $A > BN$ (em geral $A \gg BN$) deve-se tomar $Q_P = 0$, uma vez que se pode obter uma solução negativa.

Observe-se que o parâmetro D é relativo ao parâmetro A da equação da CCB definida pela equação 4.27, sendo utilizada esta nomenclatura para evitar confusão com o parâmetro A definido anteriormente.

Como atrás exposto, o estudo do choque hidráulico pelo método descrito consta da quantificação do caudal e da carga na secção da bomba, a partir da qual se determina essas variáveis nas restantes secções da conduta. No caso da presença de um RAC no sistema, o problema adquire cinco novas incógnitas e outras tantas equações ao método.

As incógnitas adicionais são:

Q_{RAC} – Caudal no de saída do RAC

Q_P – Caudal na inserção do tubo de ligação do RAC à conduta (ponto P)

H_{RAC} – Carga no RAC

P_{RAC} – Altura piezométrica do ar no RAC

V_{RAC} – Volume de ar no RAC

Este novo sistema de equações é impossível de resolver, pelo que se torna necessário recorrer a um processo iterativo.

Antes de se proceder à introdução das novas variáveis no método numérico exposto, interessa descrever as mesmas bem como as equações a elas associadas e que traduzem o comportamento do RAC.

De acordo com a figura 4.11, aplicando a lei da continuidade no ponto P, facilmente se conclui que:

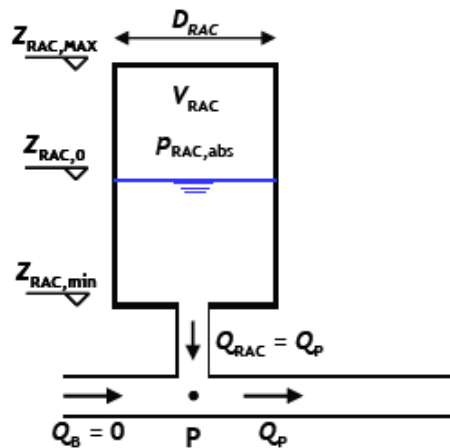


Fig. 4.11 – Lei da Continuidade no RAC[13]

$$Q_P = Q_B + Q_{RAC} \quad (4.75)$$

Admitindo a paragem instantânea do grupo elevatório:

$$Q_B = 0 \quad \text{então} \quad Q_P = Q_{RAC} \quad (4.76)$$

Em seguida serão expostas as equações definidoras do comportamento do RAC com a forma e a ordem adequadas à utilização no processo de cálculo.

1) Volume de ar no RAC - V_{RAC}

No que se refere ao volume de ar no RAC, a sua variação é feita através da compatibilidade entre os volumes de ar e água no seu interior. Facilmente se conclui que uma diminuição do volume de água implica necessariamente um aumento do volume de ar no seu interior para o mesmo instante de tempo e vice-versa. Deste modo, o aspecto final da expressão do volume de água no RAC é:

$$V_{RAC}(t + \Delta t) = V_{RAC}(t) + [(1 - K)Q_P(t) + KQ_P(t + \Delta t)]\Delta t \quad (4.77)$$

Saliente-se que o volume de ar no reservatório não pode superar o volume total do mesmo, sob pena de introduzir ar na conduta, sendo mesmo aconselhado prever uma margem de segurança adequada. O parâmetro K é um factor de ponderação com valor 0,5.

2) A cota topográfica da superfície livre da água no RAC - Z_{RAC}

A cota topográfica Z_{RAC} da superfície livre da água no RAC varia durante o regime transitório, sendo muitas vezes considerado constante para simplificação de cálculos. No entanto, se a geometria do RAC for conhecida, é possível estabelecer uma relação analítica entre o volume de ar e água do reservatório e a cota topográfica referida, através da seguinte equação:

$$Z_{RAC}(t + \Delta t) = \frac{4V_{RAC}(t+\Delta t)}{\pi(D_{RAC})^2} - Z_{RAC,MAX} \quad (4.78)$$

3) Altura piezométrica do ar no RAC - $P_{RAC,abs}$

Considerando a incompressibilidade da água, o ar (comprimido) confinado no reservatório está sujeito à seguinte lei, definida por equação politrópica de estado:

$$PV^n = constante \Rightarrow P_{RAC} = P_{RAC,0} \left(\frac{V_{RAC,0}}{V_{RAC}} \right)^n \quad (4.79)$$

Para o instante $t+\Delta t$ os parâmetro $P_{RAC,0}$ e $V_{RAC,0}$ representam, respectivamente, a altura piezométrica absoluta e o volume de ar iniciais. O expoente n é o expoente politrópico, cujo valor depende do processo termodinâmico do ar. Se o processo for isotérmico (gás perfeito) toma o valor unitário, por outro lado se o processo for adiabático assume o valor de 1,4 .

Uma vez que n pode variar entre esses valores, em geral, assume-se que $n = 1,4$, por ser uma hipótese a favor da segurança, e tendo em conta que a diferença nos resultados que se pode obter é limitada.

4) Carga no RAC - H_{RAC}

A carga (H_{RAC}) pode ser obtida em função da altura piezométrica absoluta do ar ($P_{RAC,abs}$), da cota topográfica da superfície livre (Z_{RAC}) e pela pressão atmosférica (P_{atm}), tal como se apresenta na seguinte expressão

$$P_{RAC,abs} = H_{RAC} - Z_{RAC} + P_{atm} \Leftrightarrow H_{RAC} = P_{RAC,abs} + Z_{RAC} - P_{atm} \quad (4.80)$$

5) Caudal na inserção do tubo de ligação do RAC à conduta - Q_P

A equação característica C^- , escrita para a extremidade da conduta (bomba+RAC) no instante $t+\Delta t$ e para a primeira secção da malha de aplicação do Método das Características a jusante do conjunto bomba + RAC no instante t , tem o seguinte aspecto:

$$C^-: H_P + [A + KR_P|Q_P|]Q_P - C_B = 0 \quad (4.81)$$

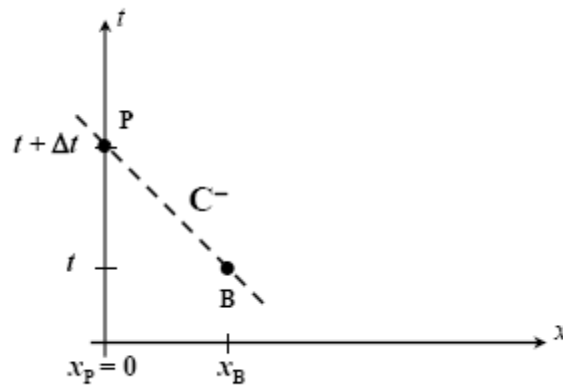


Fig. 4.12 - Método das Características – Aplicação à Fronteira de Montante. [18]

em que:

$$C_B = H_P - [A + KR_P|Q_P|]Q_P \quad (4.82)$$

Resolvendo em ordem ao caudal, considerando que a soma de R_P com T_P maior ou igual a zero, resulta em:

$$Q_P = \frac{2(H_P - C_B)}{A_3} \quad (4.83)$$

sendo

$$A_3 = A + \sqrt{A^2 + 4(K_{RAC} + KR_P)|C_B - H_{RAC}|} \quad (4.84)$$

6) Carga no ponto de inserção do tubo de ligação do RAC à conduta - H_P

Durante o escoamento variável, a igualdade das cargas entre o escoamento na conduta principal e o RAC é desfeita devido à perda de carga na tubeira, sendo a carga no ponto P dada por:

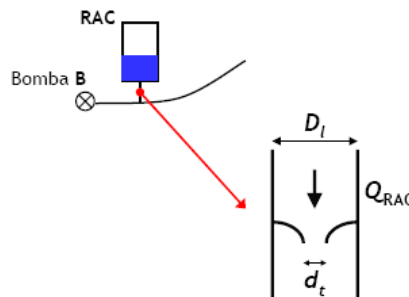


Fig. 4.13 – Dimensões de tubeira no RAC [18]

$$H_P = H_{RAC} - K_{tb}|Q_{RAC}|Q_{RAC} \quad (4.85)$$

No processo iterativo toma-se como primeira aproximação que $Q_p(t+\Delta t)=Q_p(t)$. Conhecidas as variáveis num dado instante t , a sua determinação no instante seguinte é iniciada pela equação do Volume de Ar no RAC.

Resolvendo as seis equações pela ordem apresentada obtém-se um novo valor de QP obviamente diferente do inicialmente considerado, que inserido novamente na primeira equação permite a determinação das restantes equações pertencente ao sistema de equações. Após a repetição sucessiva deste procedimento, quando as diferentes variáveis apresentem variações inferiores a um limite estabelecido (erro), dá-se por concluído o processo iterativo para um determinado instante, seguindo-se para o instante seguinte.

Se para Q_B resultar um valor negativo, a presença da válvula de retenção impõe que Q_B seja considerado nulo.

5

INTERPRETAÇÃO FÍSICA DO FENÓMENO DO CHOQUE HIDRÁULICO

De forma a analisar qualitativamente o fenómeno em estudo procura-se neste subcapítulo interpretar o mesmo em duas situações distintas. Primeiramente uma análise do choque hidráulico numa conduta gravítica horizontal e, posteriormente, numa conduta elevatória.

O sistema hidráulico não é o único condicionante no desenvolvimento do fenómeno em causa, uma vez que este depende também do tipo de manobra do órgão obturador, no caso de uma conduta gravítica, ou do tempo de anulação do caudal bombeado, caso se trate de um sistema elevatório.

Contudo, a tipo exemplificativo, descrever-se-á o fenómeno apenas considerando uma manobra do tipo instantânea, ou seja, uma manobra de tempo reduzido, nulo ou teoricamente desprezável.

Antes de desenvolver o procedimento descrito anteriormente, efectuou-se a divisão do fenómeno em várias etapas para facilitar a compreensão e enquadramento temporal do desenvolvimento das variáveis em questão (pressão e velocidade) no desenrolar do fenómeno, através de uma relação entre o seu número da etapa e o índice dos valores de pressão e velocidade, tal como explicitado no quadro seguinte:

Quadro 1 - Etapas a considerar na análise do fenómeno de Choque Hidráulico

Etapa	Intervalo de Tempo	Pressão	Velocidade
0	0	P_0	U_0
1	$]0 - L/a]$	P_1	U_1
2	$]L/a - 2L/a]$	P_2	U_2
3	$]2L/a - 3L/a]$	P_3	U_3
4	$]3L/a - 4L/a]$	P_4	U_4

5.1 CONDUTAS GRAVÍTCAS

Suponha-se um sistema constituído por um reservatório R de grandes dimensões, considerando um nível de água constante ao longo do tempo, do qual parte uma conduta horizontal homogénea em toda a sua extensão. Na extremidade oposta, a conduta é dotada de um obturador, entenda-se válvula, com saída para a atmosfera capaz de interromper total e instantaneamente o escoamento (Fig.5.1)



Fig. 5.1 – Exemplo de um sistema de adução gravítico [8]

Estabelecido um escoamento em regime permanente (Etapa 0) com um velocidade inicial constante ao longo da conduta, U_0 , e considerando desprezáveis as perdas de carga e a altura cinética na conduta, as pressões ao longo da conduta, P_0 , serão constantes ($P_0 = \gamma H_0$) em que H_0 é a diferença de cotas entre o eixo do obturador e a superfície livre da água no reservatório.

Repare-se na coerência entre os índices de valores de pressão e velocidade e o número da etapa em análise, de forma a compreender e enquadrar temporalmente as variáveis em questão com o desenvolvimento do fenómeno.

Se o líquido presente nas condutas fosse absolutamente incompressível e o material da conduta infinitamente rígido, um fechamento total e instantâneo da válvula provocaria uma anulação instantânea do caudal que atravessa a conduta paralisando toda a coluna de líquido a montante desta, fazendo com que a válvula sofra um impacto da massa ρSL animada da velocidade U_0 [8].

Porém, a água é um fluído compressível, pelo que no intervalo de tempo subsequente ao fechamento da válvula toda a coluna líquida continua animada de velocidade U_0 , excetuando-se a camada imediatamente a montante desta, que se imobiliza e comprime progressivamente dilatando a conduta. A compressão da massa líquida provoca uma sobrepressão ΔP nessa zona, aumentando a sua pressão para $P_1 = P_0 + \Delta P$.

Nestas condições (compressão da massa líquida e dilatação da conduta) e com a continuação do escoamento em regime permanente, criam-se “espaços” para que haja uma maior afluência de água nessa secção da conduta. Este facto irá permitir o aumento do comprimento da coluna líquida em repouso ($U_1 = 0$) sujeita a sobrepressão ΔP , através de consecutivas compressões de camadas de líquido de jusante para montante, acompanhadas pela conseqüente dilatação da conduta. O movimento de entrada do líquido na conduta deve-se à compressão líquido e à dilatação da tubagem.

Verifica-se assim a existência de uma perturbação, que se propaga como uma onda de pressão com uma velocidade “a”, celeridade, no sentido do reservatório. No trecho da conduta ainda não atingido pela perturbação, o escoamento continua a dar-se nas condições iniciais.

Verifica-se também que nestas condições de entrada de líquido na conduta, a celeridade tem valores de ordem de grandeza muito superiores à velocidade do escoamento, devido à baixa compressibilidade do líquido e deformabilidade da conduta.

Assim no intervalo de tempo até $T=L/a$, após o fechamento da válvula, a onda de pressão atinge o reservatório, encontrando-se toda a coluna líquida contida na conduta em repouso ($U_1=0$) e comprimida, isto é, submetida à sobrepressão ΔP .

Nesse instante, todo o sistema está em repouso, verificando-se um desequilíbrio de pressões entre o reservatório e a secção da conduta imediatamente a jusante. A última camada de líquido na face de montante no início da conduta encontra-se à pressão $P_1=P_0+\Delta P$, enquanto que o reservatório se encontra sobre pressão hidrostática P_0 . Este estado de equilíbrio é momentâneo, uma vez que esta diferença de pressões origina uma onda de propagação com velocidade $-a$ em direcção à válvula. Essa descompressão deve-se ao facto de agora o escoamento se dar da conduta para o reservatório, fazendo com que a massa líquida contida no trecho de conduta vizinha do reservatório se descomprima, passando a ficar submetida à pressão $P_2=P_0$. Este movimento é efectuado com uma velocidade igual (em módulo) à do regime permanente, desde que não sejam consideradas as perdas de energia.

Desta forma cria-se um movimento da coluna líquida animada de velocidade $U_2=U_0$ no sentido da válvula, em que a frente de onda separa as duas zonas de pressão $P_2=P_0$ e $P_1=P_0+\Delta P$.

Quando o fluido atinge novamente a válvula no instante $T_2= 2L/a$, cumpre-se uma fase $\mu=2L/a$, em que toda a massa de líquido na conduta está descomprimida ($P_2=P_0$) animada de velocidade $U_3=-U_0$ (no sentido do reservatório), exceptuando-se a camada de líquido junto à válvula que se encontra em repouso. Surge desta forma um fenómeno inverso ao descrito anteriormente, isto é, dá-se a descompressão da primeira camada vizinha da válvula, passando esta a encontrar à pressão $P_3=P_0-\Delta P$, originando um movimento no sentido do reservatório. As sucessivas descompressões das novas camadas originam uma nova frente de onda em que todo o líquido atrás de se encontra descomprimido em ΔP e imóvel, e à sua frente apresenta a velocidade $U_3=-U_0$ à pressão $P_2=P_0$.

Ao atingir o reservatório R, no instante $T_3= 3/2\mu$, o líquido em toda a extensão da conduta está em depressão e em repouso. Nesse instante verifica-se um novo desequilíbrio, em que a última camada de líquido na conduta estará sujeita à pressão $P_3=P_0-\Delta P$, e o reservatório à pressão P_0 . Dar-se-á novamente o escoamento no sentido da válvula, com velocidade $U_4=U_0$, restabelecendo-se a pressão correspondente ao reservatório ($P_4=P_0$), uma vez que a subpressão é anulada pela entrada de água do reservatório no interior da conduta.

Analisando as variações de pressão junto da válvula, caso não se considerem perdas de energia, obtém-se o diagrama de pressões apresentado na figura seguinte:

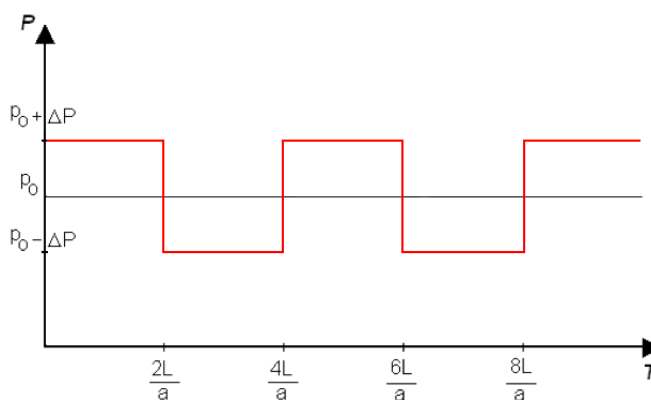


Fig.5.2 - Variação de pressão na vizinhança do órgão obturador

A progressiva sucessão de camadas atinge a válvula no instante 2μ após o encerramento da válvula, remetendo para uma situação em que se verificam as condições e os comportamentos do líquido idênticas à situação inicial. Assim verifica-se a periodicidade do fenómeno, caracterizado por um ciclo de variações de pressão (ondas de compressão e descompressão) com um período de ciclo com valor $T=4L/a=2\mu$.

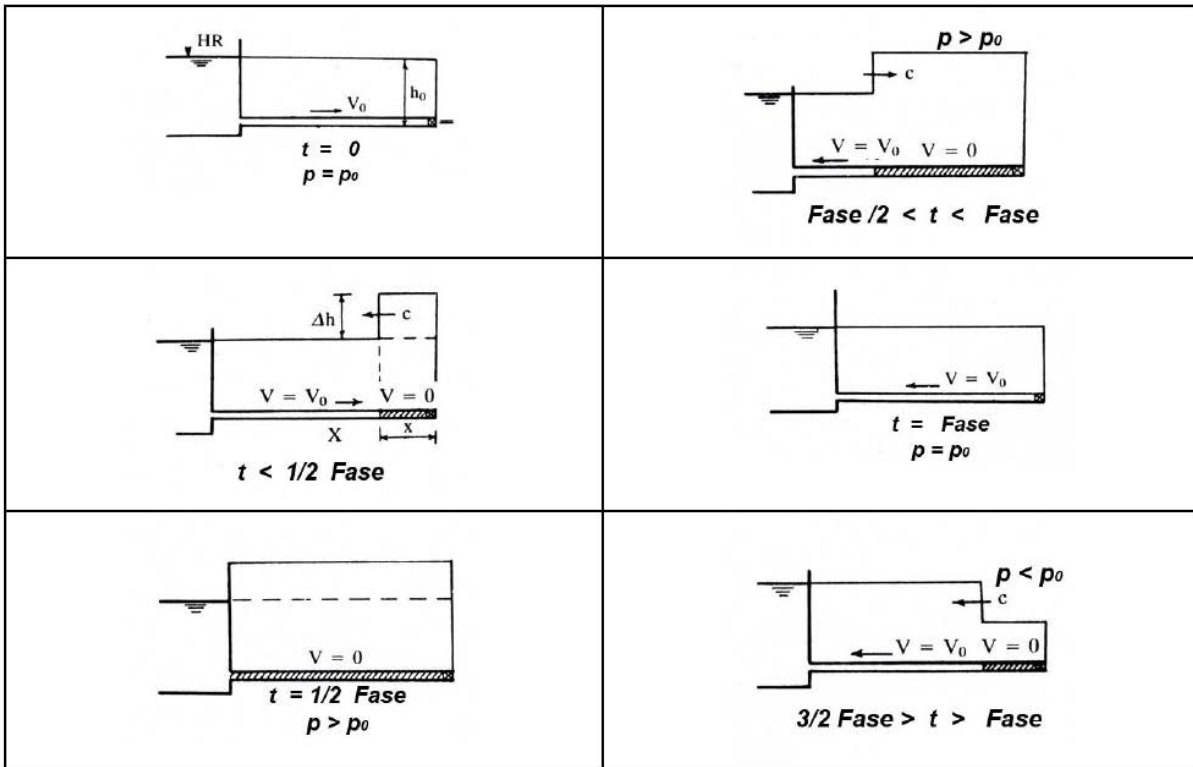


Fig.5.3 – Evolução no tempo da perturbação numa conduta gravítica [19]

De forma a complementar a análise qualitativa agora concluída, é apresentado no quadro 2 de forma específica e simples, um resumo de todas as fases ou etapas do fenómeno.

Quadro 2 - Quadro resumo do fenómeno de choque hidráulico em condutas gravíticas

Etapa	Δ Tempo	Reservatório - X			X - Válvula			Sentido	Posição da Frente de Onda	Observações/ Comentários
		U	Δ P	Δ D	U	Δ P	Δ D			
0	0	U_0	0	0	V_0	0	0		Vizinhança da válvula	Instante da paragem. Fim do regime permanente
1	$]0 - L/a[$	U_0	0	0	V_0	+	+	←	Conduta	Crescente afluência de água à conduta. Imobilização da coluna líquida nas proximidades da válvula
	L/a	0	+	+	0	+	+		Reservatório	Desequilíbrio de Pressões em R; conduta totalmente dilatada
2	$]L/a - 2L/a[$	U_0	0	0	0	+	+	→	Conduta	Descompressão a montante da frente de onda
	$2L/a$	U_0	0	0	V_0	0	0		Válvula	Toda a massa líquida na conduta descomprimida
3	$]2L/a - 3L/a[$	U_0	0	0	V_0	-	-	←	Conduta	Compressão sucessiva de camadas a jusante da bomba
	$3L/a$	0	-	-	0	-	-		R2	Desequilíbrio de Pressões em R2; conduta está em depressão
4	$]3L/a - 4L/a[$	U_0	0	0	0	-	-	→	Conduta	Escoamento no sentido do obturador; progressiva entrada de água do reservatório para a conduta
	$4L/a$	U_0	0	0	V_0	0	0		Válvula	Novo Regime Permanente

5.2 CONDUTAS ELEVATÓRIAS

Num sistema elevatório o fenómeno de choque hidráulico é provocado pela paragem súbita da electro-bomba devido a uma interrupção instantânea do fornecimento de energia eléctrica que alimenta o motor da mesma. Nesta análise física do fenómeno do choque hidráulico, de forma a simplificar a sua exposição são feitas algumas considerações justificáveis na maioria dos casos correntes.

Neste caso considera-se o sistema constituído por dois reservatórios de grandes dimensões, com níveis de água Z_{R1} e Z_{R2} ($Z_{R1} < Z_{R2}$) constantes ao longo do tempo e que se encontram ligados por uma conduta homogénea em toda a sua extensão. Na extremidade imediatamente a jusante do reservatório R_1 a conduta é dotada de uma bomba capaz de elevar uma altura manométrica H_{b0} correspondente à diferença de cotas nos reservatórios. Durante o regime permanente, antes da interrupção do funcionamento do grupo elevatório, a velocidade do escoamento é U_0 , sendo bombeado o caudal constante de Q_0 e são consideradas nulas as perdas de carga e a altura cinética.

No instante imediatamente após a falha de energia, o caudal é total e instantaneamente anulado. Se o fluído for considerado incompressível e a conduta rígida, toda a massa líquida a jusante da bomba ficaria imediatamente imobilizada nesse instante. No entanto, como o fluído é compressível, a coluna líquida irá mover-se no sentido do reservatório R_2 , em que a montante da frente de propagação da onda toda a massa líquida fica imobilizada, $U_1=0$, dando lugar a uma depressão, isto é, baixando a pressão para $P_1=P_1-\Delta P$.

O valor da depressão surge da necessidade de compatibilizar o caudal que se escoava em direcção a R_2 , o volume necessário para ocupar a conduta a montante resultante da descompressão da água e da conduta, e o comprimento da equação do equilíbrio de forças.

Como consequência disso, a onda de choque que parte do grupo elevatório propagar-se-á com uma celeridade constante, relativamente à velocidade inicial do escoamento, atingindo o reservatório R_2 no instante L/a [3].

No reservatório a pressão é constante, pelo que se originará uma diferença de pressões entre a secção jusante da coluna líquida na conduta e a secção montante do reservatório. Este desequilíbrio conduzirá à aceleração da água do reservatório para a conduta no sentido da bomba com uma velocidade $U_2=-U_0$ se não se considerarem as perdas de carga. O escoamento do reservatório para a conduta irá permitir que a camada de líquido dentro da conduta vizinha do reservatório perca a depressão a que se encontrava submetida, passando a estar sujeita à pressão $P_2=P_0$. Desta forma, a onda de choque que se desloca na direcção da bomba terá a sua frente a separar duas zonas, de pressões e de velocidades (P_1 e U_1 a jusante, P_2 e U_2 a montante)

Dá-se assim a conclusão da primeira ciclo da conduta ou fase do fenómeno que decorre entre o instante de paragem da bomba e $2L/a$.

No instante final da primeira fase o escoamento encontra a bomba, considerada inoperacional, anula-se instantaneamente a velocidade nesta secção, $U_3=0$. Devido à mobilização das características elásticas do material da conduta (dilatação) e à compressibilidade da água, há acumulação de água proveniente do reservatório R_2 , que provocará um aumento de pressão $P_3=P_0+\Delta P$. O valor da sobrepressão ΔP é igual em valor absoluto à depressão que iniciou o regime variável. Aparece assim uma nova frente de onda que ao longo da sua propagação pela conduta, animada de velocidade a , deixa atrás de si uma coluna líquida imóvel ($U_3=0$) sujeita à pressão P_3 e, à sua frente à velocidade U_2 e pressão P_2 . Esta onda atinge o reservatório R_2 no instante $3L/a$, em relação ao momento de paragem da bomba, estando o líquido em toda a conduta imóvel e sujeito à sobrepressão ΔP .

Nesse instante dá-se um novo desequilíbrio de pressões na secção de jusante da conduta vizinha do reservatório. De forma a contrariar esse desequilíbrio, a camada líquida dentro da conduta descomprime-se, passando a haver escoamento no sentido do reservatório, em condições semelhantes às do regime permanente inicial, com pressão $P_4=P_0$ e velocidade $U_4=U_0$.

Quando toda a conduta se encontrar em regime permanente, dá-se por concluída a segunda fase do fenómeno do choque hidráulico na conduta. Se a secção da bomba se mantiver obturada, verifica-se a repetição de um novo ciclo de variação de pressões, com fases idênticas às descritas anteriormente. Assim o fenómeno passará a ter características periódicas, em que os seus efeitos apresentam variações no tempo com período igual a $T=4L/a=2\mu$ denominado de oscilação elástica.

Tal como no caso das condutas gravíticas, a não consideração das perdas de carga possibilita a representação das variações de pressão através da seguinte figura:

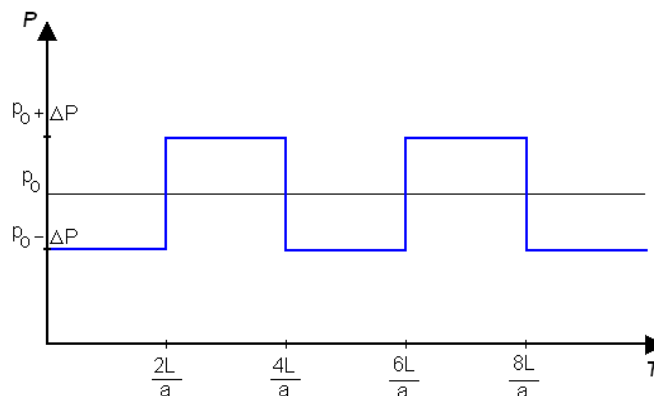


Fig.5.4 - Variação de pressão na vizinhança da bomba não considerando perdas de carga

No entanto, na realidade existem perdas de carga, pelo que as sucessivas oscilações de pressão serão totalmente amortecidas ao fim de algum tempo, tal como expõe Vítor Martins [17] pra um dado exemplo, como na figura seguinte:

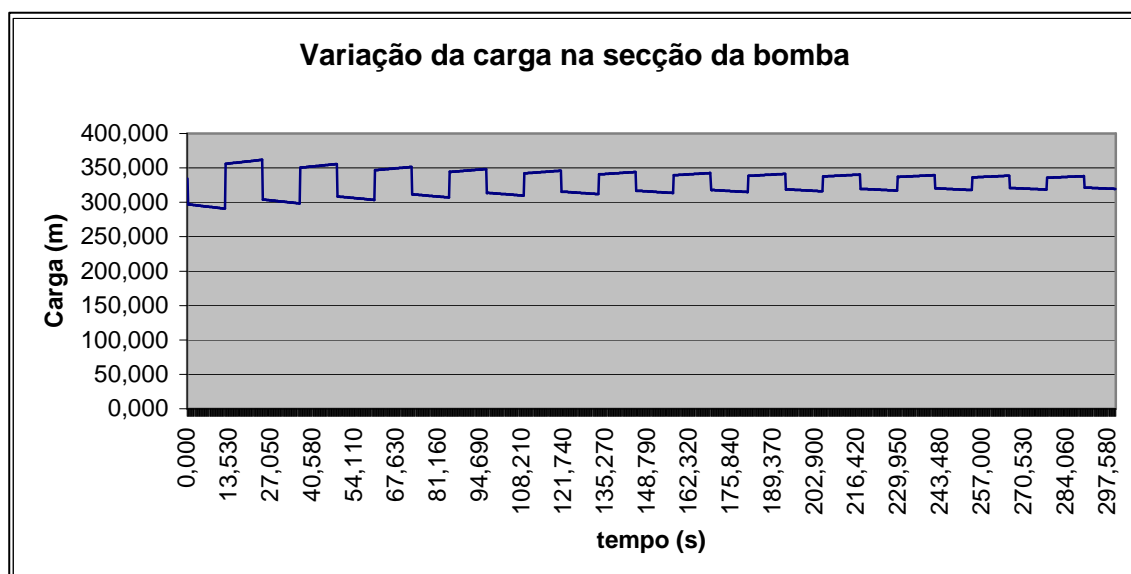


Fig.5.5 - Variação de pressão na vizinhança da bomba considerando perdas de carga [17]

Saliente-se que o amortecimento apresentado não é perfeito, comparativamente ao que acontece na realidade. Contudo a figura apresentada ajuda a perceber melhor o fenómeno do choque hidráulico em condições reais.

Tal como no caso de uma conduta gravítica, é apresentado de seguida um quadro resumo de todas as fases ou etapas do fenómeno de choque hidráulico.

Quadro 3 - Quadro resumo do fenómeno de choque hidráulico em condutas elevatórias

Etapa	Δ Tempo	Bomba– X			X – Reservatório			Sentido	Posição da Frente de Onda	Observações/ Comentários
		U	Δ P	Δ D	U	Δ P	Δ D			
0	0	U_0	0	0	U_0	0	0		Imediatamente a jusante da Bomba	Instante da paragem
1	$]0 - L/a[$	0	-	-	U_0	0	0	→	Conduta	Formação Subpressões a montante da frente de onda
	L/a	0	-	-	0	-	-		R2	Desequilíbrio de Pressões em R2; conduta totalmente comprimida
2	$]L/a - 2L/a[$	0	-	-	U_0	0	0	←	Conduta	Escoamento do reservatório para a conduta
	$2L/a$	0	+	+	U_0	0	0		Bomba	Desequilíbrio de Pressões na vizinhança da bomba; Formação Sobrepressões a montante da frente de onda
3	$]2L/a - 3L/a[$	0	+	+	U_0	0	0	→	Conduta	Compressão sucessiva de camadas a jusante da bomba
	$3L/a$	0	+	+	0	+	+		R2	Desequilíbrio de Pressões em R2; conduta totalmente dilatada
4	$]3L/a - 4L/a[$	0	+	+	U_0	0	0	←	Conduta	escoamento no sentido do reservatório; progressiva descompressão da conduta
	$4L/a$	U_0	0	0	U_0	0	0		Bomba	Novo Regime Permanente

5.3 TEMPOS DE MANOBRA E ENVOLVENTES DE PRESSÕES

Consoante o tempo de manobra inerente à operação de fechamento ou de abertura de órgãos reguladores de caudal, assim o comportamento do choque hidráulico é diferente,

5.3.1 Condutas Gravíticas

A análise de envolventes de pressões em condutas é feita com base em métodos expeditos, função da celeridade a , variação de velocidade induzida ao escoamento ΔU e ainda pela relação entre o tempo de manobra e o tempo de fase. Esta relação possibilita a definição da forma da envolvente.

No caso de uma manobra instantânea, o tempo de duração da manobra é considerado nulo, sendo a variação de carga $\pm\Delta H$ dada pela expressão de Allievi (ponto 2.1).

Com a adição dessa variação à carga estática tem se um diagrama de pressões de forma rectangular, tal como esquematiza a seguinte figura 5.6.

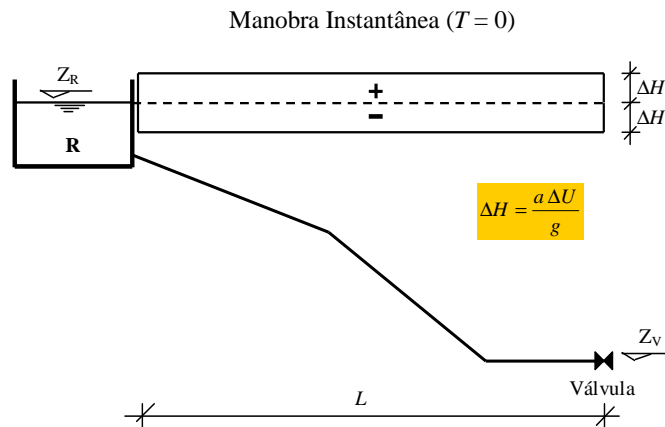


Fig.5.6 - Manobra Instantânea numa conduta gravítica [19]

Se o tempo de manobra da válvula for inferior à fase, a manobra é designada de rápida. O valor máximo da envolvente é considerado igual ao do caso anterior, mas o diagrama global apresenta uma configuração diferente.

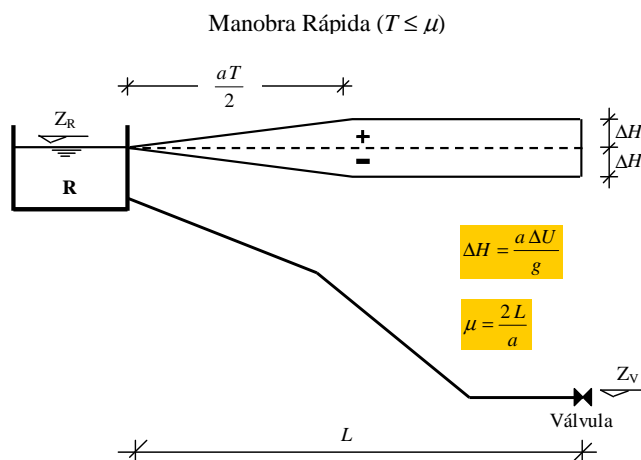


Fig.5.7 - Manobra rápida numa conduta gravítica [19]

Como se deduz da figura, origina-se um diagrama composto por um trecho rectangular semelhante ao visto na manobra instantânea no trecho mais a jusante (na proximidade do dispositivo obturador), e um trecho triangular no resto da sua extensão.

Quando a duração da manobra é superior à fase, a manobra é lenta, e o valor máximo da envolvente é atenuado. O valor da variação de carga $\pm\Delta H$ que origina a envolvente é dado pela fórmula de Michaud apresentada anteriormente no capítulo 2.1.

Neste caso, o diagrama de pressões apresentará uma forma completamente distinta dos casos anteriores. Como se constata na figura 5.8 a envolvente de pressões tem um desenvolvimento linear, onde o máximo se encontra, neste cenário (condutas gravíticas), no ponto mais a jusante, e decresce de valor até atingir o zero na secção mais a montante.

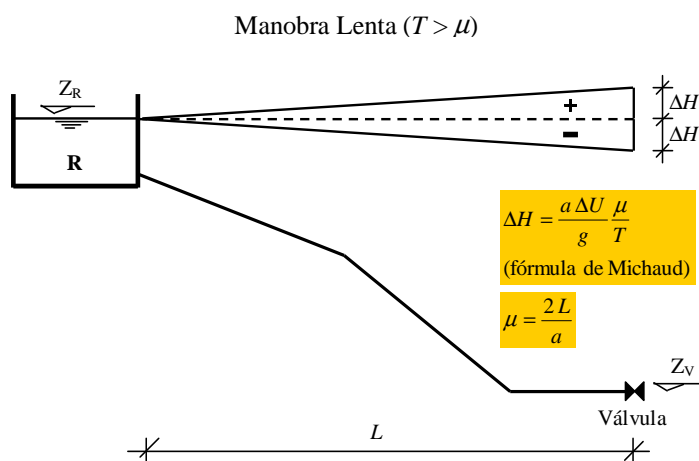


Fig.5.8 - Manobra lenta numa conduta gravítica[19]

O diagrama apresenta esta configuração devido à atenuação da envolvente, causada pelo efeito conjugado da onda de pressão com a onda de alívio/pressão, após decorrido tempo superior ao tempo de fase.

5.3.2 Condutas Elevatórias

Para análise quantitativa do fenómeno de choque hidráulico em condutas elevatórias sob pressão, deverá considerar-se como válidas as equações de “Allievi-Joukowsky”, introduzidas no capítulo 2.1, desde que se considere o sinal da velocidade do escoamento contrário ao considerado para o caso anterior de condutas gravíticas.

A origem do fenómeno de choque hidráulico em condutas elevatórias tem como principal responsável o comportamento do grupo elevatório a elas associado. Desta forma torna-se essencial a caracterização desta condição fronteira responsável pela ocorrência deste fenómeno.

Recorde-se que imediatamente após a redução do caudal pela paragem da bomba, surgem depressões nas instalações anteriormente referidas, enquanto que nas condutas gravíticas surgem sobrepressões.

Tal como visto anteriormente para o caso de condutas gravíticas, o desenvolvimento do choque hidráulico ao longo de toda a conduta e conseqüentemente definição da envolvente de pressões, é função do tempo de manobra do dispositivo anulador de caudal, a bomba no presente caso. Desta forma, antes de se proceder à definição das envolventes, interessa expor os conceitos associados à lei de paragem de um grupo elevatório para definição do tempo de paragem do mesmo.

Em termos gerais, o tempo de paragem do grupo elevatório ou de anulação do caudal está relacionado com suas características electro-mecânicas (inércia do grupo motor-bomba) e correspondente curvas características de funcionamento, bem com as características hidráulicas da instalação.

Segundo Quintela [7] para projectos de pequenas instalações ou estudos prévios de instalações com alguma importância, o tempo de anulação do caudal, T , resultante da paragem do grupo elevatório pode ser estimado pela fórmula de Rosich, válido para grupos elevatórios de baixa inércia, pois não caracteriza explicitamente a inércia dos grupos. Segundo Rosich, a fórmula semi-empírica apresentada na expressão 5.1, é válida para velocidades de escoamento em regime perante superiores ou iguais a 50m/s ($U_0 \geq 50\text{m/s}$).

$$T_R = C + K \frac{LU_0}{gH} \quad (5.1)$$

Nesta expressão T_R é o tempo que o escoamento na conduta demora a anular-se após a paragem abrupta do grupo elevatório, originado por exemplo, por um corte de energia.

O parâmetro dimensional C depende do declive da conduta, que relaciona a altura manométrica (H) e o comprimento da conduta (L), pela seguinte expressão:

$$i = \frac{H}{L} \quad (5.2)$$

O coeficiente adimensional K é dependente do comprimento da conduta e representa o efeito da inércia do grupo electrobomba.

Os valores usualmente adoptados para K e C pela bibliografia da especialidade são os apresentados nas seguintes quadros:

Quadro 4 – Coeficiente de Inclinação da Conduta

$i(\%)$	<20	25	30	35	>40
$C(s)$	1.0	0.8	0.6	0.4	0

Quadro 5 – Coeficiente de inércia do grupo electrobomba

$L(m)$	<500	≈ 500	500 a 1000	≈ 1500	>1500
K	2.0	1.75	1.5	1.25	1.0

No caso de grupos electrobomba de elevada inércia, o seu tempo de paragem, T_A , é calculado através do Método de Betâmio de Almeida.

Este método comparativamente ao anterior, relaciona de forma mais explícita o tempo de paragem com a inércia da bomba e a inércia da massa líquida, através da consideração de um coeficiente de compensação energética (λ) e considera também o seu rendimento (η) no ponto de funcionamento em regime permanente.

O coeficiente anteriormente referido, define-se com sendo o quociente entre energia cinética das massas giratórias, função das suas características inerciais e a energia cinética da coluna líquida.

Assim, neste caso o tempo de paragem será:

$$T_A = \frac{2}{3}(\eta\lambda + 1) \frac{LU_0}{gH} \quad (5.3)$$

No que se refere à definição da forma e grandeza das envolventes de pressão, o tempo de paragem do escoamento é conseguido por métodos expeditos que têm como parâmetro fundamental o tempo de paragem do escoamento definido anteriormente.

Assim, no caso de uma manobra instantânea, esse tempo é considerado nulo. Analogamente ao caso de condutas gravíticas, o diagrama de envolvente de pressões resultante é rectangular, tal como ilustra a figura 5.9.

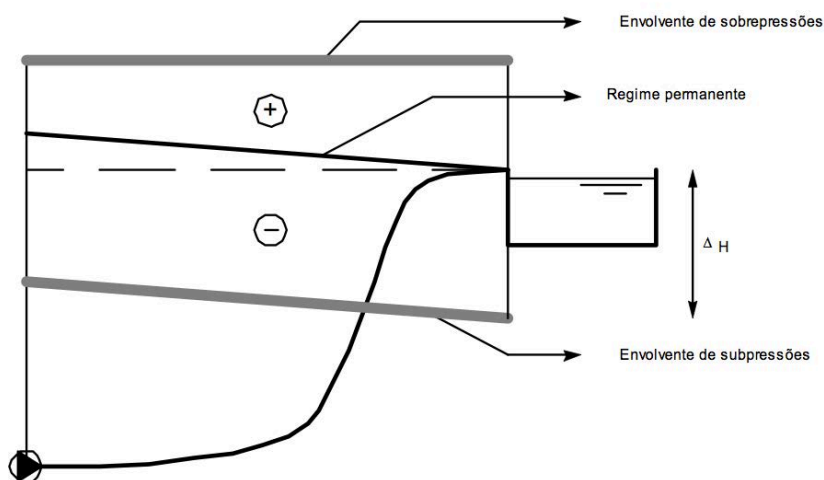


Fig.5.9 - Manobra Instantânea numa conduta elevatória[19]

Se o tempo de paragem for diferente de zero, mas inferior à fase, tal como visto para o caso da conduta gravítica, a manobra é considerada rápida.

Nesta circunstância, o diagrama de pressões originado diverge do anteriormente apresentado na zona vizinha do reservatório, em que apresenta um trecho triangular, tal como mostra a figura seguinte:

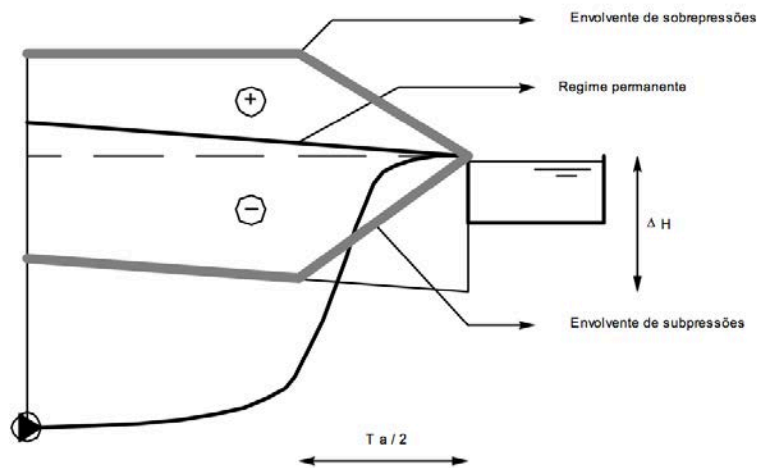


Fig.5.10 - Manobra rápida numa conduta elevatória[19]

Finalmente, quando o tempo de anulação do caudal ou de paragem do grupo elevatório é superior à duração da fase, o diagrama de pressões apresenta uma envolvente linear, em que apresenta um valor máximo na secção mais a montante que decresce até zero na secção mais a jusante (Fig.5.11).

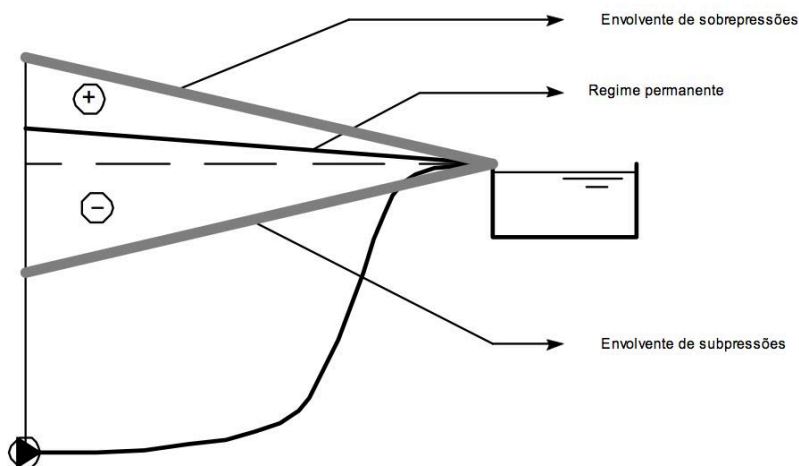


Fig.5.11 - Manobra lenta numa conduta elevatória[19]

De notar que nesta situação o valor máximo da envolvente é atenuado, sendo o valor da sobrepressão máxima dada pela Fórmula de Michaud, expressa pela equação 5.4, que considera a relação entre o tempo de paragem (T_p) e a fase (μ).

$$\Delta H = \frac{\alpha \Delta U}{g} \frac{\mu}{T_P} \quad (5.4)$$

6

DISPOSITIVOS DE PROTECÇÃO

Tal como o nome indica, o dispositivos de protecção são concebidos para proteger os sistemas elevatórios face ao surgimento de elevadas variações de pressão criados na mudança de regime do escoamento ao longo do sistema, gerados pelas razões expostas em capítulos anteriores.

Nos dias de hoje, são comercializados vários tipos de dispositivos, no entanto todos eles obedecem a um princípio de funcionamento comum, o amortecimento das variações de carga através do controlo indirecto das variações de caudal, evitando deste modo que se verifiquem valores elevados de pressão ou de subpressões que comprometam a integridade da conduta ou a qualidade da água.

Os dispositivos de protecção usualmente instalados em sistemas elevatórios são os seguintes:

- Volantes de Inércia
- Reservatório Ar Comprimido
- Chaminés de Equilíbrio
- Reservatório Unidireccional
- Conduta de Aspiração Paralela
- Válvula de Descarga Automática

Na figura seguinte, de forma esquemática, apresentam-se as posições preferenciais para instalação de alguns dos dispositivos referidos anteriormente.

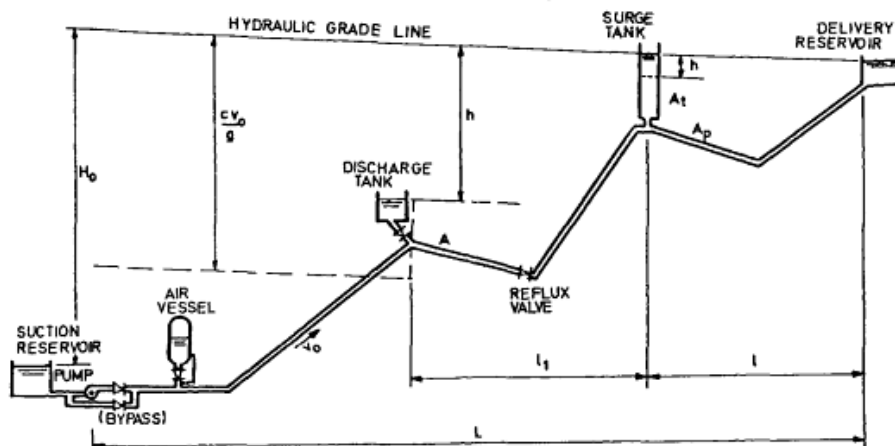


Fig.6.1 – Representação esquemática de perfil longitudinal de uma conduta elevatória com vários dispositivos de protecção [20]

O vasto leque de dispositivos disponíveis, possibilita uma maior possibilidade de opções para as diferentes composições dos sistemas hidráulicos. Desta forma, torna-se necessário realizar uma escolha adequada do dispositivo tendo em conta factores, como por exemplo:

- O objectivo de protecção, caso se trate de um controlo de depressões, sobrepressões ou de ambos os casos;
- Características hidráulicas e topográficas da instalação, através da análise de todo o perfil da conduta e das diferentes classes de resistência das tubagens;
- Considerações económicas, construtivas e de segurança [3], [17]

Nos capítulos seguintes realiza-se uma breve descrição dos diferentes dispositivos evidenciados.

6.1 VOLANTES DE INÉRCIA

O volante de inércia permite aumentar o momento de inércia da bomba através um disco em aço que aumenta progressivamente o tempo de anulação do caudal. Este procedimento permite que o pico de pressão gerada pela paragem da bomba decresça suavemente até atingir um valor mínimo, diminuindo desta forma o efeito do golpe. Assim, com a incorporação adequada de volantes, qualquer instalação poderá resultar em manobra lenta.

A sua instalação consiste na acoplagem deste disco no eixo entre o motor e a bomba (Fig.6.2/ Fig.6.3). Usualmente é realizada em bombas com eixo horizontal, pois em bombas de eixo vertical pode tornar-se difícil ou inconveniente a instalação dessas massas adicionais.

É de notar que a escolha do “peso” do disco deverá ter em conta questões de ordem electro-mecânica, uma vez que quanto maior for o peso, maior será a potência necessária a instalar na bomba para vencer a inércia do mesmo no momento de arranque, o que levará a um conseqüente aumento no consumo de energia eléctrica. Desta forma, os custos de investimento e operação, sensíveis à variação das características do disco, poderão eventualmente limitar o uso deste dispositivo.

Repare-se que no caso de a coluna de água na conduta possuir elevada energia cinética, o valor do PD2 exigido para o volante pode ser demasiado elevado. Nestas circunstâncias, a instalação do volante pode apresentar grandes inconvenientes de natureza eléctrica e mecânica, constituindo assim geralmente uma solução para condutas elevatórias curtas. Numa primeira aproximação considera-se a possibilidade da sua instalação em condutas com comprimento inferior a 2000 m .

No que se refere ao seu funcionamento, em termos de pressões, é uma solução limitada, uma vez que se aplica para controlo das pressões mínimas não controlando suficientemente a envolvente de pressão máxima.

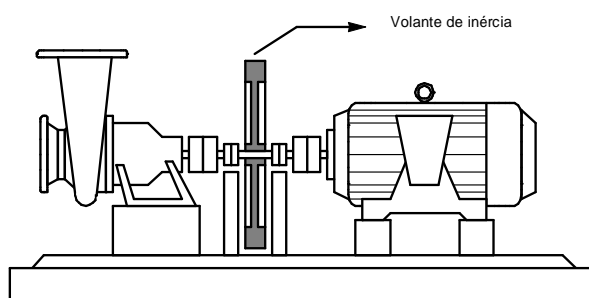


Fig.6.2 -Representação esquemática volante de inércia [19]

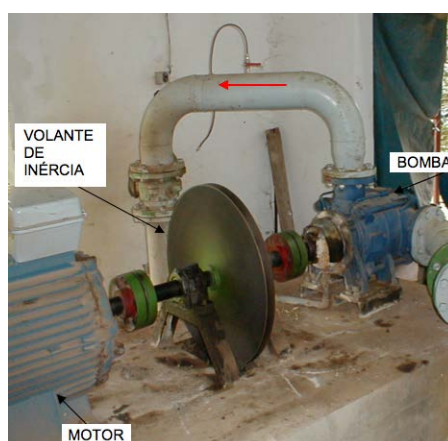


Fig.6.3 – Fotografia de um volante de inércia associado a uma bomba [21]

6.2 RESERVATÓRIO DE AR COMPRIMIDO RAC

O reservatório de ar comprimido (RAC) é um reservatório de água fechado em permanente ligação com a conduta que se pretende proteger e que contém no seu interior um gás comprimido, geralmente ar (Fig.6.4 / Fig.6.5).

Quando existe uma separação física entre a água e o ar, por uma membrana por exemplo, este pode ser designado por reservatório hidropneumático ou RAC de membrana.

Como se verá a diante no capítulo 7 este dispositivo tem como objectivo principal o controlo das pressões mínimas e das pressões máximas através do efeito da compressão/descompressão do ar, permitindo a diminuição do tempo de variação de caudal, no que resulta numa atenuação das variações de pressão na conduta. A variação do estado do ar é provocada pelas oscilações do nível de água no

RAC, isto é, quando o RAC alimenta a conduta, o volume de ar aumenta (entrada em funcionamento do compressor) e a respectiva pressão diminui. Quando a conduta fornece água ao RAC o volume de ar no seu interior diminui, traduzindo-se num aumento da sua pressão.

De forma a estabelecer-se o equilíbrio de pressões, aquando do aumento da pressão do ar no RAC, o ar é libertado por purgas instaladas neste, diminuindo a sua pressão.

É usual a instalação de uma válvula de retenção entre o grupo electrobomba e o RAC de forma a protegê-lo de uma pancada violenta e súbita da coluna líquida. Esta pancada ocorrerá assim na válvula de retenção podendo condicionar o seu normal funcionamento.

O funcionamento deficiente de um dispositivo desta génese pode ser muito perigoso para todo o seu espaço envolvente devido às bruscas variações de pressões a que está sujeito. De forma a evitar essas situações é necessária a garantia de manutenção do seu normal funcionamento através da monitorização da massa de ar no reservatório com compressores de ar e sistemas de controlo de pressão.

Associado ao custo do próprio reservatório e acessórios, a necessidade de permanente controlo do seu funcionamento exige um elevado investimento comparativamente a outros dispositivos de protecção.

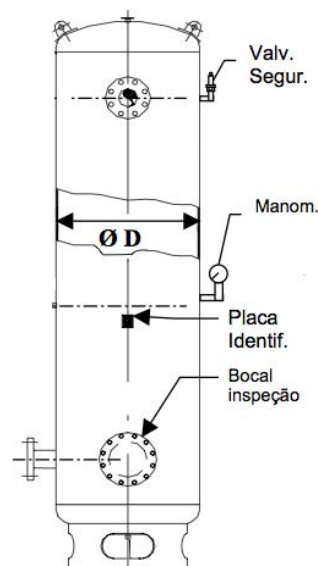


Fig.6.4 - Layout básico de um RAC [22]



Fig.6.5 – Fotografia Exterior de um RAC – E.E.Barradas

6.3 CHAMINÉS DE EQUILÍBRIO

As chaminés de equilíbrio são reservatórios com superfície livre que em termos estruturais são constituídas por um cilindro vertical em que a altura da água dentro desse mesmo cilindro coincide, em regime permanente, com a cota piezométrica da secção da conduta onde o reservatório está ligado. Este tipo de dispositivos exige uma estrutura muito grande, capaz de conter uma elevada quantidade de água que sofrerá algumas oscilações. Como se pode perceber pelas figura 6.6 e 6.7, isso leva a que a sua instalação provoque um elevado impacto visual. No caso de se admitirem transbordos pelo bordo superior, é necessário prever sistemas de drenagem convenientes.

A instalação adequada da chaminé de equilíbrio está associada tanto à identificação do perfil topográfico do sistema elevatório como das condições económicas inerentes, evitando-se a construção de uma chaminé muito alta. Para baixar os custos de construção, podem-se conseguir alturas de chaminés mais baixas através da sua instalação em pontos mais altos.

Este dispositivo é muito vulgar em centrais hidroeléctricas, sendo a sua instalação realizada entre a galeria sob pressão e a conduta forçada (ver fig.6.6), de forma a acomodar o fluxo de água que chega à galeria quando há uma manobra brusca do obturador no final da conduta forçada, provocando a transformação de uma manobra rápida numa manobra lenta. No entanto, o tempo de amortecimento das oscilações é muito elevado.

A sua utilização em sistemas de abastecimento de água é menos vulgar por necessitar de obras de construção civil mais desenvolvidas, traduzindo-se em custos com mais significado em obras desta natureza comparativamente a outras soluções.

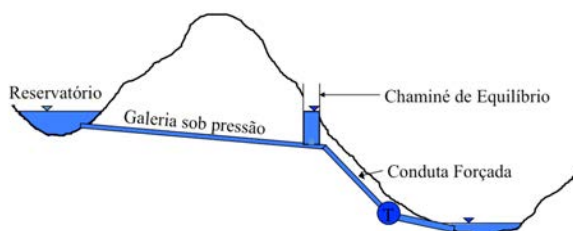


Fig.6.6 - Representação gráfica da localização de uma chaminé de equilíbrio numa central hidroeléctrica



Fig 6.7 - Chaminé de equilíbrio de aço em Montevidéu, Uruguai [23]

6.4 RESERVATÓRIO UNIDIRECCIONAL

O reservatório unidireccional (RUD) é utilizado geralmente para contornar alguns dos problemas inerentes às chaminés de equilíbrio, nomeadamente a sua elevada altura. Estruturalmente é concebido em betão ou aço, contendo água e ar no seu interior, alimentado por uma conduta de pequeno diâmetro (“by-pass”) controlada através de uma válvula especial para isolamento ou para operações de manutenção. Logo que o plano de água no reservatório atinge um nível pré-estabelecido as válvulas fecham, não aliviando a compressão máxima da conduta.

Este tipo de dispositivos controlam apenas as depressões na conduta através da entrada de água na mesma, daí a designação de unidireccionais. Quando a conduta está em depressão a entrada de água para o reservatório é impedida por válvulas de retenção acopladas na ligação do RUD à conduta. Quando se dá a interrupção do fornecimento de água à conduta pela paragem súbita das bombas, o RUD entra em funcionamento através da alimentação da conduta de forma a atenuar as subpressões criadas na conduta, isto é, quando a cota piezométrica do reservatório de jusante for inferior à cota do seu plano de água do mesmo. Deste modo evita-se a rotura da veia líquida e o colapso por depressão excessiva.

Este reservatório permite então a compensação durante um determinado período de tempo, do caudal fornecido pelas bombas após o corte de energia.

O efeito do funcionamento do RUD é observado nos trechos de conduta vizinhos da secção de inclusão do mesmo. Para uma influência mais abrangente, deve-se colocar o seu plano de água o mais próximo possível da linha piezométrica correspondente ao regime inicial. Assim sendo, o RUD apresenta um melhor desempenho quando as cotas do plano de água e da superfície livre no reservatório de jusante estão contíguas.

No que se refere às sobrepressões, estas são atenuadas de forma indirecta resultado da diminuição da depressão máxima. Apresentam ainda outros inconvenientes como por exemplo a dificuldade na protecção de secções afastadas do RUD e o perigo de conspurcação de água tratada .

6.5 CONDOTA DE ASPIRAÇÃO PARALELA

Tal como referido em capítulos anteriores, quando acontece a rápida diminuição do caudal bombeado surge uma diminuição da pressão na secção imediatamente a jusante das válvulas de retenção de protecção do grupo electrobomba e uma elevação a montante do mesmo.

A conduta de aspiração (CAP) estabelece uma ligação entre o reservatório de montante e a conduta elevatória, possibilitando a alimentação da conduta com um caudal suplementar quando se dá essa interrupção do fornecimento de caudal pela bomba, protegendo assim o grupo elevatório. Isso acontece apenas quando enquanto o valor da cota piezométrica instantânea na secção jusante desta conduta for inferior ao correspondente na extremidade de montante

Desta forma, a CAP retarda a anulação do caudal permitindo a diminuição do valor da cota piezométrica mínima na secção de jusante da mesma.

Para um funcionamento mais adequado é desejável que o reservatório de montante apresente dimensões significativas e que o nível de água em superfície livre no seu interior tenha uma cota superior à cota do eixo da conduta na secção das bombas .

No entanto, é pouco eficaz na protecção da conduta elevatória de depressões exageradas, especialmente nos pontos mais altos intermédios.

6.6 VÁLVULA DE DESCARGA AUTOMÁTICA

A válvula de descarga automática (VDA) permite o estabelecimento de uma ligação temporária da conduta com o exterior, sendo essa operação comandada por molas que acionam um tampão, ou através de mecanismos mais aperfeiçoados que conferem às mesmas maior precisão e eficácia.

Desta forma, a protecção da conduta é feita através da transformação da energia de pressão em energia cinética, traduzida no escoamento através da válvula e energia potencial, através da mola .

Em normal funcionamento, num sistema hidráulico sem grandes variações de pressão a válvula encontra-se fechada. Quando a pressão atinge valores pré-fixados na calibragem da mola, a válvula abre permitindo a saída de água até que a pressão decresça até ao valor inicialmente estabelecido. Nesse momento a válvula fecha-se mantendo a pressão estabilizada, controlando assim o excesso de pressão ocorrido.

Dado à pequena compressibilidade da água e ao curto tempo de ocorrência do choque, é de se esperar que para estabilizar a pressão a quantidade de água extravasada não seja significativa. No entanto, devem-se considerar acessórios suplementares e estruturas para recepção e escoamento da água descarregada.

Como se pode perceber pelo seu funcionamento, este dispositivo exige ajustes cuidadosos e periódicos de forma a manter a calibragem da mola.

Quanto for maior a altura de elevação geométrica, maior é a eficácia deste dispositivo, permitindo assim a adopção de válvulas mais económicas (mais pequenas) para a vazão do escoamento de retorno [17].

Realce-se que este tipo de protecção não permite a diminuição do valor da depressão máxima que ocorre após a saída de serviço dos grupos electrobomba e conseqüentemente não consegue evitar os fenómenos de cavitação e de rotura da veia líquida. No entanto, algumas válvulas deste tipo podem funcionar como ventosas permitindo a entrada de ar na conduta .

Quadro 6 – Características dos vários dispositivos de protecção [3]

Dispositivo de utilização	Objectivo do dispositivo	Condições de utilização	Observações	
			Vantagens	Desvantagens
Volante de Inércia	Diminuição das depressões e das sobrepressões ao longo de toda a conduta.	L < 2000 m Perfil da conduta côncavo.	Não exige manutenção especial. Fechamento suave. Dificuldade em proteger secções intermédias elevadas. Possíveis dificuldades no arranque dos grupos. Sobrecarga das chumaceiras. Adequado para bomba do eixo horizontal.	
Reservatório de ar comprimido (RAC) Acumulador de gás (AG)	Diminuição das depressões e das sobrepressões ao longo de toda a conduta.	L < 10 000 m Perfil da conduta côncavo. O AG pode ser aplicado a sistemas gravíticos.	Elevada eficácia na protecção. Exige manutenção. Eventual necessidade de compressor e dispositivos de controlo do nível de água. Ocupação de um espaço importante. Fechamento brusco da válvula de retenção.	
Chaminé de equilíbrio	Diminuição das depressões e das sobrepressões ao longo de toda a conduta.	Altura de elevação pequena ou perfil da conduta convexo a pouca distância da linha piezométrica.	Elevada eficácia na protecção para jusante. Não exige manutenção especial. Desvantagens estéticas. Eventual elevado custo de construção. Contacto da água com a atmosfera. Eventual perda de água para o exterior.	
Reservatório unidireccional (RUD)	Diminuição das depressões. Protecção da conduta em pontos altos principalmente em condutas horizontais.	Perfil da conduta convexo da superfície do reservatório. Protecção localizada da conduta.	Dispositivos de enchimento automático. Exigência de válvulas e de manutenção adequadas. Entrada em funcionamento após linha piezométrica atingir a cota da superfície de água RUD.	
Conduta de alimentação paralela (CAP)	Diminuição das depressões. Protecção da conduta num trecho a jusante dos grupos.	Perfil da conduta côncavo sem pontos altos.	Não exigência de manutenção especial. Eventual exigência de válvulas especiais monitorizadas e de alívio. Adequado para bombas em carga. Inadequado para bombas submersíveis.	
Válvula de descarga automática (VDA)	Diminuição das sobrepressões. Protecção localizada ou de toda a conduta.	TE superior ao tempo de abertura mínimo. Perfil da conduta côncavo. Elevada carga estática. Aplicável a sistemas gravíticos.	Exigência de manutenção e controlo do tempo de abertura da válvula. Perda de água. Válvulas dispendiosas. Maior eficiência em condutas longas. Risco de bloqueamento.	

7

RESERVATÓRIO DE AR COMPRIMIDO

7.1 TRABALHOS PIONEIROS

A literatura da especialidade refere que as primeiras informações relativas à aplicação de um RAC numa instalação para protecção do choque hidráulico constam de 1878, onde J. Michaud descreve a sua utilização como dispositivo de protecção,

No entanto, só no início do século XX é que Joukowski confirmou experimentalmente a sua utilidade como dispositivo de protecção e deduziu ainda uma expressão para determinação do seu volume para que a sobrepressão não excedesse um determinado valor [24].

Para a dedução da mesma, considerou adiabática a transformação do ar, obtendo a seguinte expressão :

$$V_{ar} = \frac{n\pi}{2} \cdot D^2 \cdot U_0 \cdot \left(\frac{2L}{a}\right) \cdot \frac{P_i}{P_e \Delta P} \quad (7.1)$$

Como se deduz na expressão supracitada, o volume de ar no reservatório (V_{ar}) é função do diâmetro da conduta principal (D), da fase ($2L/a$), do coeficiente politrópico (n), da velocidade do escoamento em regime permanente (V_0), da pressão inicial do ar em regime permanente (P_i) e da pressão absoluta estática (P_e), ambas no reservatório, bem como a sua variação (ΔP)

Na mesma altura Allievi desenvolve estudos relacionados com a instalação de um RAC em sistemas sujeitos a escoamentos transitórios, os quais lhe permitiram definir equações para o dimensionamento do mesmo, enfatizando a importância das perdas de carga na tubeira, considerando a transformação isotérmica do ar.

7.2 FUNCIONAMENTO DE UM RAC

Tal como referido em capítulos anteriores, a interrupção brusca do funcionamento de uma bomba num sistema elevatório tem implicações bastante significativas no comportamento do escoamento, causando a jusante do próprio sistema elevadas variações de pressão.

O reservatório de ar comprimido, também designado pela abreviatura *RAC*, é um dispositivo que tem como objectivo amortecer essa amplitude das variações de pressão ao longo da conduta, pela mobilização do efeito de oscilação de massa, que de uma forma geral se traduz num fornecimento à conduta dos “volumes em falta” devido ao choque. No que se refere ao seu funcionamento, apresenta um comportamento reversível uma vez que pode actuar tanto diminuição das subpressões assim das sobrepressões. Em termos estruturais, tal como referido anteriormente no ponto 6.3, consiste num reservatório parcialmente cheio de água e em parte com um gás comprimido (normalmente ar),

instalado usualmente a jusante do grupo elevatório, uma vez que é nessa posição que este tem maior eficácia, podendo ser montado tanto na vertical como na horizontal.

Considere-se um determinado sistema elevatório hidráulico dotado de um reservatório de ar comprimido a jusante do grupo elevatório. Quando o regime hidráulico presente é permanente, o RAC encontra-se em equilíbrio devido tanto à acção do ar no seu interior como à da pressão na conduta. Aquando da interrupção do funcionamento do grupo elevatório, o regime passa a dar-se de forma variável, baixando a pressão a jusante do grupo elevatório e consequentemente passando a conduta a ser alimentada pela água armazenada no RAC (Fig.7.1).

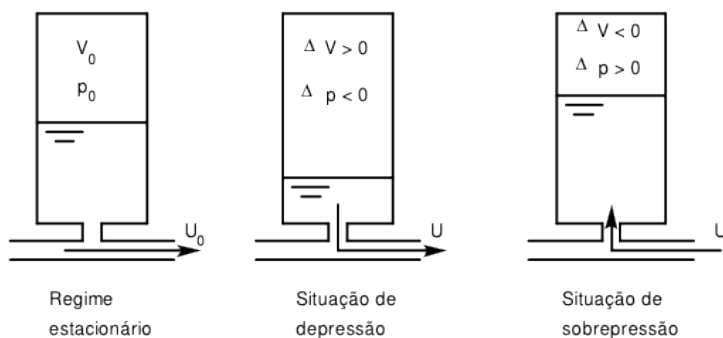


Fig. 7.1 – Funcionamento do RAC[19]

Assim sendo, o volume de ar aumenta e diminui a sua pressão, para valores inferiores, correspondentes ao regime permanente, até um mínimo. Inicia-se uma nova fase, onde o caudal na conduta se inverte, diminuindo o volume do ar e aumentando a pressão para um valor máximo. O processo repete-se com uma série de oscilações, até atingir o equilíbrio, ou seja, estabelecendo um regime permanente[17].

No caso de paragem da bomba, a redução da depressão máxima resulta da possibilidade de tornar a variação do regime transitório mais lenta. Verifica-se que a diminuição da energia fornecida pela bomba é consequência da energia potencial da pressão transferida para o escoamento, e a queda brusca do caudal é atenuada pelo fornecimento de água armazenada no RAC ao escoamento.

Aquando do início de funcionamento da bomba, o desenvolvimento deste fenómeno é semelhante/análogo, diferenciando-se pelo facto que nesse são originadas sobrepressões a jusante da bomba, traduzindo-se numa “absorção” de parte do caudal pelo RAC.

Em termos construtivos e estruturais, o RAC apresenta muitas vezes uma conduta estrangulada, designada de tubeira, que visa produzir perdas de carga adicionais durante as transferências de água contribuindo dessa forma para o amortecimento das variações extremas de pressão. A materialização de uma perda de carga assimétrica tem como objectivo principal diminuir o volume do RAC, bem como o valor máximo da pressão sem prejuízo na capacidade de controlo das pressões mínimas.

No entanto, a perda de carga na tubeira é desfavorável à redução da depressão, visto que, atenua a transferência de energia do RAC para a conduta.

Desta forma, este elemento é concebido/desenhado com uma forma que lhe possibilite, para um mesmo valor de caudal, produzir perdas de carga superiores às da entrada da água no RAC relativamente à saída.

Essa perda de carga pode ser também conseguida de outras formas, nomeadamente por uma válvula de retenção de batente furado, por um “by-pass” ou por um diafragma (Fig.7.2)

De notar, que em instalações relativamente importantes, a materialização da referida perda de carga deve ser alvo de uma análise detalhada. No que se refere a instalações mais pequenas, segundo o Manual de Saneamento [3], o dispositivo mais frequente é uma válvula de retenção.

7.3 DIMENSIONAMENTO

Para o seu correcto dimensionamento e para um eficiente projecto do sistema hidráulico em que este se insere, devem ser considerados dispositivos para fornecimento de ar comprimido (compressores), sensores de nível de água, entrada de homem para inspecções, válvula de retenção e reguladores de pressão e de possível congelamento [9].

Deve ser tido em conta o facto de o ar encerrado no RAC tender a dissolver-se geralmente para pressões superiores a 100-150 m.c.a. , pelo que, para manter a massa de ar necessária poderá implementar-se algumas das seguintes técnicas:

- Separação das massas de ar e água por intermédio de uma membrana flexível, evitando também a passagem de algum tipo de resíduos resultantes do processo de introdução do ar comprimido (caso exista) para a água, comprometendo a sua qualidade
- Utilização de um gás alternativo, pouco volútel como o azoto.
- Formação de uma película especial na interfase água e ar
- Alimentação de ar através de um sistema automático, compressor. [3]

Após os estudos de Joukowski e Allievi a análise de dimensionamento de um RAC teve três bases teóricas:

- Estudos baseados na equação da onda obtida por B.Riemann;
- Modelo Rígido;
- Modelo Elástico.

Apresenta-se em seguida um quadro resumo (Quadro 7) de alguns dos principais autores de ábacos para dimensionamento e verificação hidráulica de reservatórios de ar comprimido, adaptado de Almeida e Koelle [25].

Quadro 7 - Alguns dos principais autores de ábacos para dimensionamento e verificação hidráulica de reservatórios de ar comprimido[25]

Autor	Ano	Modelos
Vibert	1950	Rígido simplificado
Sliosberg	1952	Rígido simplificado
Combes e Borot	1952	Rígido simplificado
Dubin e Gueneau	1955	Elástico (método gráfico)
Parmakian	1963	Elástico (método gráfico)
Paoletti	1972	Elásticos e rígidos (comparações)
Ruus	1977	Elástico (MDC)
Meunier e Puech	1978	Elástico
Fok	1978	Elástico
Graze e Horlacher	1986 e 1990	Elástico

7.4 LEGISLAÇÃO APLICÁVEL

Os Equipamentos Sob Pressão (ESP) nos quais se incluem os RAC, são dispositivos, que pelo seu modo de funcionamento não se podem dissociar da possibilidade de poderem causar graves danos ambientais, estruturais e humanos em caso de deficiente gestão e manutenção. Desta forma foram executados regulamentos que exigem ao Estado Português e ao legislador uma maior vigilância e cuidados de instalação e funcionamento. O regulamento que executa os procedimentos de funcionamento, instalação, reparação e manutenção dos Equipamentos Sob Pressão (ESP), grupo no qual se inclui RAC é o Decreto-Lei nº20/2010 de 22 de Julho.

Este regulamento presente no referido decreto-lei visa prever medidas de simplificação dos processos de licenciamento para algumas famílias de equipamentos sob pressão através de instruções técnicas complementares (ITC). De forma a reduzir a morosidade do processo e a redução dos custos inerentes ao mesmo, desmaterializaram-se alguns procedimentos, revogando-se assim o Decreto-Lei nº97/2000, de 25 Maio, mantendo-se no entanto o despacho nº1859/2003 (2º série), de 30 de Janeiro referente aos Reservatórios de Ar Comprimido, publicado ao abrigo do Decreto-Lei referido anteriormente.

A instrução técnica complementar (ITC) para recipientes sob pressão de ar comprimido, faz parte integrante desse despacho, pelo que serão alvo de uma breve descrição no presente capítulo.

O ITC abrange na generalidade todos os RAC's, excluindo do seu âmbito de aplicação os que são utilizados como parte exterior de um corte de circuito eléctrico ou transformador ou adstritos a embarcações, veículos a motor e seus reboques e aeronaves, bem como equipamentos referidos na alínea e) do nº 2 do artigo 3º do Regulamento aprovado pelo Decreto-Lei nº97/2000, de 25 Maio.

7.4.1 Instalação

A instalação de um dispositivo desta natureza deve ser feita preferencialmente em locais isolados, com arejamento e iluminação adequada dispondo de acessos fáceis, rápidos e seguros, de forma a salvaguardar a segurança de pessoas e bens.

Assim sendo, deverão ser tidas em conta distâncias de segurança em relação a zonas públicas ou locais zonas onde possam permanecer ou circular pessoas estranhas à empresa proprietária, ou ainda a propriedades privadas. Estas diferem para diferentes classes de perigo do RAC, que o classificam em diferentes grupos consoante a energia potencial dos mesmos e o risco associado à instalação e funcionamento, como apresentado no quadro 8.

As distâncias poderão ser reduzidas de 20% caso exista uma barreira de entreposição, como uma parede em betão com espessura mínima de 15 centímetros ou equivalente.

Quadro 8 – Distâncias de segurança para diferentes classes de Perigo

Classe de Perigo	Critério PS × V – em bar × litro	Distância de Segurança(em metros)	
		Sem Barreira	Com Barreira
A	≥ 30000	15	12
B	15000 a 30000	10	8
C	3000 a 15000	5	4

A instalação deste dispositivo deverá contemplar também distâncias mínimas de 60 centímetros relativamente a paredes, tectos e outros objectos e de 30 centímetros entre a sua parte inferior e o solo, de forma a possibilitar a inspecção em todo o seu exterior.

Segundo as ITC não é permitido também proceder à instalação do RAC em locais inacessíveis ou enterrados, mesmo que parcialmente. Caso seja feita no interior de um edifício, este deverá apresentar um pé-direito superior a 2 metros.

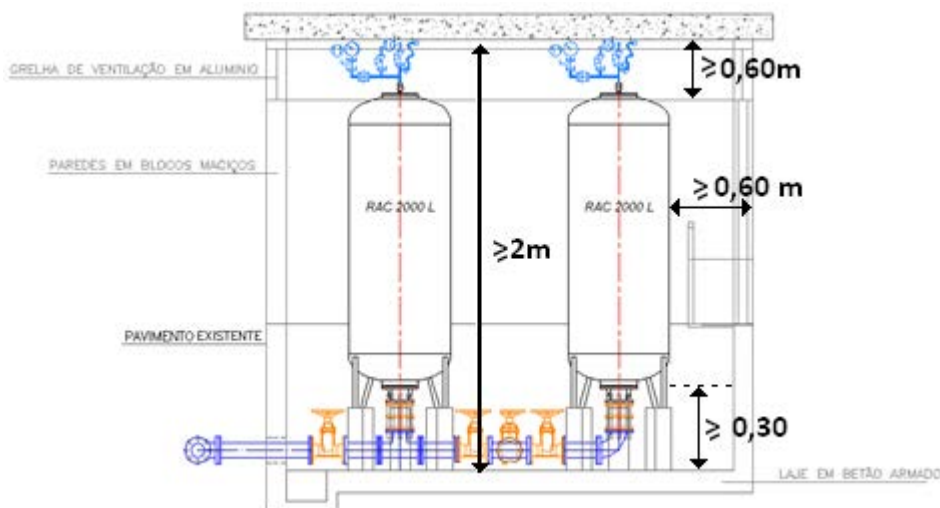


Fig.7.2 - imagem RAC no interior de um edifício

Em termos estéticos é recomendável que o reservatório apresente a mesma cor das tubagens de distribuição identificadas com coloração azul-clara, devendo ostentar no seu corpo e nas portas de acesso aos locais de instalação (quando esta se destina exclusivamente a esse propósito) uma inscrição em letras negras sobre fundo amarelo, legível a aproximadamente 5 metros, que deverá ser a seguinte: **“Perigo! Equipamento sob Pressão”** (Fig.7.3).



Fig.7.3 –Reservatório de Ar Comprimido da ETA de Areias de Vilar sujeito a operação de fiscalização. Pormenor de inscrição.

As ITC prevêm a instalação obrigatória de equipamentos de segurança tais como válvulas de segurança, manómetros e todos os tipo de aparelhos de controlo, sendo estes alvo de análise nesse documento.

7.4.2 Condições de Exploração

Como compreensível, em caso algum, um RAC deverá funcionar a um valor de pressão superior ao máximo admissível, pois poderá comprometer o funcionamento do mesmo nas condições mínimas de segurança desejáveis. Assim sendo, compete à Autoridade de Segurança Alimentar e Económica (ASAE), com o conhecimento da DRE, a fiscalização do cumprimento do regulamento de forma a providenciar as medidas necessárias para mitigação dos perigos identificados/detectados.

O pessoal que intervém no seu funcionamento deverá ter a formação necessária que garanta os conhecimentos dos riscos associadas a este dispositivo bem como as medidas de controlo dos mesmos.

Deverão ser previstas purgas de condensados com periodicidade conveniente, como medida preventiva do fenómenos de corrosão do recipiente

Quando o RAC apresentar deformações permanentes e profundas, fissuras e fugas no seu corpo e ou até fenómenos de corrosão interna, deverá ser retirado de funcionamento, devendo o proprietário ou utilizador comunicar à Direcção Geral de Economia (DRE) essa decisão.

Estes dispositivos, pelas perigos inerentes referidos anteriormente, têm um período máximo de autorização de funcionamento de seis anos, sendo esse período renovado após obtenção de resultados positivos nas inspeções efectuadas ao recipiente e à instalação levadas a cabo pela DRE.

As inspecções têm como principal objectivo a verificação da manutenção das condições de instalação, segurança e resistência do dispositivo em causa. No que se refere às condições de instalação, são tidos em conta aspectos como iluminação, distâncias entre o RAC e as paredes, tectos e equipamentos, acessibilidades, aspecto exterior, órgãos de segurança e placas de identificação. As condições de funcionamento no recipiente são testadas com recurso a provas de pressão hidráulica ao próprio (e outros ensaios se justificável), bem como verificações ao desempenho dos órgãos de segurança.

8

CASO DE ESTUDO

8.1 SUBSISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA DE AREIAS DE VILAR

Com vista à modelação do funcionamento de um Reservatório de Ar comprimido, desenvolveu-se o trabalho experimental no Sistema Elevatório de Barradas que faz parte integrante do Subsistema Multimunicipal de Abastecimento de Água de Areias de Vilar, operacional à cerca de treze anos, que se situa no concelho de Vila Nova de Famalicão e que se integra no Sistema Multimunicipal de Abastecimento de Água e de Saneamento do Noroeste, cuja exploração e gestão é da responsabilidade da empresa concessionária Águas do Noroeste, S.A. , que resultou da fusão das sociedades Águas do Cávado, S.A., Águas do Minho e Lima, S.A. e Águas do Ave, S.A.

O sistema integra como utilizadores originários os Municípios de Amarante, Amares, Arcos de Valdevez, Barcelos, Cabeceiras de Basto, Caminha, Celorico de Basto, Esposende, Fafe, Felgueiras, Guimarães, Lousada, Maia, Melgaço, Monção, Mondim de Basto, Paredes de Coura, Ponte da Barca, Ponte de Lima, Póvoa de Lanhoso, Póvoa de Varzim, Santo Tirso, Terras do Bouro, Trofa, Valença, Viana do Castelo, Vieira do Minho, Vila do Conde, Vila Nova de Cerveira, Vila Nova de Famalicão, Vila Verde e Vizela (Fig.8.1).



Fig.8.1 – Área geográfica dos municípios integrados no sistema multimunicipal de abastecimento de água e de saneamento do Noroeste [26]

Este subsistema abrange os municípios de Barcelos, Esposende, Maia (Norte), Póvoa de Varzim, Santo Tirso, Trofa, Vila do Conde e Vila Nova de Famalicão, estando dimensionado para fornecer cerca de 60 milhões de m³ de água potável por ano, a uma população residente estimada superior a 600 mil habitantes.

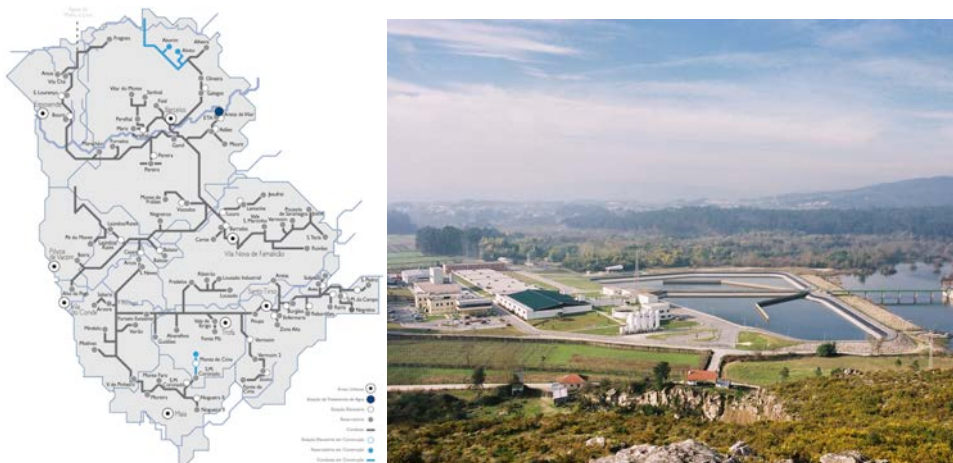


Fig.8.2 - Mapa da rede do subsistema de Areias de Vilar Vista panorâmica da ETA de Areias de Vilar (fonte: Águas do Noroeste, S.A.)

O Subsistema de Areias de Vilar é constituído por uma estação de tratamento de água (ETA), 29 estações elevatórias, 76 reservatórios e aproximadamente 330 km de condutas adutoras. A extensão de condutas apresentada, com diâmetros compreendidos entre os 1.400 e os 100 mm, é, na sua maioria, em ferro fundido dúctil. De salientar ainda que a capacidade de reserva de água na adução aproxima-se, actualmente, dos 170.000 m³.

8.2 SISTEMA ELEVATÓRIO DE BARRADAS

Pretende-se com este subcapítulo descrever as principais características do sistema elevatório de Barradas, que é genericamente composto por quatro componentes: reservatório de montante em Barradas, estação elevatória (E.E. Barradas), a conduta elevatória e o reservatório de jusante em Cerite.

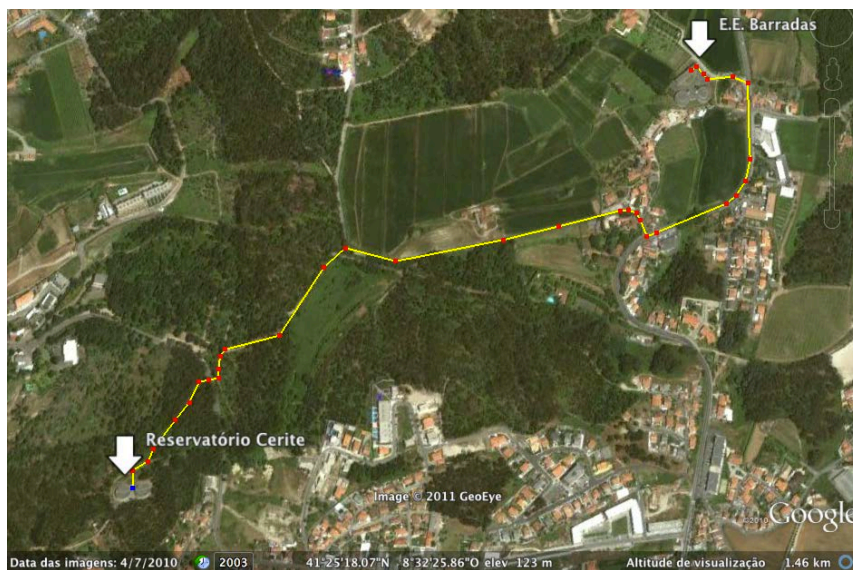


Fig.8.3 – Fotografia Aérea do Sistema Elevatório (fonte: Google Earth)

A Estação Elevatória de Barradas é uma Estação Elevatória em Adução com Reservatório de Regularização, o que exige a implantação de um reservatório a montante dos grupos elevatórios.

Como se pode ver pela representação esquemática em planta da E.E. Barradas (Fig.8.4), são estes elementos que ocupam uma maior área de implantação devido à sua funcionalidade.

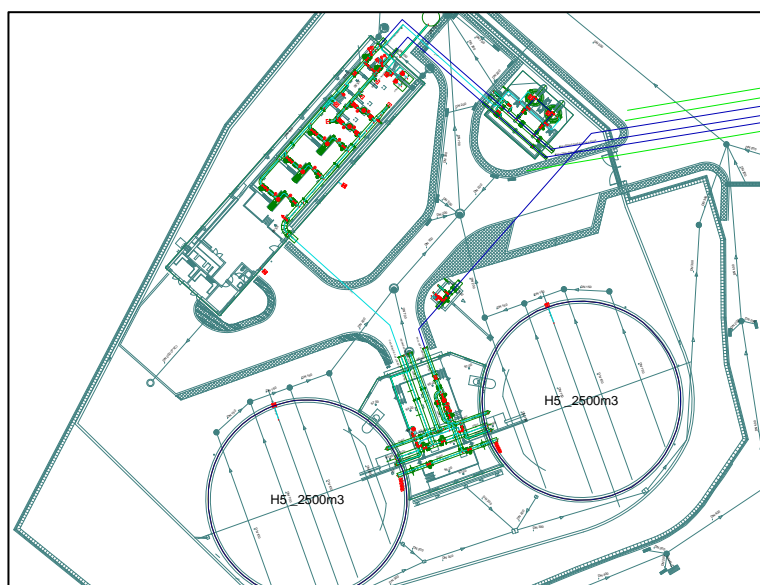


Fig.8.4 – Representação esquemática em planta da Estação Elevatória de Barradas (fonte: Águas Noroeste S.A.)

Este reservatório é constituído por duas células com um volume de 2500 m^3 cada, interligados entre si na câmara de manobras (Fig.8.4).

O mecanismo de elevação da água inicia-se neste reservatório, com a condução da água de cada célula através de uma conduta vertical (cerca de 6 metros – FFd DN500) ligada a um colector de

aspiração em ferro fundido dúctil (FFd DN700) que encaminha o escoamento até aos grupos elevatórios (Fig.8.5).

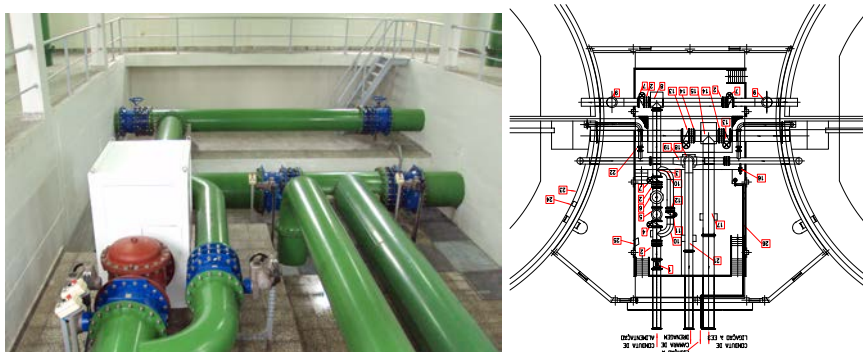


Fig.8.5 - Conduitas de aspiração na câmara de manobras do Reservatório de Montante. Representação esquemática em planta. (fonte: Águas Noroeste S.A.)

Já na estação elevatória propriamente dita, a água pode ter dois destinos diferentes, podendo seguir por dois ramais independentes, que são:

- O ramal de Cerite, que garante o fornecimento de água a alimentação da zona urbana da cidade de Vila Nova de Famalicão;
- O ramal de Joane e St. Tecla, que garante o fornecimento de água à zona leste do concelho de Vila Nova de Famalicão.



Fig.8.6 – Fotografia do interior da estação elevatória de Barradas . À esquerda – ramal de Cerite; à direita – ramal de Joane e Stº Tecla

No âmbito do presente trabalho, apenas se irá estudar o ramal de Cerite. A elevação de água nesta conduta elevatória é assegurada por 2 grupos electrobomba com variadores de velocidade, funcionando em 1 + 1 permitindo, cada um, a elevação de caudal nominal de aproximadamente 194 l/s a uma altura manométrica de 139 metros, com uma potência instalada de 350 kW. São grupos

elevatórios da marca EFAFLU, tipo 3-250 KZ 40.5 de eixo vertical, com velocidade de rotação 1450rpm. A curva característica do grupo elevatório é apresentada na fig. :

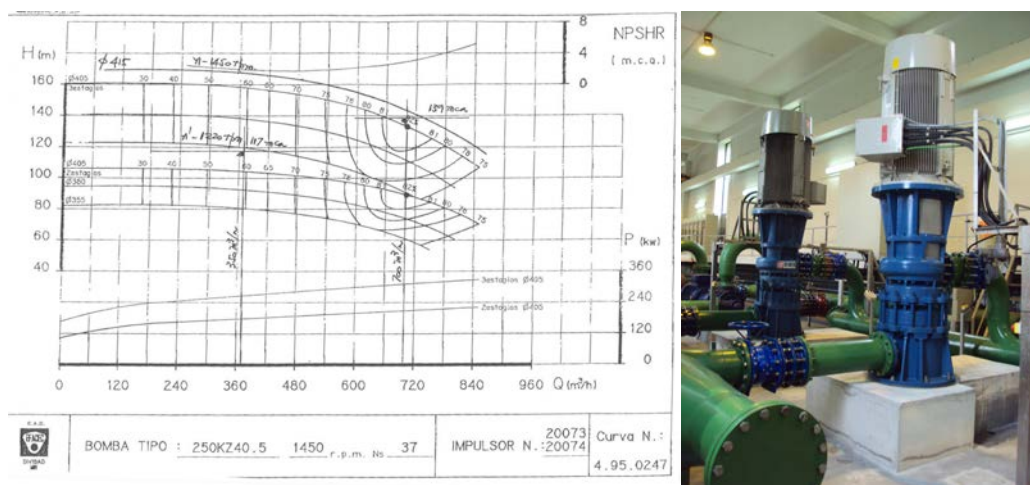


Fig. 8.7 – Curva Característica e fotografia da Bomba EFAFLU, tipo 3-250 KZ 40.5 com motor Siemens 355kW

O actual grupo elevatório do ramal de Cerite, já não corresponde ao originalmente projectado. Com o objectivo de responder aos crescentes consumos solicitados ao reservatório de Cerite, substituíram-se três bombas de eixo horizontal do tipo CJG 100-315 PN16 pelas duas anteriormente referidas, por apresentarem uma capacidade de elevação de caudais superior, tornando o sistema mais eficaz

A conduta elevatória parte à cota 96,40 metros e finaliza no reservatório de Cerite a uma cota superior (aproximadamente 205 metros), estabelecendo-se essa ligação através de uma conduta em ferro fundido FFD DN350 PN16, com uma extensão estimada em 1735 m. Esta conduta apresenta um trajecto praticamente ascendente, sendo munida ao longo do mesmo de duas ventosas e duas válvulas de descarga.

A conduta elevatória finaliza no reservatório de Cerite, (Fig.8.8) que é constituído também por duas células, com capacidade total de armazenamento de 3000 m³.



Fig.8.8 - Vista panorâmica do Reservatório de Cerite

8.3 RESERVATÓRIO DE AR COMPRIMIDO DE BARRADAS

O RAC desta estação encontra-se implantado no exterior da câmara de manobras onde estão instalados os grupos elevatórios.

Este dispositivo de protecção ao choque hidráulico, que é alvo de análise neste trabalho, foi construído em 1998 e apresenta como principais características uma pressão máxima admissível de 25 bar e um volume de 10,337 m³.

Esta estação conta com dois reservatórios verticais iguais que funcionam de forma independente, uma vez que cada um está ligado a seu ramal (Cerite e Joane e Santa Tecla).

Ambos estão instalados à cota de 96,35m e com uma altura de cerca de 4,7 m, o que corresponde a uma cota máxima de 101 m. A derivação para a conduta não é provida de qualquer tipo de estrangulamento, sendo esta constituída por dois trechos em DN300 ligados por uma curva a 90° (completando 4,5 m) com ligação a uma junta de desmontagem e a uma válvula em borboleta.

A medição dos níveis de água no seu interior são feitos com recurso a medidores de nível analógico, visíveis pelo exterior. Esta medição é constituída por quatro níveis: baixo, médio, normal, alto. Quando o nível de água cruza estes patamares pré-estabelecidos é transferida essa informação para a central de comandos registando todas as mudanças de patamares.

Estes RAC projectados inicialmente para proteger unicamente a conduta de Joane e St^a Tecla, foram alvo de uma intervenção posterior à sua instalação, com a finalidade de proporcionar, também, alguma segurança em relação ao choque hidráulico na conduta de Cerite.

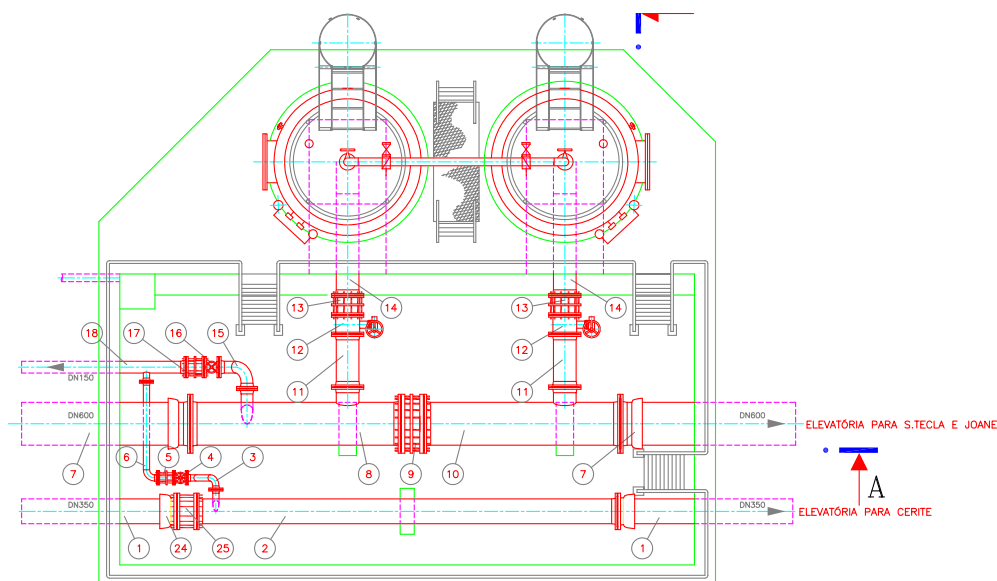


Fig.8.9 – Representação esquemática em planta do RAC de Barradas antes da intervenção (fonte: Águas Noroeste S.A.)

Como se deduz pela figura 8.9, a ligação do RAC à conduta em causa, só seria possível com o contorno pela face superior ou inferior da outra conduta e recorrendo a trechos de menor diâmetro. Dessa forma, a opção tomada recaiu sobre a primeira hipótese através de uma conduta DN80, aproveitando a ligação da conduta de descarga para facilitar a ligação como ilustra a figura 8.10.

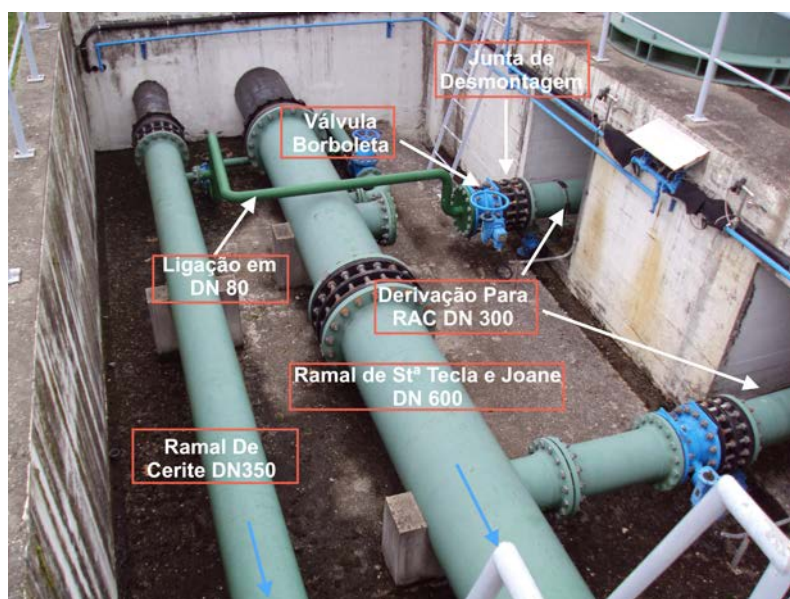


Fig.8.10 – Fotografia do actual “poço de manobras” do RAC.

8.4 ENSAIOS REALIZADOS

Com a finalidade de modelar o comportamento de um RAC , procedeu-se a uma análise comparativa entre ensaios de choque hidráulico num caso real e a adaptação do mesmo a um modelo teórico, tendo como referência a instalação já introduzida e descrita no capítulo anterior.

8.4.1 Metodologia

O estudo realizado teve como base a análise de pressões em vários pontos do circuito hidráulico de forma a compreender a influência do RAC na atenuação de variações de pressão aquando da ocorrência do choque hidráulico.

Assim sendo, escolheram-se quatro secções do circuito hidráulico que se consideram como tendo significado no estudo deste fenómeno. No entanto também foram considerados outros critérios nessa escolha, nomeadamente a facilidade e rapidez de instalação dos medidores.

As secções escolhidas são apresentadas no quadro seguinte e o enquadramento da sua localização é ilustrada na figura 8.11 .

Quadro 9 – Identificação e localização das Secções de Medição

Localização das Secções de Medição				
Secção	S1	S2	S3	S4
Equipamento	Grupo Elevatório	RAC	Ventosa	Reservatório Cerite
Local de Instalação	Conduto Bomba 2	Corpo RAC	Acoplado ventosa	Conduto
Distância ao G.E.(m)	0,50	19,60	1000	1732

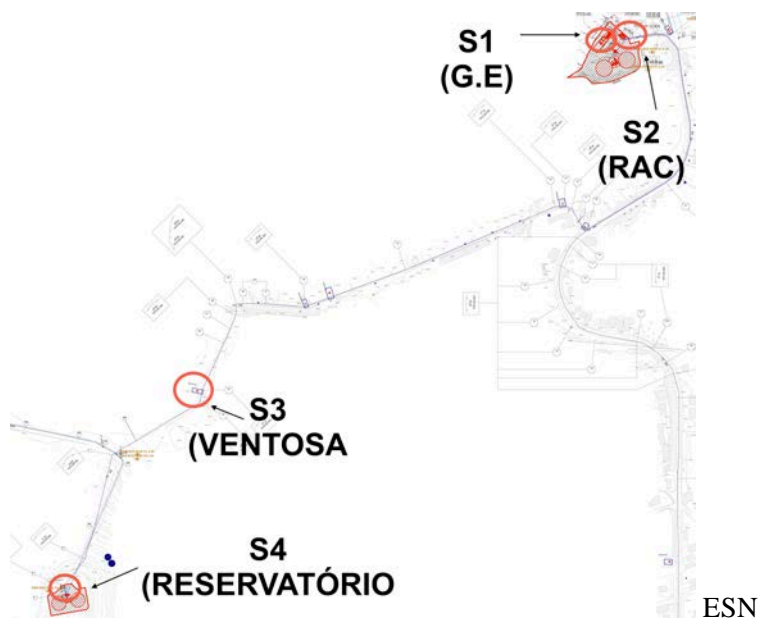


Fig.8.11 – Representação esquemática em planta da localização das secções de medição

A medição de pressões e a sua evolução no tempo fez-se com recurso a dataloggers da marca GEMINI tipo TINYTAG PLUS (Fig.8.12), para pressões máximas de 16 bar, através dos quais é possível registar e armazenar informação em intervalos de 1 a 10 segundos. Após a recolha de dados, toda a informação é facilmente descarregada através de software próprio para um computador.



Fig.8.12 – Equipamentos de medição instalados na conduta de compressão

Previamente à obtenção de dados resultantes da paragem provocada no grupo elevatório, procedeu-se ao registo de pressões nesses pontos durante alguns dias, de forma a criar um registo das variações de pressão nas diferentes secções durante o normal funcionamento do sistema elevatório.

Esse registo foi composto por duas fases distintas, totalizado em doze dias de registos ao longo do tempo, em que a medição das pressões foi feita em intervalos de dez segundos (Anexo 1) :

- A primeira foi feita nos dias 26 a 28 Abril de 2011, mas apenas nas secções 1,2 e 4 por indisponibilidade do material requerido (Registos 1 a 3);
- Segunda fase nos dias 2 a 10 de Maio de 2011 em todas as secções (Registos 4 a 12).

Posteriormente foram realizados dois actos experimentais, que constaram genericamente em ensaios do tipo “Para-Arranca” do grupo elevatório através do accionamento manual de paragem de emergência.

De notar que pelo facto de todo o sistema elevatório se encontrar a funcionar em modo automático, controlado desde a central de comando na ETA de Areias de Vilar, obrigou a alterar previamente esse modo de funcionamento para manual. Esse procedimento é essencial para obter resultados satisfatórios nos vários ensaios uma vez que com funcionamento em modo automatizado, seria impossível recriar um cenário de interrupção brusca do fornecimento de caudal, pois a paragem da bomba seria mais gradual o que atenuaria o efeito de choque hidráulico. Todos os actos experimentais serão descritos e pormenorizados nos capítulos seguintes.

A análise teórica do comportamento da estação elevatória de Barradas, foi constituída por duas etapas:

- a) “Pré-Análise” com recurso a uma folha de cálculo em Excel, programada com o Método das Características, desenvolvido pelo Prof. Dr. Manuel Pacheco Figueiredo para a disciplina de Sistemas de Abastecimento de Água do ramo de Hidráulica de Engenharia Civil da FEUP.
- b) Programa em software Matlab©, desenvolvido em por João Pedro Valente [27], cujo algoritmo de cálculo do modelo teórico é baseado também no método das características.

É apresentada de seguida uma listagem dos dados que são necessários introduzir no ficheiros de dados do programa:

- comprimento, diâmetro e rugosidade da conduta elevatória;
- número de “pontos” em perfil disponíveis da conduta elevatória;
- coordenadas dos “pontos” definidores da conduta elevatória;
- desnível geométrico entre as duas secções, montante e jusante da conduta;
- perda de carga localizada na conduta (10% da perda contínua) ;
- coeficiente de viscosidade cinemática;
- número de rotações por minuto do grupo electrobomba e coeficientes definidores da curva característica da bomba;
- coeficientes definidores da curva de rendimento do grupo elevatório;
- inércia do grupo electrobomba;
- celeridade;
- número de trechos da conduta a considerar na análise;
- diâmetro do RAC;
- cotas do nível de água no RAC em regime permanente de escoamento, do nível máximo e do nível mínimo;

- coeficiente alpha (α) correspondente ao expoente da lei de estado do ar no RAC;
- diâmetro da ligação e diâmetro da tubeira do RAC;
- comprimento do tubo de ligação e a rugosidade do mesmo;
- coeficiente de perda de carga localizada no tubo de ligação;
- definição da secção do Método das Características a que está ligado o RAC;
- tempo pretendido de simulação.

Por fim, recolhidos os resultados para diferentes caudais de elevação, estabelece-se uma comparação entre os dados obtidos experimentalmente e os adquiridos através de modelos teóricos.

8.4.2 Teste Experimental - 1

Para esta experiência foram realizadas as medições de pressão nas secções atrás indicadas resultantes da ocorrência de uma paragem brusca do grupo elevatório.

Com vista a compreender a influência do caudal no estudo do fenómeno, analisaram-se diferentes cenários de caudais de bombagem nas duas bombas, de acordo com o exposto no Quadro 10.

Como as bombas funcionam em reserva mútua, isto é, não funcionam em simultâneo, realizaram-se ensaios com uma grande gama de caudais (450, 500, 550, 600 a 650 m³/h) apenas na bomba 1. Por forma a perceber se o facto de estar a trabalhar com uma bomba em detrimento da outra, influencia os resultados obtidos, ensaiou-se o maior caudal para a bomba 2, possibilitando assim uma comparação de comportamentos de ambas e a sua influência na evolução do fenómeno .

Quadro 10 – Ensaios Realizados

Dados Ensaios		
Bomba	Ensaio	Caudal (m ³ /h)
1	1	450
	2	500
	3	550
	4	600
	5	650
2	6	650

No anexo 2, são apresentados os valores característicos dos ensaios e os respectivos gráficos.

Cada ensaio é constituído por quatro fases distintas, ilustradas na fig.8.13, que são:

- A – Arranque grupo elevatório;
- B – Estabilização das pressões de arranque;
- C – Choque Hidráulico;
- D – Estabilização das pressões de paragem,

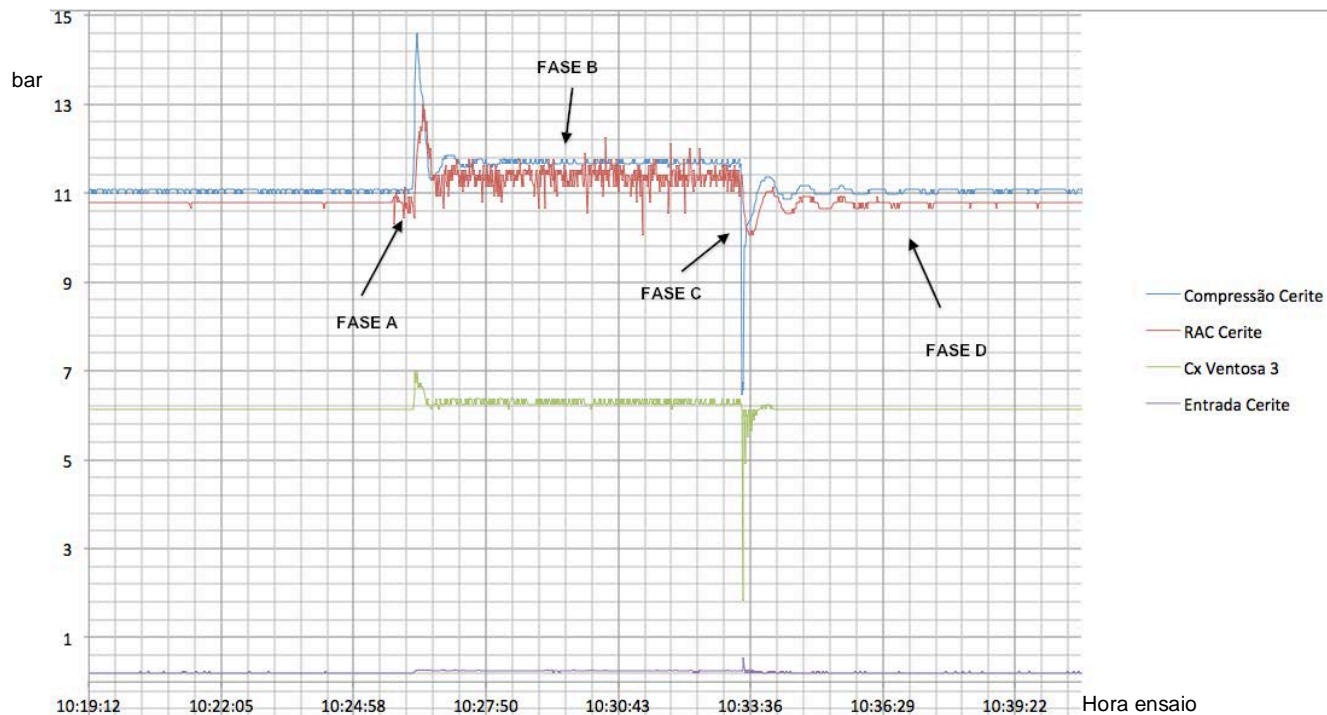


Fig.8.13 – Exemplo de Faseamento Ensaio 1

Este faseamento permitiu constatar que as variações de pressão ao longo de cada ensaio são muito variáveis em cada uma dessas fases.

Atente-se que a interrupção propositada da bomba apenas foi executada quando se verificou constância nas pressões observadas no registador instalado na conduta de compressão, pois apenas nessas condições é que o fenómeno de choque hidráulico poderia apresentar valores representativos e com significado para o presente estudo.

No que se refere aos resultados obtidos, pela análise dos gráficos ilustrados nas figuras 8.13 e 8.14, deduz-se logo à primeira vista, que os picos de pressão acontecem tanto no arranque da bomba como na sua paragem. No entanto e tal como o nome “pico” indica, esses valores só se registam em intervalos de tempo muito curtos, cerca de alguns segundos.

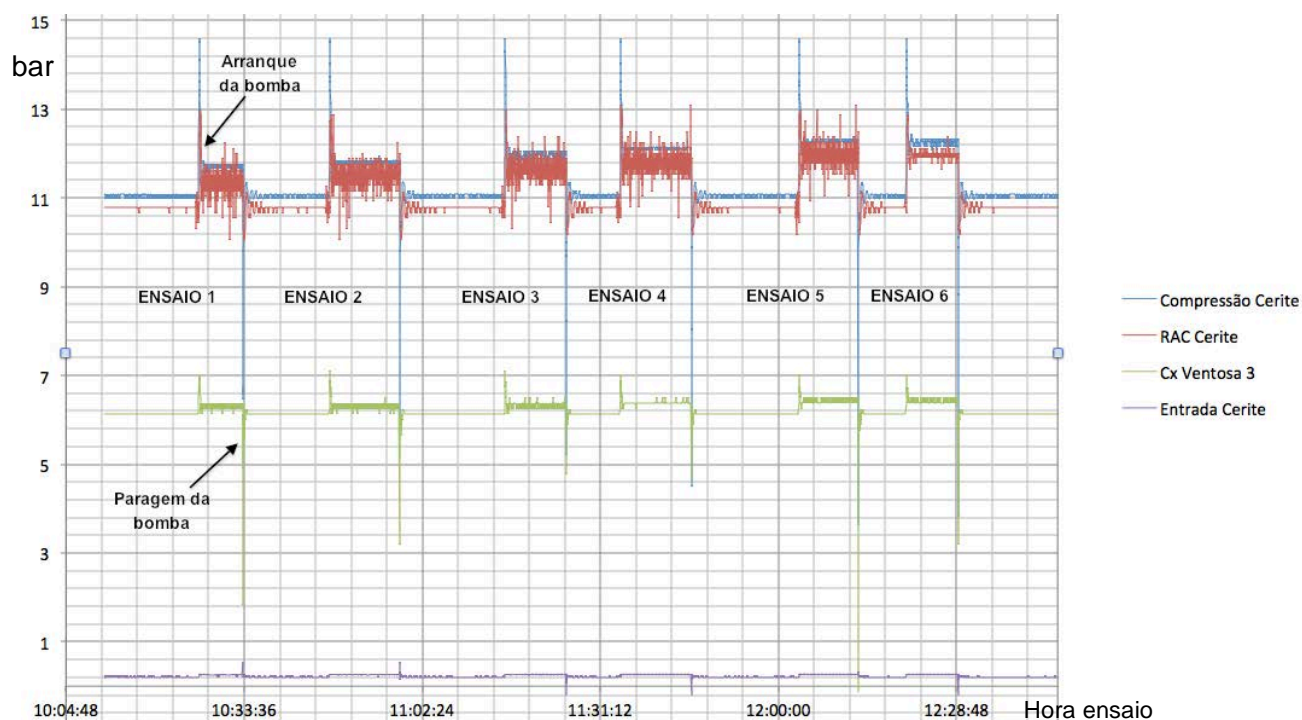


Fig.8.14 –Registo de pressões nas quatro secções nos vários ensaios.

É possível perceber também que esses picos se fazem sentir em todas as secções em análise quase em simultâneo, exceptuando-se o reservatório de Cerite, em que essa influência quase não se verifica.

Desta análise gráfica complementada pela observação do quadro A2 em anexo, infere-se também que quanto maior o caudal bombeado, maior é o valor da depressão criada na conduta, principalmente na secção 1 e 2. Relativamente a pressões máximas, no momento do arranque, foi igual em todos os ensaios realizados.

Tal como referido anteriormente, numa primeira etapa de pré-análise dos resultados obtidos, foi usada a folha de cálculo em EXCEL. Apesar de todas as limitações dessa folha de cálculo, devido às simplificações inerentes ao mesmo, conclui-se que a diferença de pressões entre o modelo e o protótipo se aproximavam a 4bar para caudais de $650\text{m}^3/\text{h}$ na secção do RAC.

Para a obtenção desses resultados, considerou-se que a ligação entre o RAC seria apenas constituída por um trecho único em DN80, considerando as perdas de carga na tubeira função desse diâmetro.

A escolha por este diâmetro em detrimento do DN 300, deve-se ao facto do programa apenas considerar a ligação em diâmetro único e por este traduzir perdas de cargas maiores, correspondendo assim a um cenário de pressões mais gravoso,

Rapidamente se conclui que apesar das limitações da folha de cálculo, que tão gravosas diferenças de pressão se deveram sobretudo às perdas de carga na ligação que não foram consideradas.

Conclui-se também que a utilização simplista do método das características se verificou ineficaz, inadequada e inadaptado ao caso em estudo, pelo que daqui em diante se optou por utilizar apenas o programa em MATLAB[®].

Por fim, com a utilização do software MATLAB[®] verificou-se também a inadaptação do modelo teórico na secção do RAC, às características dessa secção na estação elevatória de Barradas. Tal facto

deve-se a que este programa considera a conduta de ligação em diâmetro único. De forma a contornar esse problema, consideraram-se dois cenários de análise:

- Ligação em DN 80 com 4.45m e introdução de perda de carga localizada para traduzir o efeito da perda de carga do trecho em DN300, não considerando perdas de carga na tubeira.
- Ligação em DN 300 com 4.5m e introdução de perda de carga localizada para traduzir o efeito da perda de carga do trecho em DN80, não considerando perdas de carga na tubeira, pois esta não existe.

No entanto, a necessidade de testar estes cenários levou a que fosse introduzida uma nova incógnita neste estudo, a perda de carga ao longo da conduta. Desta forma tornou-se necessário quantificar esse parâmetro através de novas medições no protótipo, resultando numa segunda fase de ensaios que será descrita no capítulo seguinte.

8.4.3 Teste Experimental - 2

Neste ensaio, e com o objectivo de quantificar a perda de carga na tubagem de ligação ao RAC, foi utilizado um datalogger adicional na ligação da tubagem em DN80 com a DN300.

A escolha dessa secção deveu-se não só à possibilidade de ser retirados dados com significado para o objectivo proposto, bem como a relativa facilidade em efectuar a instalação do aparelho de medição de uma forma rápida e eficaz devido à existência de uma válvula de descarga, tal como se pode ver na figura seguinte:



Fig.8.15 – Instalação de um datalogger na conduta de ligação ao RAC

Neste acto experimental os caudais e bombas utilizadas foram os mesmos do primeiro ensaio, resultando no gráfico de pressões apresentado no anexo 3.

A análise do mesmo pode ser complementada pelo quadro de valores característicos apresentados no quadro A3 em anexo.

Com este novo dispositivo de medição, foi possível quantificar diferenças de pressão entre a secção de medição na conduta de compressão e a nova secção de medição.

Para tal, admite-se que a pressão na compressão é igual à pressão na secção de ligação da conduta principal com a conduta de ligação RAC, pois as perdas de carga contínuas na conduta principal entre a bomba e o RAC, considerando que se escoar o caudal máximo de bombagem, são desprezáveis comparativamente às perdas na ligação, tal como visto no seguinte quadro:

Quadro 11 - Perdas de carga reais totais na conduta de ligação ao RAC e perdas contínuas teóricas no trecho Bomba-secção de ligação

Q (m ³ /h)	Perdas de Carga Reais médias na ligação (bar)	Perdas de carga contínuas teóricas entre a Bomba e a secção de ligação (bar)
650	7,6	0,003
600	7,1	0,003
550	6,0	0,003
500	5,3	0,002
450	4,5	0,002

Atendendo aos valores das perdas de carga médias na ligação apresentadas no quadro anterior, a conduta em DN80 provoca uma perda de carga muito significativa para a gama de pressões existentes no sistema em causa.

Tal como referido anteriormente, foram analisadas duas situações diferentes no que se refere aos dados introduzidos no programa na ligação ao RAC.

No primeiro cenário, foram utilizados três valores para o coeficiente perda de carga localizada ($K_{Loc_1}=1$; $K_{Loc_2}=1,1$ e $K_{Loc_3}=2$) para atender à perda de carga localizada na curva de 90°, pois mesmo considerando valores de caudal muito elevados na conduta em DN300, os valores perdas de carga contínuas são pouco significativos.

Devido à falta de informação mais específica e detalhada, analisaram-se três hipóteses de possíveis valores de Kloc para se poder estudar, ainda que de forma mais qualitativa do que quantitativa, o comportamento teórico do RAC.

A análise no modelo mostrou-se ineficaz para todas as hipóteses, pois verificaram-se erros numéricos na resolução das equações de segundo grau das condições fronteira no grupo elevatório.

Esta constatação levou a que fosse experimentada uma nova hipótese, $K_{Loc_4}=0$, de forma a perceber se este erro se devia à perda de carga localizada, ou ao diâmetro utilizado como diâmetro de ligação e tubeira.

Os resultados obtidos para esta hipótese foram análogos aos anteriores, o que se conclui que o erro se deve à aplicação da conduta em DN 80, considerando-se assim o cenário 1) como inapropriado ao problema, pois a consideração deste diâmetro, o caudal do RAC no modelo teórico a partir dos 7,8 segundos apresenta valores imaginários, provocando o problema numérico referido acima.

Assim sendo, para se proceder à análise do modelo teórico no cenário 2) foi necessário quantificar um valor para Kloc, mas agora que traduzisse um comportamento satisfatório da conduta em DN80.

Numa análise inicial a quantificação destes coeficiente, teve como base a análise de valores empíricos expostos por I. Idel'Cik[28] e Lencastre [29] que se verificou insatisfatória.

Esta situação deve-se ao facto dos referidos autores considerarem valores de velocidades baixos comparativamente às velocidades que possivelmente circulam no trecho em estudo e consequentemente, os valores máximos de K_{Loc} estimados são próximos da unidade.

Com intuito de justificar os elevados valores de velocidade na conduta anteriormente considerados, realizou-se uma análise que consistiu no estudo de caudais teóricos na secção do RAC nos instantes em que se verifica o choque no cenário 2), isto é, considerando a ligação em DN300 e uma perda de carga localizada de 1,1.

No caso de se considerarem os caudais obtidos na conduta em DN80, constatou-se que as velocidades resultantes desses caudais atingiriam valores máximos na ordem dos 45m/s, tal como ilustrado na figura 8.16 apresentada de seguida:

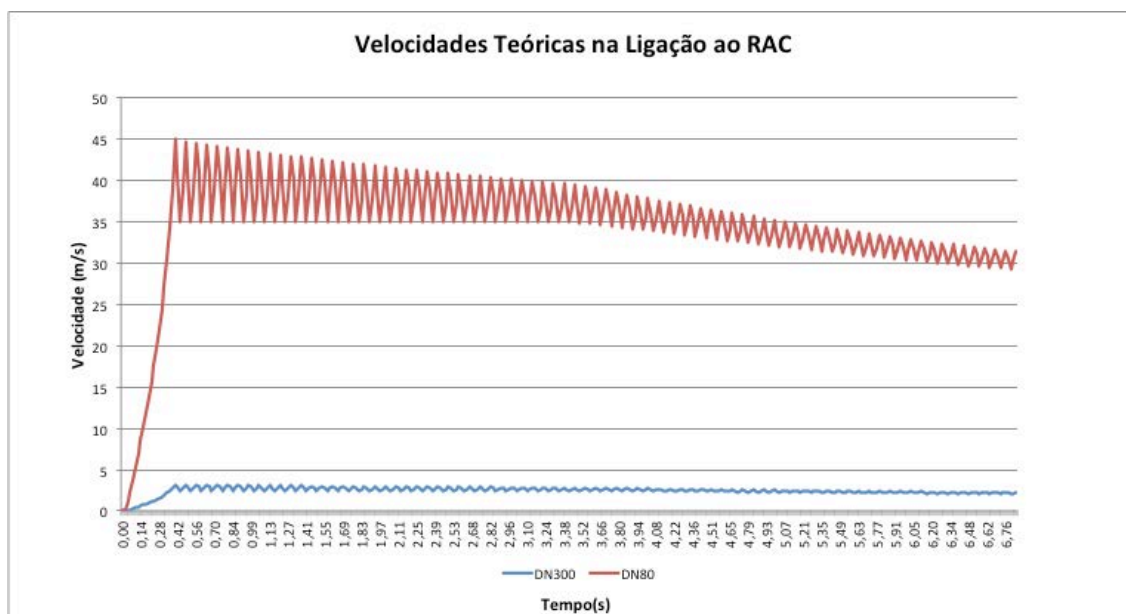


Fig. 8.16 - Velocidades teóricas no RAC

Apenas se consideraram os instantes iniciais, pois é durante esse período que se verificam os maiores caudais na conduta de ligação para anular as sobrepressões na conduta principal..

Com os dados adicionais obtidos neste segundo acto experimental, apresentados no quadro anterior (Quadro 11), tentou relacionar-se a perda de carga total medida na ligação com um coeficiente de perda de carga equivalente (k_{eq}).

Recorde-se que a localização do novo medidor instalado permite a observação das variações de pressão ao longo da conduta de ligação de menor diâmetro.

Para tal, estabeleceu-se uma relação entre a perda de carga na conduta com o caudal que se escoia na mesma.

Devido à falta de dados relacionada sobretudo com a velocidade ou caudal, considerou-se que o caudal seria o escoado na conduta principal, admitindo assim que toda a coluna líquida a montante da secção do RAC estaria imóvel, o que não acontece na realidade.

Com intuito de avaliar o erro inerente a essas considerações, efectuou-se também essa relação para caudais e perdas de carga teóricas (contínuas apenas), de forma a estabelecer uma comparação dos valores do coeficiente de perda de carga global (K_G) e equivalente (k_{eq}) nas diferentes situações (real e teórico).

A relação estabelecida é traduzida pela equação 8.1:

$$\Delta H = K_G Q^2 \quad (8.1)$$

em que:

$$K_G = \frac{k_{eq}}{2gS^2} \Leftrightarrow k_{eq} = 2gS^2 K_G \quad (8.2)$$

No que concerne à perda de carga contínua teórica referida anteriormente foi obtida pela conhecida expressão :

$$\Delta H = J.L \quad (8.3)$$

em que J representa a perda de carga unitária designada por Expressão Geral de Resistência ou Equação de Darcy-Weisbach:

$$J = k \frac{U^2}{2g} = \frac{\lambda U^2}{D 2g} \quad (8.4)$$

onde λ é o Coeficiente de Perda de Carga ou de Resistência definido pela Equação de Colebrook-White e com a formulação:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left(\frac{k}{3.7D} + \frac{2.51}{\sqrt{\lambda}} \right) \quad (8.5)$$

O dados relativos às variações de carga tanto reais como teóricos são apresentados no anexo 2.

A correlação obtida para os dois casos foi satisfatória, apresentando valores de coeficiente de correlação R^2 superiores a 0.8 , como se constata pela observação dos gráficos conseguidos (Fig.8.17 e 8.18).

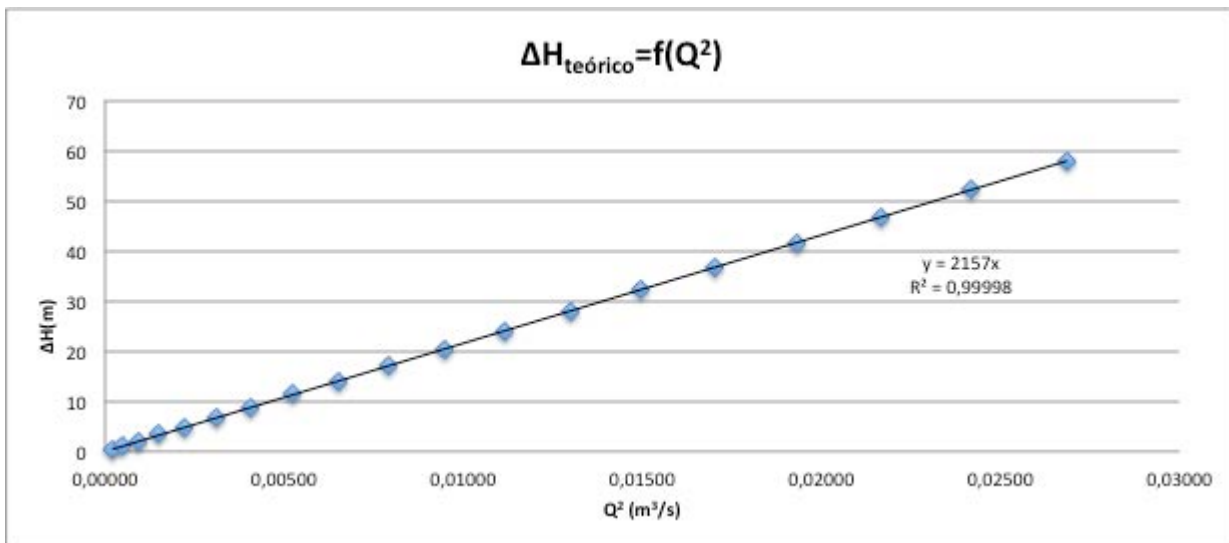


Fig.8.17 – Correlação de valores teóricos

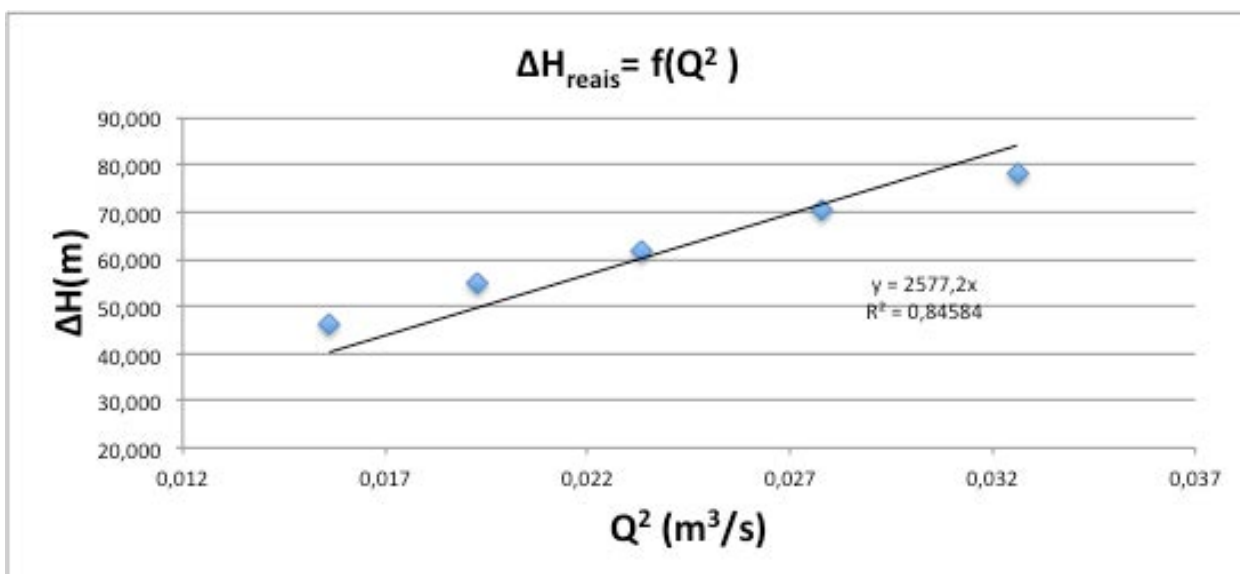


Fig.8.18 – Correlação de valores reais

Tal como esperado, os valores obtidos para K_G e k_{eq} apresentados no quadro 12 são diferentes, uma vez que na correlação de valores teóricos não se consideraram perdas de carga localizadas e na correlação de valores práticos consideram-se caudais que na realidade não circulam na conduta de ligação.

Quadro 12- Coeficientes de perda de carga globais e equivalentes

Coeficientes de perda de carga globais e equivalentes		
Coeficientes	K_G	k_{eq}
Dados Teóricos	2157	1,1
Dados Reais	2577,2	1,3

Os diferentes keq introduzidos no modelo teórico não produziram qualquer efeito nos resultados teóricos, isto é, a evolução das pressões é igual. Para os dois casos o valor de pressões mínimas foi de 6,99 bar e pressões máximas próximas de 11,39bar.

Pela observação dos gráficos ilustrados nas figuras 8.19 e 8.20 que comparam as pressões obtidas no modelo e nas medições, verifica-se que nos dois ensaios testado (5 e 6) os valores de pressão máxima são muito próximos (1bar), o que já não acontece em termos de pressões mínimas (superior a 3 bar).

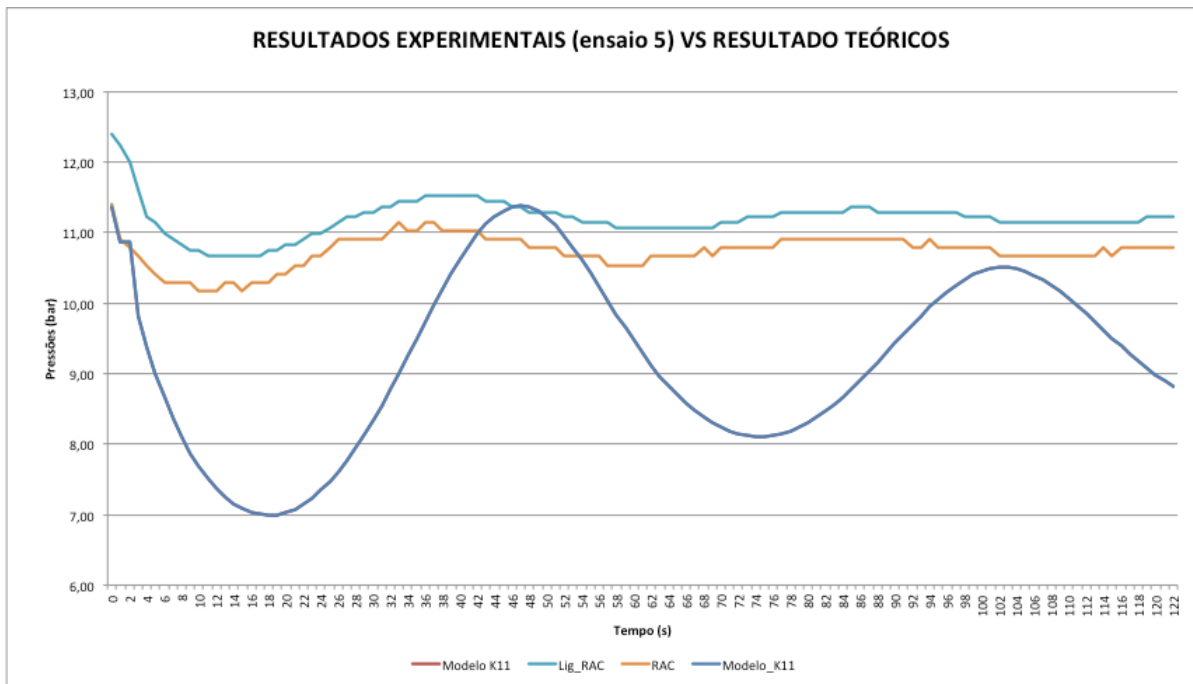


Fig.8.19 – Comparação modelo teórico e dados experimentais do ensaio 5

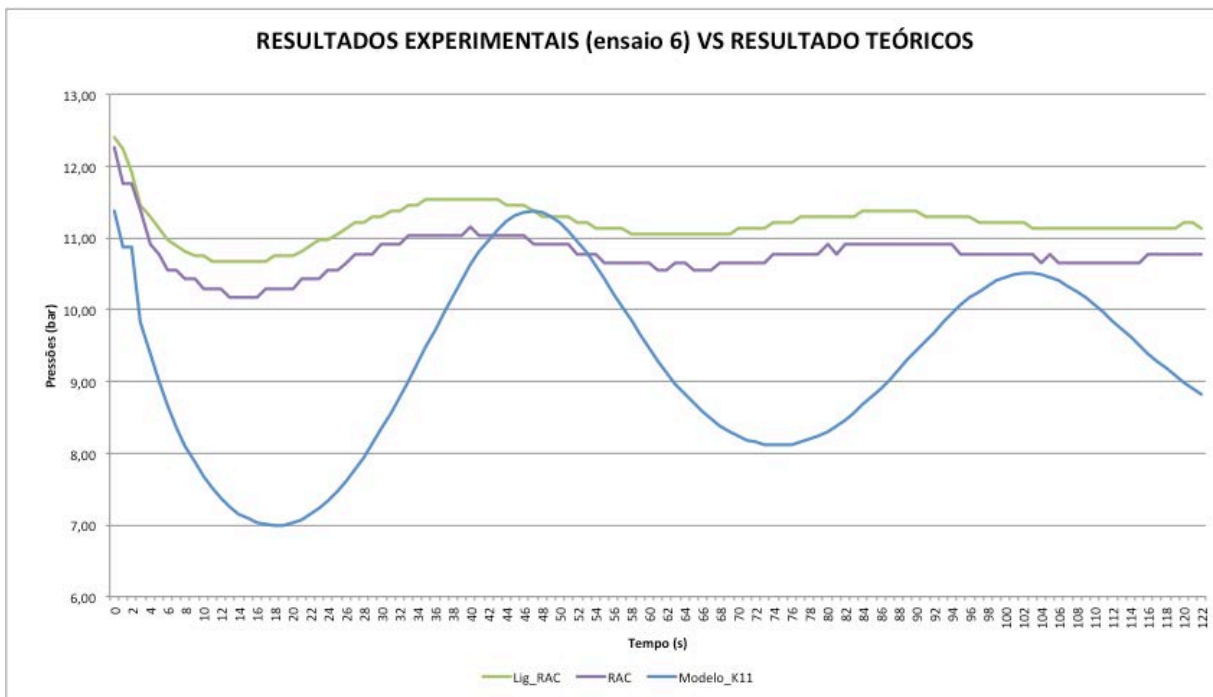


Fig.8.20 – Comparação modelo teórico e dados experimentais do ensaio 6

A diferença de pressões máximas é explicada pelo facto dos ensaios se realizarem com caudais de bombagem de 650 m³/h (altura manométrica de 140m) e o modelo teórico funcionar com caudais no ponto de funcionamento, isto é, cerca de 700 m³/h (altura manométrica de 129,2m).

Em termos de pressões mínimas, uma diferença tão significativa não é só justificada pela razão anteriormente enunciada, mas também pelo facto de o coeficiente de perda de carga estimado não conseguir traduzir os efeitos da tubagem de ligação. Consequentemente, o tempo de estabilização de pressões é mais curto na realidade do que no modelo teórico, com amplitudes de variações muito mais baixas.

Dos resultados obtidos deduz-se que a perda de carga na conduta de ligação tem um grande variação de energia resultante da variação da velocidade e que não foi possível quantificar.

Esta dinâmica nas pressões demonstrou ser impossível de retratar no modelo através de um único coeficiente k_{eq} , pois este deveria ser diferente em cada instante Δt do método das características.

Este raciocínio pode ser justificado pela uso de vários coeficientes no modelo teórico, isto é, realizando um estudo de sensibilidade do programa à variação de k_{eq} . Se forem utilizados vários k_{eq} no modelo, pela observação das figuras a seguir apresentadas (Fig.21 / Fig.22), deduz-se que o modelo apresenta mais semelhanças aos resultados medidos experimentalmente se se considerarem diferentes coeficientes de perda de carga em diferentes instantes.

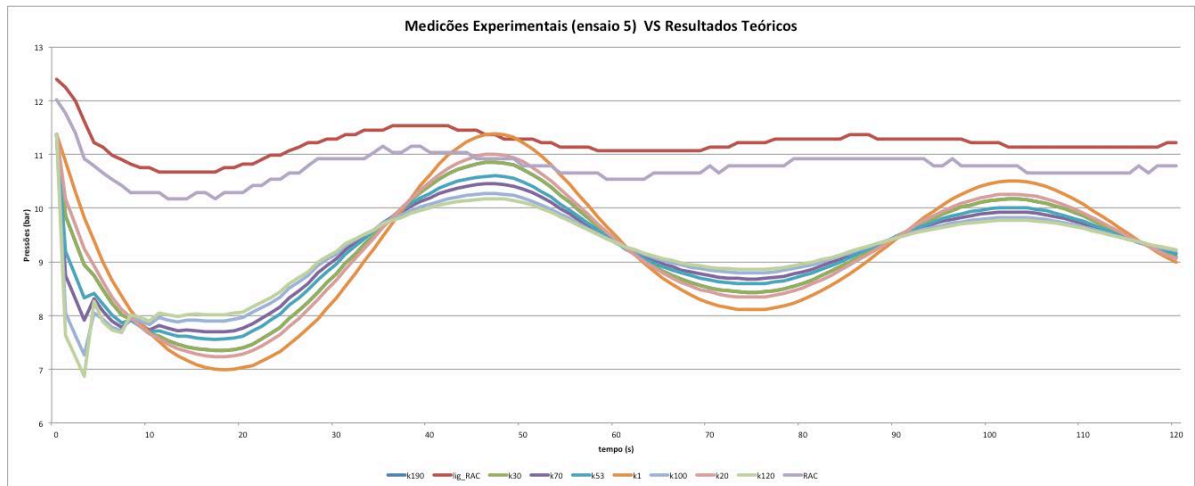


Fig.8.21 – Comparação de pressões para vários k_{eq} no modelo teórico e dados experimentais do ensaio 5

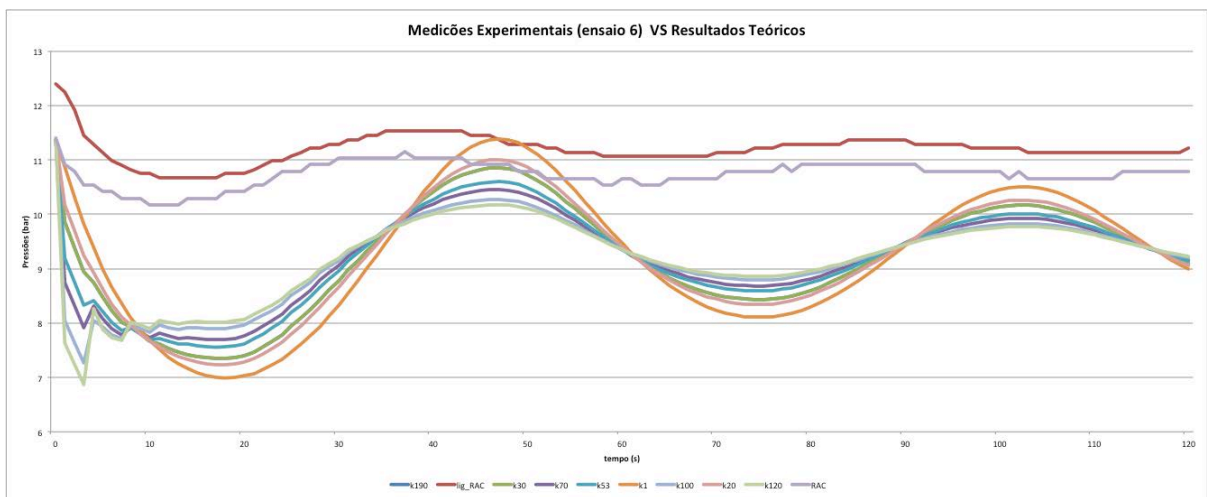


Fig.8.22 – Comparação de pressões para vários k_{eq} no modelo teórico e dados experimentais do ensaio 6

Para os vários k_{eq} utilizados conclui-se que os valores que teoricamente melhor representam o comportamento da conduta são 1 e 120 nos diferentes instantes do fenómeno.

Nos instantes iniciais do registo observações se perturbações bruscas nas pressões, atingindo valores máximos na ordem dos 7 bar.

Uma análise mais pormenorizada desse intervalo de tempo, constata-se que para valores tão elevados do coeficiente de perda de carga, a variação das pressões se assemelha às pressões na conduta de compressão, como observado na figura 8.23:

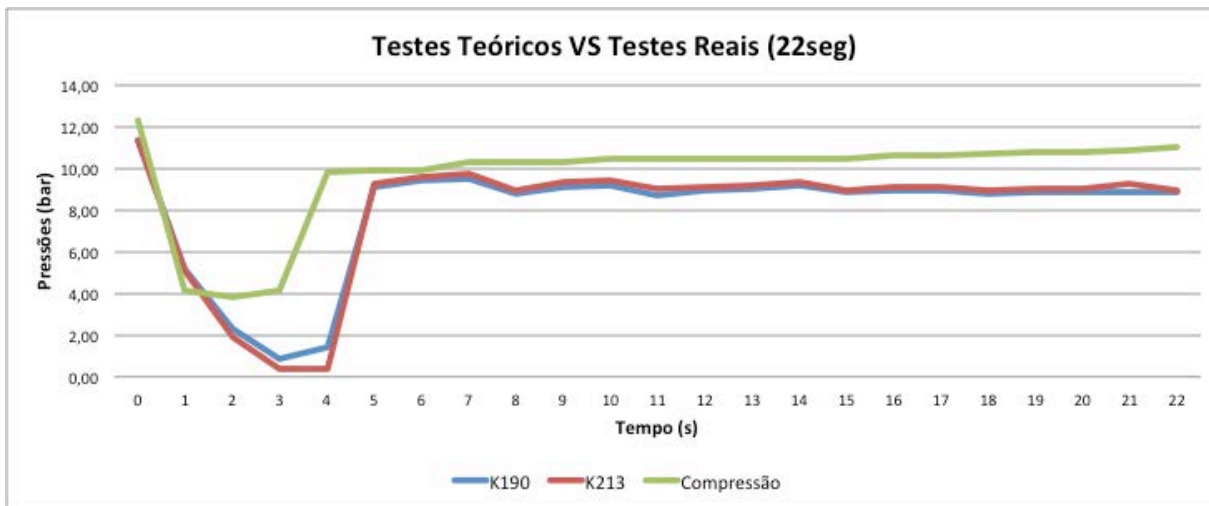


Fig.8.23 – Comparação de pressões para k_{eq} elevados no modelo teórico e medições na compressão (ensaio 5)

Tal facto significa que o RAC deixou de ser funcional, pois tal perda de carga na ligação limita ou até impede na totalidade a circulação na conduta de ligação.

8.5 SOLUÇÕES PROPOSTAS

Apesar de se verificar a funcionalidade do reservatório de ar comprimido, foi provado que a sua capacidade de resposta a subpressões durante o choque hidráulico não é nem está optimizada.

Em sequência, será apresentado neste capítulo, em jeito de sugestão, a idealização de uma solução alternativa à existente, que permita um possível melhor funcionamento e uma melhor adaptação aos modelos teóricos utilizados. Assim sendo, através desta adaptação, será possível simular o comportamento hidráulico do sistema elevatório em vários cenários de acções passíveis de acontecer durante o seu normal funcionamento, tais como o choque hidráulico, alteração da capacidade do grupo elevatório, mudança de condutas, detecção de fugas, etc.

A idealização de uma nova solução para o caso da Estação Elevatória de Barradas, tem como princípio a experiência de um diâmetro único na conduta de ligação, que verifique ser uma alternativa válida e exequível à conduta de ligação existente.

O referido teste tem como base a interpretação dos resultados extraídos do modelo teórico. Tal como no capítulo anterior, será utilizado um algoritmo do método das características escrito em Matlab[®] já utilizado neste trabalho.

Apesar da baixa adequabilidade anteriormente verificada caso específico de Barradas, este programa apresenta resultados bastante satisfatórios no caso de condutas ligação de diâmetros únicos, tal como comprovado por J.Valente [27].

É apresentada de seguida uma solução possível, cuja escolha deverá ter em consideração outros aspetos além dos frisados, tais como: considerações económicas, funcionamento hidráulico, exequibilidade e sobretudo de segurança.

- **Solução :** Conduita de ligação em DN150;

A principal valência desta solução é o facto de apenas requerer a substituição de toda a conduita de ligação, por uma conduita de aproximadamente 6 metros em DN150.

Para tal será necessária a realocação da ligação na direção do RAC, possibilitando deste o encurtamento do seu comprimento.

Esta solução tem a desvantagem de ser necessário prever um modo de possibilitar a conexão dessa conduita à conduita principal e não garante o melhor funcionamento hidráulico, uma vez que o seu traçado prevê elevações em relação ao eixo da conduita principal, tal como ilustra a seguinte figura:

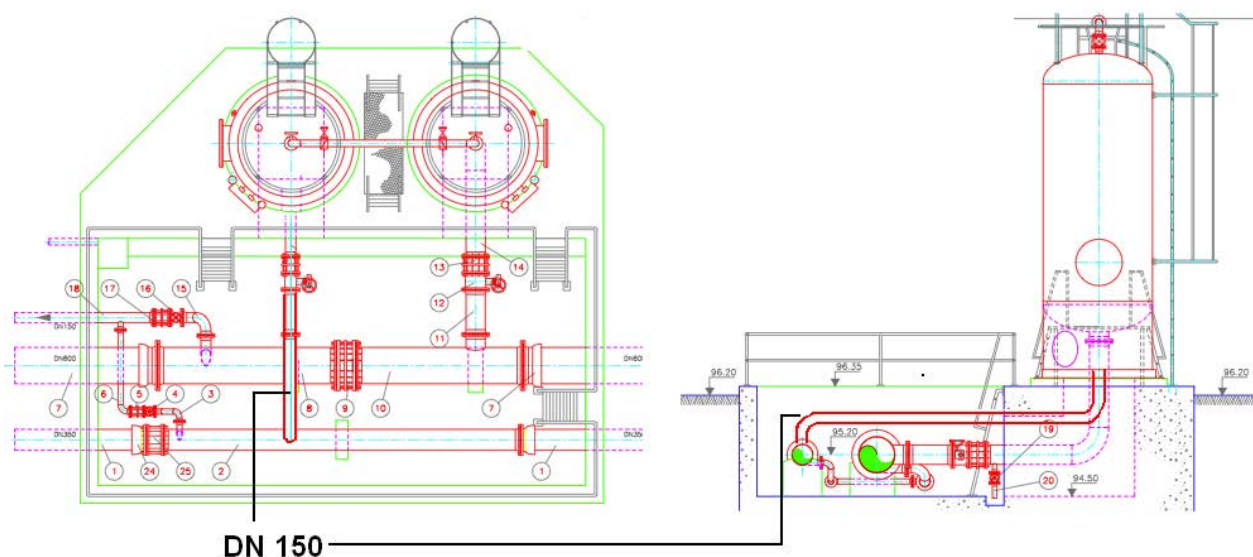


Fig. 8.24 – Solução proposta com conduita de ligação em DN150

Nesta simulação foi considerado um $K_{Loc}=1$ que teve em conta as velocidades de escoamento nos dois cotovelos de 90° .

Com a solução considerada, o algoritmo correu normalmente, originando resultados satisfatórios.

Pela figura 8.25 constata-se facilmente que os volumes de ar no RAC estabilizam no final do intervalo de tempo estudado (20 fases).

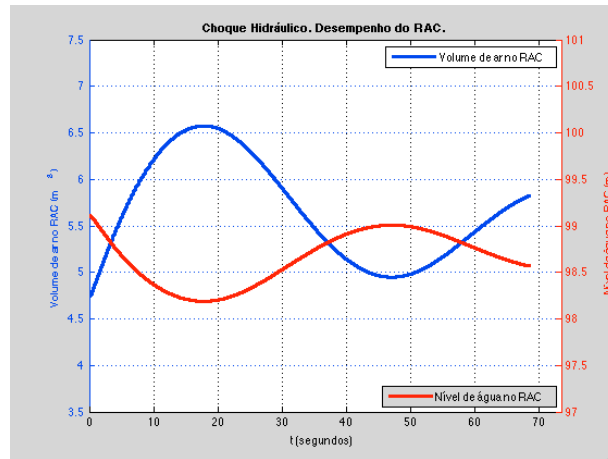


Fig. 8.25 – Variações volume de ar e nível de água no RAC com conduta de ligação em DN150

No que se refere à variação das pressões no RAC, obtiveram-se valores satisfatórios, uma vez que não se obtiveram valores de pressão muito baixos no RAC, em que a amplitude da variação de pressão é aproximadamente 3-4 bar.

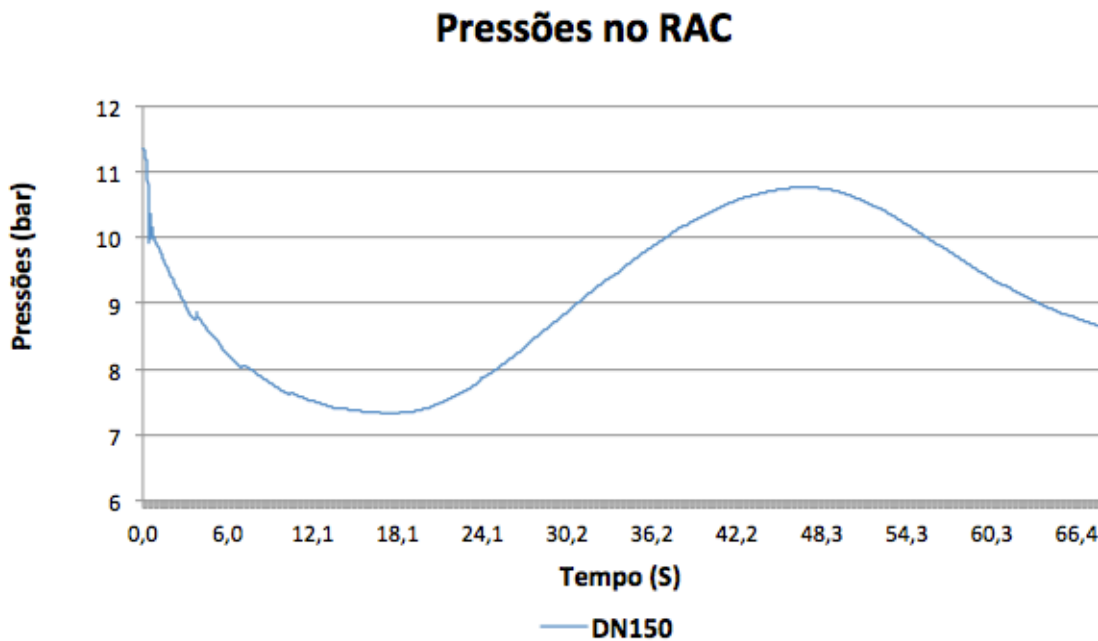


Fig.8.26 – Evolução de pressões no RAC.

Tendo em consideração o exposto anteriormente no capítulo 5.3.2, pela observação da envolvente de pressões constata-se que a manobra é lenta, o que é comprovado pelo facto da paragem da bomba se dar em aproximadamente 4,7 segundos e a fase em aproximadamente 3,4 segundos (com $a=1014,78$ m/s).

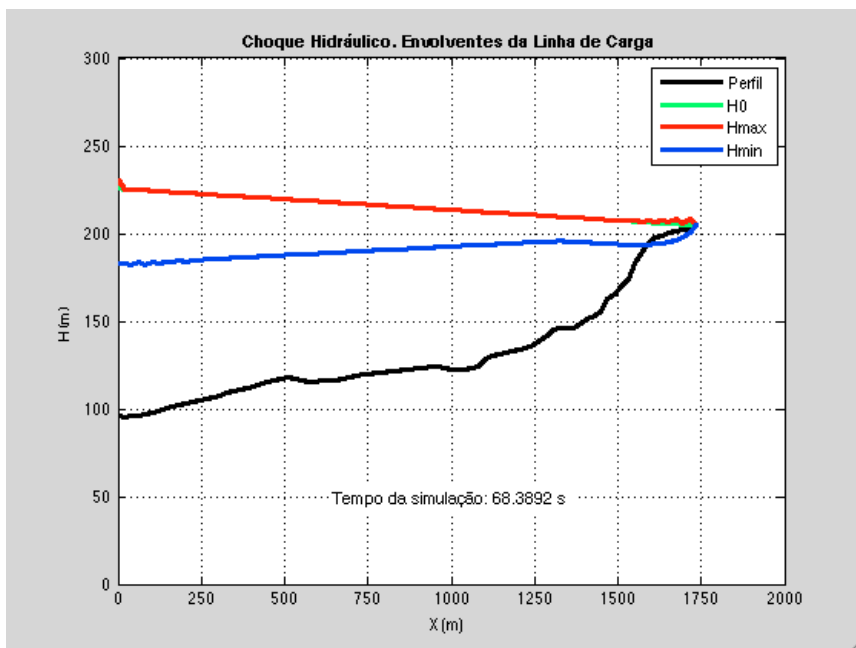


Fig. 8.27 – Envolvente de pressões na conduta elevatória com conduta de ligação ao RAC em DN150

Comparativamente à solução existente, esta solução apresenta algumas vantagens tais como:

- Maior segurança, devido ao uso de um diâmetro maior logo maior capacidade resistente;
- Menores velocidades na conduta de ligação;
- Possibilidade de modelação teórica;
- Melhor funcionamento do RAC, pois dá-se uma atenuação mais rápida do choque.

Neste estudo foi considerada também a análise de uma solução igualmente válida, que consistiu em estabelecer a ligação ao RAC através de uma conduta em DN125 de menor comprimento (cerca de 3,5m), no entanto esta solução requereria a recolocação do RAC no lado oposto do “poço de manobras”.

Esta solução não é alvo de uma análise mais detalhada, porque atendendo aos resultados obtidos, que demonstraram ser semelhantes aos da solução anterior, tornam esta solução menos vantajosa economicamente além de exigir um maior esforço para a sua execução.

Contudo, este estudo deve ser considerado apenas um estudo prévio de análise, pois deveriam ser analisadas outras soluções possíveis, bem como utilizados softwares mais completos, para que se garanta a optimização deste sistema, assegurando todas as condições de segurança exigidas.

9

CONCLUSÕES

O desenvolvimento do presente estudo permitiu concluir da especificidade e da complexidade que ocorrem na modelação do funcionamento de um reservatório de ar comprimido em que a sua ligação à conduta principal é realizada em trechos de diâmetros muito diferentes, como acontece em grande parte das aplicações práticas sem, contudo, este efeito ser devidamente considerado.

Na análise em modelo teórico, a transposição do caso de estudo para o modelo, permitiu constatar bastantes incompatibilidades, causadas, principalmente, pelos dados a inserir ou “inputs” requeridos e que se traduziram em resultados teóricos algo diferentes dos expectados.

As incompatibilidades surgiram na ligação da conduta principal ao RAC, uma vez que a conduta estudada apresenta uma solução construtiva que diverge das soluções práticas normalmente adoptadas e para as quais os métodos e modelos teóricos são habitualmente desenvolvidos e adaptados.

Apesar das diferenças entres os resultados do modelo e dos resultados correspondentes das experiências efectuadas, os métodos utilizados para estimar um possível valor para um coeficiente de perda de carga localizada equivalente e que simule cada um dos trechos da conduta de ligação, demonstraram a possibilidade de se apresentar soluções que permitiram retirar conclusões válidas neste trabalho.

O estudo desenvolvido permitiu evidenciar que o conhecimento das velocidades a cada instante na conduta principal e na conduta de ligação ao RAC são essenciais para uma análise detalhada do funcionamento do RAC. A impossibilidade prática e momentânea referente ao presente trabalho em fazer tais medições, limitou a possibilidade de estimar valores mais rigorosos das perdas de carga, mais especificamente na ligação ao RAC.

A análise e o estudo das perdas de carga nessa conduta de ligação entre conduta principal e o RAC, permitiram concluir que:

- No caso da conduta de ligação composta por dois trechos de diferentes diâmetros, o valor do coeficiente de perda de carga localizado equivalente que simula o comportamento de um desses trechos não deverá ser constante no tempo;
- É necessário um estudo mais detalhado do desenvolvimento das perdas de carga durante a ocorrência do fenómeno do choque hidráulico através do conhecimento das velocidades na conduta de ligação;
- Inadaptação dos valores teóricos de coeficientes de perda de carga consultados na bibliografia da especialidade, uma vez que apenas visa velocidades baixas comparativamente às estimadas na conduta em causa;

- A conduta de ligação desempenha um papel essencial no funcionamento eficaz de um RAC;
- Limitações do modelo teórico ao modo como são abordadas as características da ligação.

Como possível processo para a resolução do problema decorrente das perdas de carga na tubagem em DN80 e que atrás foi enunciado, recomenda-se que em trabalhos futuros se analisem situações com reservatórios de ar comprimido semelhantes e que se desenvolvam novas condições fronteira na secção do RAC que possibilitem a variação das graves perdas de carga e dos respectivos coeficientes ao longo do tempo.

A discrepância entre os valores medidos e os valores calculados pelo programa de cálculo, pode ser explicada também pela lei de paragem dos grupos elevatórios. Esta pode não estar a ser bem reproduzida no modelo, uma vez que na realidade existe uma válvula de seccionamento a jusante desta, que poderá reduzir o tempo de paragem, factor que a lei de paragem teórica da bomba não tem em consideração.

Assim, sugere-se que em trabalhos futuros se estude, de forma mais exaustiva, o modo de paragem da bomba, tendo em consideração tanto o efeito do tempo como o modo de fechamento da válvula, bem como de possíveis reservas de energia eléctrica da bomba que impeçam uma paragem da bomba mais abrupta, tal como idealizado nos ensaios realizados.

Este facto influencia o tempo de manobra da bomba, o que interfere directamente com a sobreposição das ondas de pressão e, conseqüentemente, com os valores de pressão obtidos.

Em projectos desta génese devem-se ter sempre em conta aspectos como:

- Definição do perfil da conduta;
- Quantificação das perdas de carga ao longo de toda a conduta elevatória, resultantes tanto do traçado como do modo de instalação e idade das condutas;
- Definição das curvas de funcionamento e rendimento do grupo elevatório;
- Calibração dos equipamentos de medição e armazenamento de dados e a sua capacidade de registo;
- Simplificações admitidas nos modelos teóricos.

Apesar de todas as dificuldades na modelação do RAC, verificou-se que este reduz de forma eficaz as subpressões e que durante as experiências realizadas de choque hidráulico se verificaram valores de pressões satisfatórios nos pontos de medição, atendendo às condições próprias do seu traçado.

No entanto, com a introdução de um novo equipamento de medição no segundo teste experimental efectuado, verificou-se a conduta em DN80 fica sujeita a sobrepressões e velocidades excessivas e muito gravosas que poderão comprometer a sua integridade.

Assim sendo, conclui-se que a solução adoptada e em exploração, não é a mais adequada no caso concreto do RAC de Barradas, uma vez que a contração imposta pela conduta de DN80 dificulta a passagem de caudal para a conduta principal, atenuado assim de forma menos eficaz as subpressões.

De notar que esta conduta desempenha o “papel” de tubeira, pelo que deve facilitar a passagem da água em direcção à conduta principal e dificultar no sentido oposto. Contudo, o que se constatou foi que o efeito desta contração contradiz esse princípio de funcionamento. Esse aspecto é facilmente perceptível pelo facto de no momento que a água inicia o movimento do RAC para a conduta principal devido às sobrepressões nesta, a velocidade apresenta os valores mais elevados, logo as perdas de

carga tanto localizadas como contínuas no trecho em DN80 são muito significativas, tal como demonstrado nos resultados expostos no capítulo anterior.

O funcionamento inadequado desta conduta de ligação cria eventuais incompatibilidades no escoamento unidireccional na conduta, aquando da ocorrência do choque hidráulico, pois verifica-se pela análise do gráfico e da tabela inserta no Anexo 1.3, que nesses instantes a pressão na ligação é superior à pressão no RAC, quando deveria ser inferior devido às diferenças de cota entre os medidores.

Sob a forma de conclusão, a principal resulta do facto da ligação entre a conduta e o RAC não ter sido realizada do modo mais adequado, principalmente do ponto de vista hidráulico. Com efeito, com este trabalho foi possível demonstrar que a análise do fenómeno do choque hidráulico não deve considerar apenas o RAC individualmente, mas sim tudo o que lhe está associado, nomeadamente a tubagem de ligação.

Desta forma, a regulamentação sobre este dispositivo deveria incidir também no modo como se realiza a ligação ao RAC, que em última análise deverá ser considerado como um equipamento sob pressão.

Ou seja, conclui-se que a implantação do RAC exige vários cuidados e deve ser analisado em conjunto com todos os equipamentos a ele ligados, pois em muitos casos o problema poderá não estar no reservatório propriamente dito, mas sim nos equipamentos associados, que em caso de mau funcionamento poderão acarretar vários problemas, comprometendo a segurança da conduta, do ambiente envolvente e principalmente de pessoas.

10

BIBLIOGRAFIA

- [1] Ghidaoui, M., Zhao, M., McInnis, D., Axworthy, D. *A Review of Water Hammer Theory and Practice*. Applied Mechanics Reviews, 01/2005, 49-76, ASME.
- [2] Malafaya-Baptista, M. *Choque Hidráulico – Conduitas elevatórias*. Apontamentos da disciplina Hidráulica Aplicada 2, Laboratório de Hidráulica, FEUP.
- [3] Betâmio de Almeida, A. Protecção Contra o Golpe de Aríete. In *Manual de Saneamento Básico* (Vol. 1). Ministério do Ambiente e dos Recursos Naturais - Direcção Geral dos Recursos Naturais. 1990.
- [4] Almeida, A. Regime variável em pressão – Golpe de aríete – Fundamentos teóricos e modelação matemática do golpe de aríete. In *O Golpe de Aríete em Conduitas*, 25-38, Lisboa, 1979.
- [5] Camargo, L. *O golpe de aríete em condutos. Análise pelo Método das Características*. XVI Encontro de Engenheiros de Assistência Técnica, 7-11 de Outubro de 1991, Joiville/SC.
- [6] Tijsseling, A., Lambert, M., Simpson, A., Stephens, M., Vítkovsky, J., Bergant, A. *Skalak's extended theory of water hammer*. Journal of Sound and Vibration, 11/2008, 718-728, Guest Editor.
- [7] Bonnin, J. *Hydraulique urbaine appliquée aux agglomérations de petite et moyenne importance*. Eyrolles, Paris, 1977.
- [8] Chaudry, M. H., *Applied Hydraulic Transients*. Van Nostrand Reinholds, 1987
- [9] Adamkowski, A. *Case Study: Lapino Powerplant Penstock Failure*. Journal of Hydraulic Engineering, 07/2001, 547-555, ASCE.
- [10] Cesteiro, A. *Importância da interacção fluido-estrutura no projecto de sistemas de transporte de fluidos em pressão*. Dissertação de Mestrado, IST, 2008.
- [11] Figueiredo, M. *Choque hidráulico em conduitas elevatórias – Protecção com reservatórios de ar comprimido*. Trabalho de Síntese para Provas de Aptidão Pedagógica e Capacidade Científica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1990.
- [12] Martins, J. *Comportamento Dinâmico de Sistemas Elevatórios*. Dissertação de Mestrado, FEUP, 2009.
- [13] Pacheco Figueiredo, M. M. (2007). *Escoamentos Variáveis em Pressão*. Apontamentos da disciplina de Sistemas de Abastecimento de Água do ano lectivo 2007/2008, 5º Ano da opção de Hidráulica do Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- [14] Quintela, A. *Hidráulica*. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 2005.

- [15] Marques, J., Sousa, J. *Hidráulica Urbana – Sistemas de Abastecimento de Água e de Drenagem de Águas Residuais*. Imprensa da Universidade de Coimbra, 2009.
- [16] Mays, L. W. *Water Distribution Systems Handbook*. McGraw-Hill, 2005
- [17] Koivula, T. *On cavitation in fluid power*. 1st FPNI – PhD Symp., 2000, 371-382, Hamburg.
- [18] Almeida, A. O golpe de aríete e a cavitação. In *O Golpe de Aríete em Conduitas*, 157-171, Lisboa, 1979.
- [19] Piqueiro, F. *Choque hidráulico*. Apontamentos da disciplina de Hidráulica Urbana e Ambiental do Ano Lectivo 2009/2010, 4^o Ano do Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Faculdade da Engenharia da Universidade do Porto
- [20] Stephenson, D. *Pipeline Design for Water Engineers*. Elsevier Scientific Publishing Company, New York, 1981.
- [21] *Choque hidráulico, consequências e protecções*. Apontamentos da disciplina de Hidráulica Geral, Grupo de hidráulica – Departamento de Ciências e Engenharia do Ambiente, Universidade Nova de Lisboa.
- [22] www.fargon.com.br/catalogos/reservatorio.pdf . 2011-05-30
- [23] www.Espina.es . 2011-05-30
- [24] Souza, E. *Uma Contribuição para o Pré-dimensionamento de Reservatórios hidropneumáticos para Atenuação de Transitórios Hidráulicos*, Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, 2008.
- [25] Almeida, A.B., Koelle, E. *Fluid Transients in Pipe Networks*. Elsevier Applied Science, New York, 1992.
- [26] www.adnoroeste.pt . 2011-06-09
- [27] Valente, J. *Modelação Hidráulica do Comportamento de uma fuga de água*. Dissertação de Mestrado, FEUP, 2008.
- [28] Idel'cik, I. *Memento des pertes de charge*. Eyrolles, Paris, 1979.
- [29] Lencastre, A. *Hidráulica geral*. Armando Lencastre, Lisboa, 1996.
- [30] Decreto-Lei n.º90/2010 de 22 Julho, *Regulamento de Instalação, de Funcionamento, de Reparação e de Alteração de Equipamentos sob Pressão (ESP)*, in Diário da República, 2781-2792, Lisboa, 2008
- [31] Despacho n.º1859/2003 (2.ª série), *Instrução técnica complementar para recipientes sob pressão de ar comprimido*, in Diário da República ,1437-440, Lisboa, 200

ANEXO 1

VALORES MEDIDOS EM FUNCINAMENTO NORMAL

ANEXO 1.1



Figura A.1 – Gráfico pressões em funcionamento normal Exemplo: 6 de Maio

ANEXO 1.2

Quadro A1- Valores Característicos Medições a 10 segundos de 26 Abril a 10 Maio

Valores Característicos Medições a 10 segundos de 26 Abril a 10 Maio – Funcionamento Normal														
Registo	Duração	Compressão Cerite (bar)			Ventosa (bar)			RAC Cerite (bar)			Entrada Cerite (bar)			
		Min	Máx	Méd	Min	Máx	Méd	Min	Máx	Méd	Min	Máx	Méd	
1ª FASE	1	22:58:50	8,14	14,51	11,84	-	-	-	9,68	13,36	11,57	0,15	0,29	0,25
	2	23:59:50	9,22	14,51	11,80	-	-	-	9,44	13,36	11,51	0,00	0,29	0,24
	3	11:16:50	8,04	13,53	11,64	-	-	-	9,93	12,99	11,36	0,00	0,29	0,24
2ª FASE	4	13:30:10	8,82	13,33	11,66	5,88	6,62	6,26	10,05	13,36	11,38	0,05	0,29	0,22
	5	23:59:50	8,53	14,71	11,81	5,51	6,74	6,31	9,56	12,99	11,50	0,15	0,29	0,25
	6	23:59:50	8,73	14,61	11,61	5,51	6,99	6,27	9,80	12,87	11,33	0,15	0,29	0,24
	7	23:59:50	7,84	14,61	11,70	5,76	6,99	6,28	9,68	13,11	11,39	0,15	0,29	0,24
	8	23:59:50	7,94	13,53	11,83	5,51	6,74	6,31	9,68	13,36	11,53	0,10	0,29	0,24
	9	23:59:50	8,82	13,73	11,70	5,76	6,99	6,27	9,80	12,99	11,38	0,10	0,29	0,23
	10	23:59:50	8,53	14,61	11,59	5,88	6,62	6,26	9,44	13,11	11,31	0,10	0,29	0,24
	11	23:03:50	8,63	14,22	11,77	5,88	6,86	6,30	9,80	12,75	11,44	0,15	0,29	0,24
	12	09:39:30	8,63	14,61	11,60	5,64	6,74	6,27	9,56	12,50	11,30	0,20	0,29	0,24

ANEXO 2

RESULTADOS EXPERIMENTAIS ENSAIO 1

ANEXO 2.1

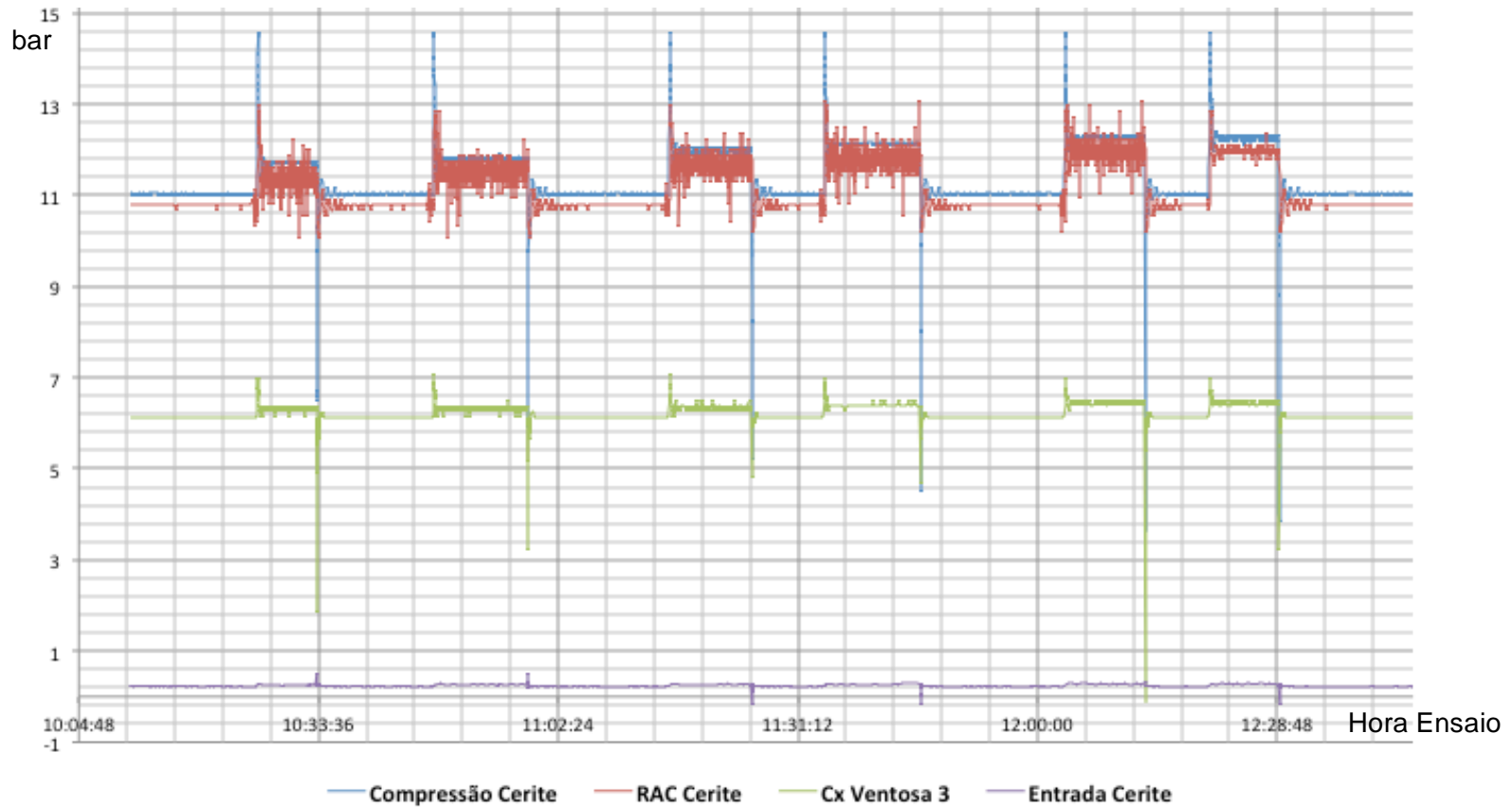


Figura A.2 – Gráfico pressões do ensaio experimental 1

ANEXO 2.2

Quadro A2- Valores Característicos Medições Cenário de Pressões -- Teste Experimental 1

Ensaio	Fases	Duração	Compressão Cerite (bar)			RAC Cerite (bar)			Ventosa (bar)			Entrada Cerite (bar)		
			Min	Max	Média	Min	Max	Média	Min	Max	Média	Min	Max	Média
1	Início	0:15:21	10,98	11,08	11,07	10,29	11,15	10,78	6,13	6,13	6,13	0,20	0,25	0,20
	A	0:00:17	11,47	14,61	13,21	10,42	12,99	12,02	6,13	6,99	6,62	0,20	0,29	0,26
	B	0:06:50	11,27	11,86	11,68	10,05	12,25	11,36	6,13	6,37	6,30	0,20	0,29	0,25
	C	0:00:02	6,47	6,76	6,60	10,78	11,40	11,07	1,84	6,25	4,70	0,25	0,54	0,35
	D	0:13:55	9,80	11,37	11,05	10,05	11,27	10,76	4,90	6,25	6,13	0,20	0,34	0,20
2	A	0:00:16	11,76	14,61	13,21	11,76	12,87	12,01	6,25	7,11	6,63	0,20	0,29	0,25
	B	0:11:05	11,37	11,96	11,82	10,05	12,87	11,49	6,13	6,50	6,32	0,20	0,29	0,25
	C	0:00:02	5,88	6,37	6,11	10,91	11,40	11,15	3,19	6,37	5,19	0,25	0,54	0,35
	D	0:16:53	9,80	11,37	11,05	10,05	11,27	10,77	5,15	6,25	6,13	0,15	0,34	0,20
3	A	0:00:18	11,18	14,61	13,15	10,78	12,99	12,06	6,13	7,11	6,61	0,20	0,29	0,26
	B	0:09:36	11,57	12,16	11,95	10,29	12,38	11,63	6,13	6,50	6,35	0,25	0,29	0,26
	C	0:00:03	5,20	8,73	6,94	10,78	11,76	11,30	4,78	6,37	5,79	-0,20	0,29	0,11
	D	0:08:38	9,71	11,37	11,04	10,17	11,15	10,76	5,88	6,25	6,13	0,10	0,29	0,20
4	A	0:00:20	11,57	14,61	13,18	10,54	13,11	12,08	6,13	6,99	6,61	0,20	0,29	0,27
	B	0:11:14	10,69	12,25	12,14	10,54	13,11	11,78	6,25	6,50	6,37	0,25	0,29	0,26
	C	0:00:02	4,51	8,04	5,78	10,91	11,64	11,27	4,66	6,00	5,35	-0,20	0,25	0,03
	D	0:17:13	9,90	11,37	11,06	10,17	11,15	10,77	5,64	6,37	6,13	0,15	0,29	0,20

5	A	0:00:19	11,37	14,61	13,30	10,42	12,99	12,13	6,13	6,99	6,64	0,20	0,29	0,26
	B	0:09:19	11,96	12,55	12,26	10,91	13,11	11,95	6,25	6,50	6,40	0,25	0,29	0,27
	C	0:00:02	3,63	5,49	4,38	11,15	12,01	11,56	-0,12	6,37	4,08	0,25	0,34	0,29
	D	0:07:38	9,80	11,37	11,03	10,17	11,15	10,76	5,39	6,25	6,13	0,20	0,34	0,20
6	A	0:00:19	11,57	14,61	13,33	10,66	12,87	12,15	6,13	6,99	6,64	0,20	0,29	0,26
	B	0:08:04	11,96	12,65	12,25	11,64	12,62	11,95	6,37	6,50	6,39	0,25	0,29	0,27
	C	0:00:03	3,82	8,82	6,20	10,91	12,01	11,52	3,19	6,37	5,27	-0,20	0,29	0,12
	D	0:16:37	9,90	11,37	11,05	10,17	11,15	10,77	5,76	6,25	6,13	0,15	0,29	0,20

ANEXO 3

RESULTADOS EXPERIMENTAIS ENSAIO 2

ANEXO 3.1

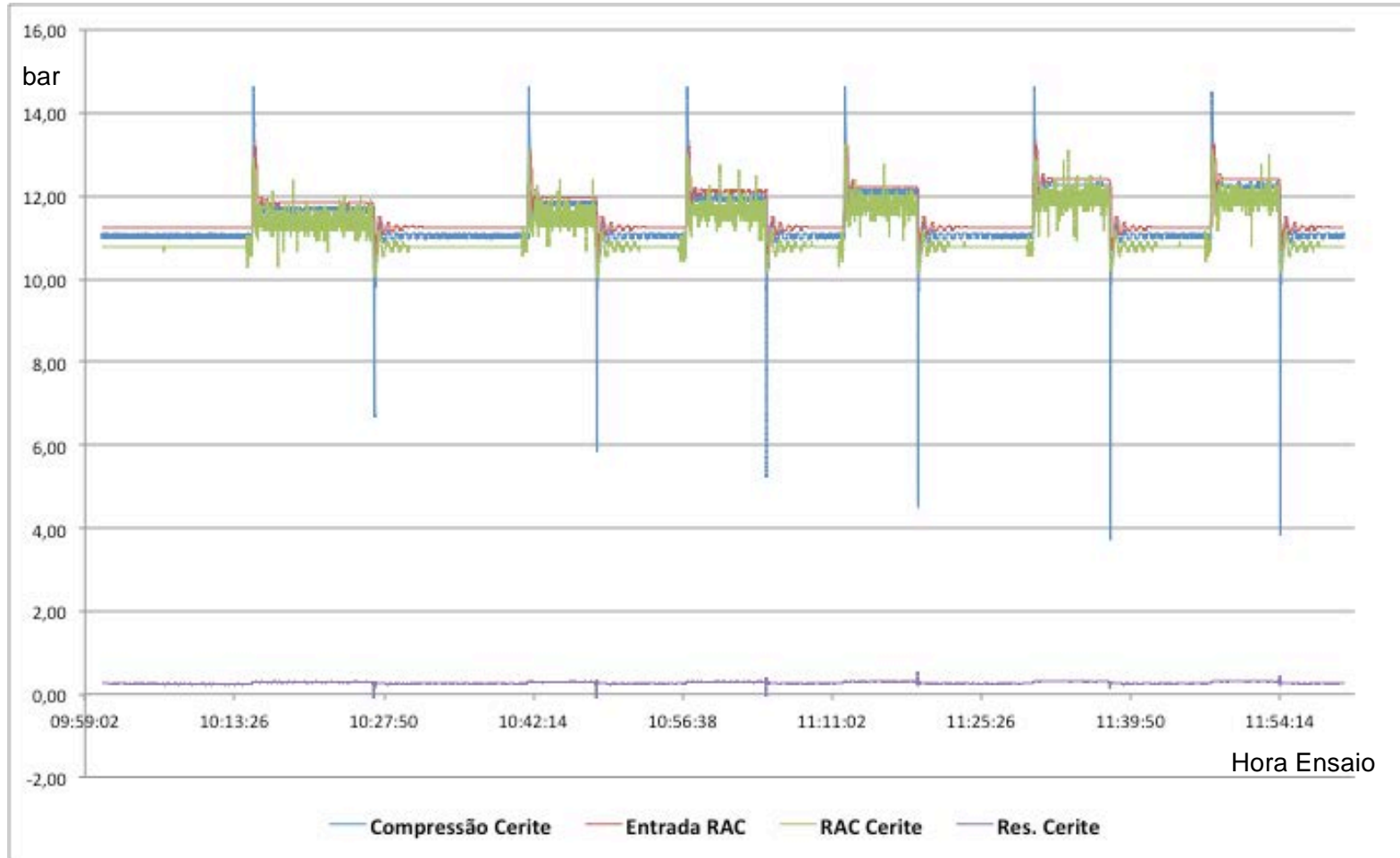


Figura A.3 – Gráfico pressões do ensaio experimental 2

ANEXO 3.2

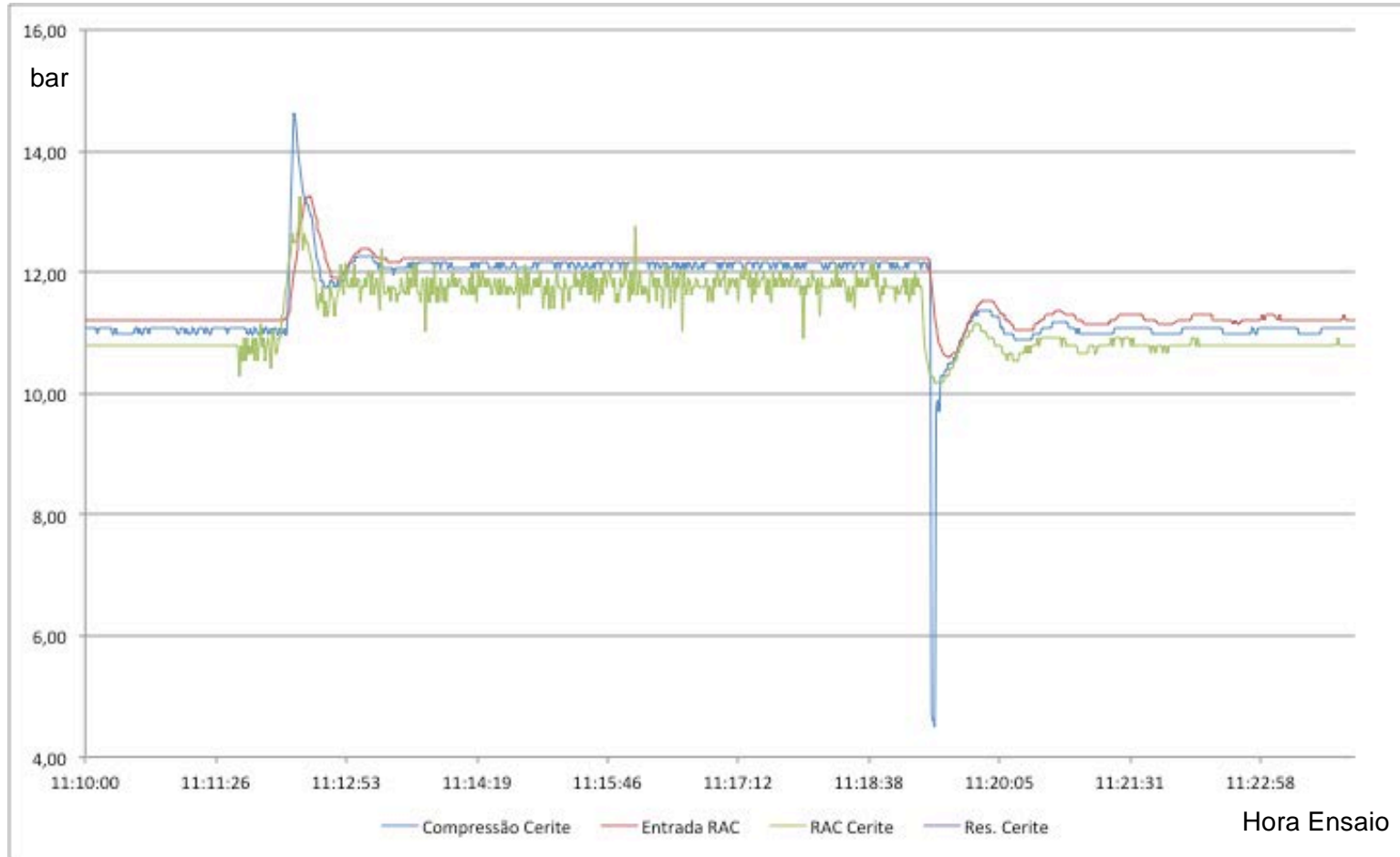


Figura A.4 – Gráfico de pormenor de pressões do ensaio experimental 2 – Exemplo para 600m³/h

ANEXO 3.2

Quadro A3- Valores Característicos Medições Cenário de Pressões -- Teste Experimental 2

Ensaio	Fases	Duração	Compressão Cerite (bar)			Entrada RAC (bar)			RAC Cerite (bar)			Ventosa (bar)			Entrada Cerite (bar)		
			Min	Máx	Média	Min	Máx	Média	Min	Máx	Média	Min	Max	Média	Min	Max	Média
Início	Parado	00:14:36	10,98	11,08	11,05	11,22	11,22	11,22	10,29	11,89	10,78	6,13	6,13	6,13	0,20	0,25	0,24
1	A	00:00:19	11,27	14,61	13,14	11,29	13,18	12,55	11,15	12,87	12,22	6,13	6,99	6,61	0,25	0,29	0,28
	B	00:11:21	11,27	11,86	11,67	11,53	12,55	11,84	10,29	12,38	11,37	6,13	6,37	6,26	-0,10	0,29	0,27
	C	00:00:02	6,67	6,96	6,80	11,14	11,69	11,40	10,17	10,17	10,17	2,70	6,25	4,98	0,10	0,29	0,21
	D	00:14:47	9,80	11,37	11,04	10,51	11,53	11,22	10,05	11,76	10,78	5,02	6,25	6,13	0,15	0,29	0,25
2	A	00:00:16	11,47	14,61	13,18	11,29	13,10	12,46	11,40	13,11	12,17	6,13	6,99	6,20	-0,10	0,34	0,26
	B	00:06:19	11,37	12,06	11,79	11,61	12,63	11,95	10,29	12,38	11,47	6,13	6,50	6,19	-0,10	0,34	0,26
	C	00:00:02	5,88	6,18	6,05	11,14	11,69	11,43	10,17	10,29	10,21	2,94	6,25	5,11	0,10	0,34	0,21
	D	00:08:36	9,61	11,47	11,03	10,51	11,53	11,21	10,05	12,13	10,78	5,15	6,25	6,12	0,20	0,25	0,25
3	A	00:00:18	11,86	14,61	13,17	11,45	13,18	12,61	11,27	12,99	12,33	6,25	7,11	6,59	0,25	0,29	0,29
	B	00:07:21	11,57	11,86	11,67	11,76	12,47	12,09	10,29	12,75	11,62	6,25	6,50	6,33	-0,05	0,39	0,28
	C	00:00:02	5,20	10,78	9,53	11,22	11,84	11,50	10,17	10,29	10,25	3,55	6,37	5,31	0,20	0,29	0,25
	D	00:07:28	9,71	10,98	10,41	10,59	11,53	11,21	10,17	12,01	10,78	5,27	6,37	6,13	0,20	0,29	0,25
4	A	00:00:20	12,16	14,61	13,31	11,37	13,25	12,66	11,40	13,24	12,31	6,25	6,99	6,60	0,25	0,29	0,29
	B	00:06:43	11,76	12,06	11,84	11,92	12,55	12,23	10,29	12,75	11,76	6,25	6,50	6,37	0,25	0,54	0,29
	C	00:00:02	4,51	10,78	9,44	11,22	11,84	11,53	10,17	10,29	10,25	3,80	6,00	4,86	0,20	0,25	0,23

	D	00:11:06	9,71	10,98	10,44	10,59	11,53	11,21	10,17	11,89	10,78	5,27	6,25	6,13	0,20	0,29	0,25
5	A	00:00:23	12,16	14,61	13,16	11,37	13,25	12,70	11,64	12,87	12,36	6,37	6,99	6,57	0,25	0,29	0,29
	B	00:06:57	11,96	12,45	12,24	12,08	12,55	12,38	10,54	13,11	11,93	6,25	6,50	6,38	0,15	0,29	0,29
	C	00:00:03	3,73	9,71	6,11	11,22	12,24	11,77	10,29	10,42	10,32	1,84	6,37	4,90	0,15	0,29	0,25
	D	00:09:41	9,90	11,96	11,04	10,67	11,53	11,21	10,17	12,13	10,78	5,76	6,37	6,13	0,20	0,25	0,25
6	A	00:00:22	12,35	14,51	13,27	11,53	13,25	12,78	11,64	13,11	12,49	6,37	6,99	6,59	0,25	0,29	0,29
	B	00:06:14	11,96	12,35	12,24	12,16	12,63	12,39	10,42	12,99	11,92	6,25	6,50	6,38	0,20	0,44	0,29
	C	00:00:02	3,82	4,12	4,02	11,29	11,92	11,55	10,29	10,42	10,36	3,80	6,13	4,62	0,25	0,29	0,26
	D	00:06:10	9,80	11,37	11,03	10,67	11,53	11,21	10,17	11,15	10,77	5,76	6,25	6,13	0,20	0,25	0,25

ANEXO 4

PERDAS DE CARGA NA TUBAGEM DE LIGAÇÃO

ANEXO 4.1

Quadro A4 – Caudais e perdas de carga medidas

Caudais e Perdas de carga contínuas medidas			
Q (m ³ /h)	Q (m ³ /s)	Q ² (m ³ /s)	$\Delta H_{real}(m)$
650	0,181	0,033	78,1
600	0,167	0,028	70,5
550	0,153	0,023	61,5
500	0,139	0,019	55,0
450	0,125	0,016	46,0

Quadro A5 – Caudais e perdas de carga teóricas

Caudais e Perdas de carga contínuas teóricas			
Q (m ³ /h)	Q (m ³ /s)	Q ² (m ³ /s)	ΔH_{DN80} (m)
50	0,01389	0,00019	0,449686612
80	0,02222	0,00049	1,11798339
110	0,03056	0,00093	2,082893876
140	0,03889	0,00151	3,344242471
170	0,04722	0,00223	4,901965244
200	0,05556	0,00309	6,756033259
230	0,06389	0,00408	8,906431495
260	0,07222	0,00522	11,35315138
290	0,08056	0,00649	14,09618765
320	0,08889	0,00790	17,1355369
350	0,09722	0,00945	20,47119685
380	0,10556	0,01114	24,10316588
410	0,11389	0,01297	28,03144283
440	0,12222	0,01494	32,25602685
470	0,13056	0,01704	36,77691728
500	0,13889	0,01929	41,59411362
530	0,14722	0,02167	46,7076155
560	0,15556	0,02420	52,1174226
590	0,16389	0,02686	57,82353466

