

APLICAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DA BOMBA DE ARIETE PARA ELEVAÇÃO DE ÁGUA EM MEIOS RURAIS DE TIMOR-LESTE

ALFREDO FERREIRA

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

Orientador: Professora Doutora Cristina Maria Monteiro dos Santos

Coorientador: Professor Doutor Paulo Jorge Rosa Santos

JULHO DE 2016

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2015/2016

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

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

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

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

A Minha Mamai e os meus Filhos, as Famílias e os Amigos

*A educação é a arma mais poderosa que você pode usar para mudar o mundo
(Education is the most powerful weapon which you can use to change the world)*

Nelson Mandela

AGRADECIMENTOS

Graças a Deus, eu oro a Deus Todo-Poderoso, por Sua bênção e graça, ter-me dado a vida e a oportunidade de poder chegar até aqui e poder terminar esta dissertação.

Esta dissertação é submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de mestre em engenharia civil - especialização em hidráulica, recursos hídricos e ambiente. Sem a ajuda e a orientação de várias pessoas teria sido muito difícil ultrapassar esta etapa, sendo de destacar: as aulas regulares, as sessões tutoriais e o trabalho realizado em laboratório. Portanto, por tudo isso gostaria de agradecer:

Aos meus tutores e orientadores da dissertação, a Professora Cristina Maria Monteiro Santos e o Professor Paulo Jorge Rosa Santos, o meu sincero agradecimento por todo o tempo despendido na resolução dos problemas que foram surgindo, assim como por todo o esforço dedicação e paciência, quer no acompanhamento durante as sessões tutoriais, quer no período da dissertação, e também, especialmente, por todos os conhecimentos transmitidos no decurso deste trabalho. Serão certamente duas das minhas maiores referências que espero levar para a vida profissional, principalmente devido ao seu profissionalismo e dedicação.

Ao Professor Francisco de Almeida Taveira Pinto, diretor da Secção de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente (SHRHA), o Professor António Abel Henriques, diretor do curso de Mestrado Integrado em Engenharia Civil (MIEC), o Professor António José de Magalhães Silva Cardoso, diretor do Departamento de Engenharia Civil (DEC), o Professor Manuel António de Matos Fernandes e em geral, aos professores do Departamento de Engenharia Civil, aos todos os serviços de secretariado do DEC, o meu agradecimento pela sua disponibilidade e paciência para me atenderem quando me surgiam dúvidas nas diversas etapas da minha formação em Portugal que culminou nesta dissertação, mesmo em situações de maior sobrecarga de trabalho.

Ao Sr. Miguel Guerra, técnico do Laboratório de Hidráulica da SHRHA, agradeço a ajuda e dedicação durante a fase de realização dos testes em laboratório.

À D. Esmeralda Miguel e à D. Joana Monteiro pela força e por estarem sempre prontas a ajudar em todos os momentos em que eu precisei. Por tudo isso um grande obrigado.

À restante família pelo apoio incondicional e a todos os amigos que, de longe ou de perto, estão sempre presentes. Uma alusão em particular àqueles que partilharam comigo as vivências da vida académica e que a partir de agora, terminado este trabalho, partilharão muitas mais. Aos 4sekawan e, especialmente a minha mamai e filhos, agradeço todo o apoio e coragem.

RESUMO

A bomba de ariete ou carneiro hidráulico é uma bomba simples que funciona sem necessidade de energia elétrica, usando apenas a “força” de água que uma válvula modificada (válvula de escape) provoca quando fecha e abre repentinamente. Este modo de operação da válvula induz um transitório hidráulico, designado choque hidráulico, que permite a elevação da água até uma cota superior à da sua captação.

A presente dissertação visou o estudo do funcionamento de uma bomba de ariete em diferentes condições de aplicação, assim como a análise da influência de algumas variáveis relevantes no seu desempenho hidráulico, tendo em vista a sua aplicação num caso de estudo em Timor-Leste.

Este trabalho teve início com a conceção, construção e operação de um modelo experimental de uma bomba de ariete no Laboratório de Hidráulica da Secção de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal. O modelo foi testado para um desnível (constante) de 1,0 m entre a fonte de alimentação e a bomba de ariete, e para alturas de elevação variáveis entre 4,0 e 8,0 m. Foi também estudada a influência da rigidez da conduta de alimentação no funcionamento da bomba de ariete, através da utilização de duas condutas fabricadas com materiais diferentes (aço galvanizado e PVC), bem como do tamanho e da geometria da câmara (ou reservatório) de ar comprimido no desempenho do dispositivo. Os melhores resultados foram obtidos para uma altura de elevação de 4.0 m e para a conduta de alimentação fabricada em aço, tendo-se conseguido um caudal de elevação igual a 1,995 L/min e um caudal de descarga de 12,73 L/min, para aproximadamente 60 batidas por minuto. Para este caso obteve-se um rendimento de D'Alisson igual a 60 %, que diminuiu até 53 % com o aumento da altura de elevação para 8.0 m.

O projeto de aplicação do dispositivo em Timor-Leste foi realizado com base nas conclusões e nos resultados obtidos no trabalho experimental e em dados de campo, tendo-se preconizado para a bomba de ariete um tubo de alimentação fabricado em aço galvanizado com um diâmetro de 50 mm, uma altura de alimentação de 10 m e um diâmetro da bomba de 100 mm, entre outras características. Estima-se que o caudal elevado no local em estudo seja, em média, 4,31 L/min para um rendimento de cerca de 60 %.

PALAVRAS-CHAVE: Carneiro hidráulico, bomba de ariete, sistemas de elevação, choque hidráulico, energias alternativas.

ABSTRACT

The ram pump or hydraulic ram is a pump that works without electricity, using only the “force” of the water that a modified valve (impulse valve) creates when it suddenly closes and opens. The mode of operation of this valve induces a hydraulic transient known as water hammer that allows pumping the water to an elevation much higher than the catchment site.

This dissertation aimed to study the operation of a ram pump in different application conditions, as well as the analysis of the influence of some relevant variables in its hydraulic performance, bearing in mind their application in a case-study located in Timor-Leste.

This work started with the design, construction and operation of an experimental model of a ram pump in the Hydraulic Laboratory of the Hydraulics, Water Resources and Environment Division of the Faculty of Engineering of the University of Porto, Portugal. The model was tested for a constant supply head of 1.0 m (difference in elevation between the catchment reservoir and the ram pump) and variable pumping heights (between 4.0 and 8.0 m). The influence of the drive pipe stiffness in the ram pump operation was tested by using two different materials (galvanized steel and PVC). The effect of the size and geometry of the compressed air chamber (or reservoir) was also studied. The best results were obtained for the steel drive pipe and a deliver head of 4.0 m: a flow rate of 1.995 L/min and a discharge flow rate of 12.73 L/min for approximately 60 beats per minute. The D' Aubusson efficiency was 60% for that set-up, decreasing to 53% as the deliver height increases to 8.0 m.

The design of the ram pump for the case-study in East-Timor was based on the conclusions and the results obtained in the experimental work as well as in field data. The main characteristics of the system proposed are: a galvanized steel drive pipe with a diameter of 50 mm, a supply head of 10 m and a pump diameter of 100 mm. An average flow rate of 4.313 L/min is estimated for this project, which yields an efficiency of about 60%.

KEYWORDS: hydraulic ram, ram pump, pumping systems, water hammer, alternative energy.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO DO TEMA	1
1.2. OBJETIVOS	1
1.3. ESTRUTURA DA TESE	1
2. BOMBA DE ARIETE	3
2.1. INTRODUÇÃO	3
2.2. EVOLUÇÃO HISTÓRICA	3
2.3. INSTALAÇÃO	5
2.3.1. RESERVATÓRIO DE ALIMENTAÇÃO	6
2.3.2. CONDUTA DE ALIMENTAÇÃO	6
2.3.3. CONDUTA DE ELEVAÇÃO	8
2.3.4. CORPO DA BOMBA DE ARIETE	8
2.3.5. VÁLVULA DE ESCAPE	ERRO! MARCADOR NÃO DEFINIDO.
2.3.6. VÁLVULA DE ADMISSÃO	9
2.3.7. RESERVATÓRIO DE AR COMPRIMIDO, RAC	10
2.3.8. VENTILAÇÃO DE ADMISSÃO DE AR (AIR VALVE)	10
2.4. COMPONENTES E FUNCIONAMENTO DA BOMBA	10
2.5. CARATERÍSTICAS DO FUNCIONAMENTO	13
2.5.1. PERDAS DE CARGA	13
2.5.2. CHOQUE HIDRÁULICO (GOLPE DE ARIETE)	15
2.5.2.1. Primeiro Período (1º fase)	19
2.5.2.2. Segundo Período (2º fase)	22
2.5.2.3. Terceiro Período (3º fase)	22
2.5.2.4. Quarto Período (4º fase)	24
2.5.2.5. Ciclo Completo de Funcionamento	24
2.6. ENERGIA E RENDIMENTO	25
3. TRABALHO EXPERIMENTAL	27
3.1. PLANEAMENTO DO TRABALHO	27

3.2. MONTAGEM DO MODELO	27
3.3. PLANO DA INSTALAÇÃO DO SISTEMA	29
3.4. VARIAÇÃO DO RESERVATÓRIO DE AR COMPRIMIDO, RAC	30
3.5. PROCEDIMENTO DE TESTE	31
4. ANÁLISE DE RESULTADOS	33
4.1. CONDUTA DE ALIMENTAÇÃO	33
4.2. ESTUDO DA RELAÇÃO ENTRE O CHOQUE HIDRÁULICO E A PRESSÃO NO ESCOAMENTO	35
4.2.1. CONDUTA EM PVC.....	35
4.2.2. CONDUTA EM AÇO GALVANIZADO	35
4.3. VÁLVULA DE ESCAPE E NÚMERO DE BATIDAS	36
4.4. RESERVATÓRIO DE AR COMPRIMIDO	37
4.4.1. RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	37
4.4.2. COMPARAÇÃO COM RAC RECOMENDADOS NA BIBLIOGRAFIA.....	39
4.5. RENDIMENTO	40
5. PROJETO DE APLICAÇÃO DA BOMBA DE ARIETE NO SUCO TUTUALA	41
5.1. INFORMAÇÕES GERAIS SOBRE O SUCO TUTUALA	41
5.2. LOCAL DO PROJETO E OS DADOS PARA DIMENSIONAMENTO	42
5.3. DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA	43
5.3.1. CRITÉRIOS DE DIMENSIONAMENTO.....	43
5.3.2. AS GRANDEZAS DE LABORATÓRIO E AS GRANDEZAS DE PROJETO	44
5.3.3. CONDUTA DE ELEVAÇÃO	45
5.3.4. CONDUTA DE ALIMENTAÇÃO E CAPACIDADE DA BOMBA.....	45
5.3.5. ARMAZENAMENTO.....	47
5.4. TAREFAS E CUSTOS DA INSTALAÇÃO	48
5.5. MONTAGEM, MONITORIZAÇÃO E MANUTENÇÃO	49
6. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	51
6.1. CONCLUSÕES	51
6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	52
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53
ANEXOS	55

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – “Pulsating machine” criada por John Whitehurst (Irlanda, 1772) [2]	3
Figura 2.2 – Tipo de carneiro hidráulico por Montgolfier (França, 1796) [2] [3]	4
Figura 2.3 – “Tipo do carneiro hidráulico melhorou-o por Montgolfier [3]	4
Figura 2.4 – Alguns tipos de carneiro hidráulico moderno nas comerciais [4], [5], [6], [7], [8]	5
Figura 2.5 – Exemplo de uma bomba de ariete [9]	5
Figura 2.6 – Exemplo uma sistema da bomba de ariete em paralelo e em serie [2].....	6
Figura 2.7 – Comparação da pressão máxima devida ao choque hidráulico com diferentes materiais e várias espessuras da parede do tubo de alimentação [11]	7
Figura 2.8 – Exemplos de válvulas de escape ou impulsão. [11],	9
Figura 2.9 – Exemplos de valvulas de admissão.	9
Figura 2.10 – Exemplo ventilação de ar [11].....	10
Figura 2.11 – Um esquema geral dos componentes da bomba de ariete [16].	11
Figura 2.12 – Funcionamento da 1ª fase [16].	11
Figura 2.13 – Funcionamento da 2ª fase. [16]	12
Figura 2.14 – Funcionamento da 3ª fase. [16]	12
Figura 2.15 – Funcionamento da 4ª fase [16].	13
Figura 2.16 – Representação do efeito do choque hidráulico [18].	16
Figura 2.17 – Instalação típica em funcionamento [19]	18
Figura 2.18 – Variação de velocidade longo do tempo na conduta de alimentação. [19]	18
Figura 3.1 – Montagem da bomba de ariete modelo baseando em [20].	28
Figura 3.2 – Esquema da instalação.....	29
Figura 3.4 – Fotografia da instalação do modelo no Laboratório de Hidráulica da SHRHA-FEUP	30
Figura 3.5 – Grupos de RAC.....	31
Figura 3.6 – Fotografias de experimento	32
Figura 4.1 – Fotografia e esquema da instalação.....	33
Figura 4.2 – Caudais de elevação em função da altura de elevação, para conduta de alimentação em PVC e em aço galvanizado	34
Figura 4.3 – Variação do caudal elevado com o número de batidas (conduta de alimentação em aço Galvanizado).	36
Figura 4.4 – Variação do caudal elevado com o número de batidas (conduta de alimentação em PVC).	37
Figura 4.5 – Primeiro grupo de RAC e caudal de elevação.....	37
Figura 4.6 – Segundo grupo de RAC e caudal de elevação.....	38
Figura 4.7 – Terceiro grupo de RAC e caudal de elevação	38
Figura 4.8 – Quarto grupo de RAC e caudal de elevação	39
Figura 5.1 – Localização do local de aplicação	41

Figura 5.2 – Local do projeto.....	42
Figura 5.3 – Perfil global da rede	43
Figura 5.4 – Tipo da bomba dimensionado.....	47
Figura 5.5 – Regularização de transporte [quadro de computação em anexo].....	48

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Vários das capacidades da bomba de ariete [11] (Watt 1975)	8
Quadro 2.2 – Valores de rugosidade dos tubos, k . [13].....	15
Quadro 2.3 – Coeficiente de perdas de carga localizadas ($D=25$ mm) [10]	15
Quadro 2.4 – Valores do módulo de elasticidade, E , dos materiais das condutas [13].....	17
Quadro 2.5 – Valores dos coeficientes de Poisson, ν [13]	17
Quadro 4.1 – Perdas de carga e energia de pressão na conduta de alimentação em PVC	34
Quadro 4.2 – Perdas de carga e energia de pressão na conduta de alimentação em Aço	34
Quadro 4.3 – Características do choque hidráulico e pressões na conduta de alimentação em PVC	35
Quadro 4.4 – Características do choque hidráulico e pressões na conduta de alimentação em aço galvanizado	36
Quadro 4.5 – Rendimento da bomba de ariete	40
Quadro 5.1 – Altura de elevação, h_b	45
Quadro 5.2 – Altura de alimentação efetiva, H_b e caudal de alimentação	46
Quadro 5.3 – Custos da construção do sistema	48
Quadro 5.4 – Registo de falhas e possíveis soluções [21]	49

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

A – Área de secção

a – Celeridade

Av. – Área de secção da válvula

d – Diâmetro do tubo de alimentação

D – Diâmetro do tubo de elevação

D_b – Diâmetro da bomba

e – Espessura do tubo

E – Módulo de elasticidade

F_D – Pressão relativa

g – Aceleração gravítica

H – Altura de alimentação

h – Altura de elevação

H_b – Altura da energia de alimentação efetivo

h_b – Altura de elevação efetivo

J – Perda de carga unitária

K – Coeficiente de perda de carga localizada

k – Coeficiente de rugosidade da conduta

L_A – Comprimento da conduta de alimentação

L_E – Comprimento da conduta de elevação

Q – Caudal de alimentação

q – Caudal de elevação

Q_D – caudal de descarga

q_r – Caudal de elevação requisito

T – Tempo de ciclo

U – Velocidade média do escoamento

V – Volume

V_{ar} – Volume de armazenamento

Z – Cota em relação a um dado plano horizontal de referência

γ – Peso volúmico da água

Δh – Desnível entre altura de alimentação e elevação

ΔH – Altura de choque hidráulico

ΔH_c – Perdas de carga continua

- ΔH_L – Perdas de carga localizadas
- ε – Módulo de elasticidade da água
- η – Rendimento
- η_C – Rendimento de fabricantes
- η_D – Rendimento de D'Aubuisse
- η_R – Rendimento de Rankine
- λ – Coeficiente de atrito ou de Darcy-Weisbach
- ν – Viscosidade cinemática
- T_f – Tempo de fase
- ρ – Densidade do fluido (água)
- h_f – total das perdas de carga na conduta
- N – número das batidas por minute
- RAC – Reservatório de ar comprimido
- PVC – Policloreto de polivinila “**Polyvinyl chloride**”
- PEAD – Polietileno Alta Densidade

ÍNDICE DE ANEXOS

A - 1. FOTOGRAFIAS DO TRABALHO EXPERIMENTAL REALIZADO NO LABORATÓRIO DE HIDRÁULICA DA FEUP	55
A - 2. DADOS E RESULTADOS DO TRABALHO EXPERIMENTAL	56
A - 3. MATERIAIS E FERRAMENTAS.....	57
A - 4. CALCULO CAPACIDADE DE ARMAZENAMENTO	58

1 INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO DO TEMA

A República Democrática de Timor-Leste é um dos países mais recentes do mundo, tendo reconquistado a sua independência em 2002, após 450 anos como colónia de Portugal, 24 anos de ocupação da Indonésia e 2 anos de administração transitória das Nações Unidas. Atualmente Timor-Leste ainda está numa fase de construção e desenvolvimento. Neste contexto, a água é um recurso indispensável que tem uma função vital para o desenvolvimento da sociedade através das suas componentes socioeconómicas de abastecimento às populações e à indústria, agricultura de rega (irrigação), lazer, suporte aos ecossistemas, produção de energia elétrica, atividades turísticas, transporte, pesca e combate a incêndios.

Devido à sua importância na criação e no fornecimento de bens e serviços à sociedade, que já foi mencionada, é necessária a intervenção humana na gestão deste recurso para garantir as necessidades humanas e também evitar a escassez da água devida ao crescimento demográfico. Para este efeito, são necessários meios técnicos e tecnológicos para analisar e planejar, de forma a minimizar custos de projeto e otimizar a quantidade e qualidade de água potável necessária nas comunidades rurais.

Um elemento de vital importância no desenvolvimento económico e social de Timor-Leste e na saúde e bem-estar do nosso povo é o acesso a água potável e saneamento. O objetivo é de, em 2030, todos os cidadãos do País terem acesso a água potável e saneamento melhorado [1]. Como contributo para se alcançar este objetivo, esta tese pretende introduzir a bomba de ariete em Timor Leste, como meio alternativo de abastecimento de água nas áreas rurais, de forma eficaz, eficiente e económica em relação aos meios comuns de elevação e abastecimento.

1.2. OBJETIVOS

A bomba de ariete (ou carneiro hidráulico) tem características ideais para a elevação de água em meios rurais tendo em conta que não necessita de energia elétrica. Com o presente trabalho pretende-se:

- a. Definir e caracterizar a bomba de ariete;
- b. Estudar este equipamento em laboratório para analisar as suas condições de funcionamento e os parâmetros que mais influenciam o seu desempenho.
- c. Projetar a aplicação prática do equipamento em casos de estudo de meios rurais em Timor-Leste.

1.3. ESTRUTURA DA TESE

O presente trabalho está estruturado da seguinte forma:

Capítulo 1: Introdução. Apresenta-se o enquadramento do tema, bem como os objetivos e a estrutura do trabalho.

Capítulo 2: Bomba de ariete. É apresentada a bomba de ariete, nomeadamente: evolução histórica, componentes, instalação e funcionamento do sistema.

Capítulo 3: Planeamento do trabalho experimental. Descreve-se a construção da bomba, materiais e ferramentas necessários, os parâmetros analisados e os procedimentos de teste em laboratório.

Capítulo 4: Análise de resultados. Apresentam-se os dados experimentais medidos em laboratório e analisam-se as características das condutas de alimentação e elevação, os batimentos da válvula de escape, tamanho do RAC e o rendimento da bomba de ariete.

Capítulo 5: Projeto de aplicação da bomba de ariete na aldeia Pitilete, suco Tutuala. Descreve-se a ilha de Timor e o caso de estudo e projeta-se um sistema de elevação a construir, incluindo o cálculo das necessidades de água, dimensionamento da bomba de ariete, das condutas e do armazenamento.

Capítulo 6: Conclusões e desenvolvimentos futuros.

2 BOMBA DE ARIETE

2.1. INTRODUÇÃO

A bomba de ariete ou carneiro hidráulico é uma bomba simples que funciona pelo princípio do choque hidráulico (ou golpe de ariete). O choque hidráulico é um transitório hidráulico que ocorre quando há, por exemplo, uma interrupção brusca do escoamento, neste caso, da água. Assim, este fenómeno, pode ser utilizado para bombeamento de água de um nível mais baixo para outro nível mais elevado, usando apenas a “força” da água, devida à gravidade, para se obter pressão suficiente, a fim de elevar uma dada quantidade de água para um reservatório a uma determinada altura sem a necessidade de energia elétrica.

Este equipamento tem vantagens e desvantagens. As vantagens são: não há gasto de energia externa, construção e manutenção barata, e funcionamento contínuo ao longo do tempo. As desvantagens são: necessita de um desnível entre a fonte de água e a bomba de ariete de, pelo menos, 1 m de altura e só eleva cerca de 5 a 17 % de caudal total de alimentação (eficiência volumétrica) com base nos resultados do trabalho realizado em laboratório.

2.2. EVOLUÇÃO HISTÓRICA

A bomba de ariete foi feita pela primeira vez pelo investigador inglês John Whitehurst em 1772, mas com movimento manual, elevando a água 4.9 m de altura. Na Figura 2.1 apresenta-se o mecanismo original.

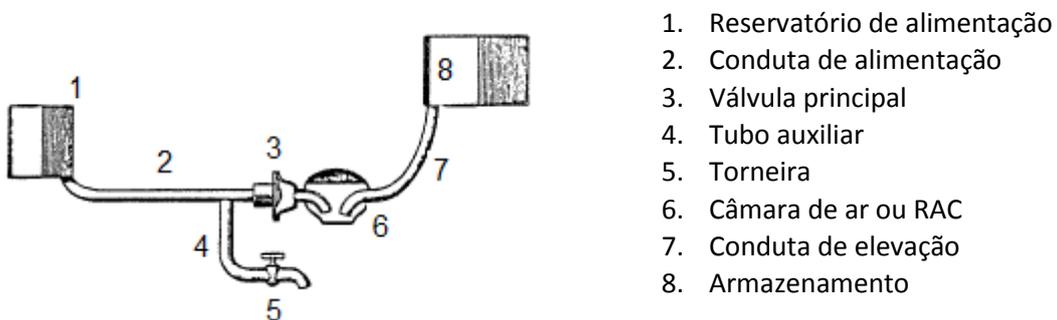


Figura 2.1 – “Pulsating machine” criada por John Whitehurst (Irlanda, 1772) [2]

O tubo de alimentação tinha cerca de 4 m a 180 m de comprimento. O diâmetro do tubo que liga à torneira é o mesmo do tubo de alimentação. A torneira era posicionada cerca de 6 m abaixo da fonte e a

válvula permitia uma única direção do escoamento. Entre o tanque de alimentação e o armazenamento havia um desnível máximo de 4.9 m e a elevação da água verificava-se quando o movimento da água era interrompido bruscamente, fechando a torneira. Neste sistema era necessária a abertura e fecho manual da torneira para criar uma variação de pressão suficiente para elevar a água [3].

Em 1796 o investigador Joseph Michel Montgolfier aumentou a bomba de ariete com 2 válvulas (a válvula admissão e a válvula escape) para funcionar automaticamente. A altura de elevação da água foi superior à da bomba de John Whitehurst. Este novo tipo de bomba foi utilizado para elevar a água para uma fábrica de papel na área de Voiron. Na Figura 2.2 indica-se o mecanismo criado por Montgolfier.

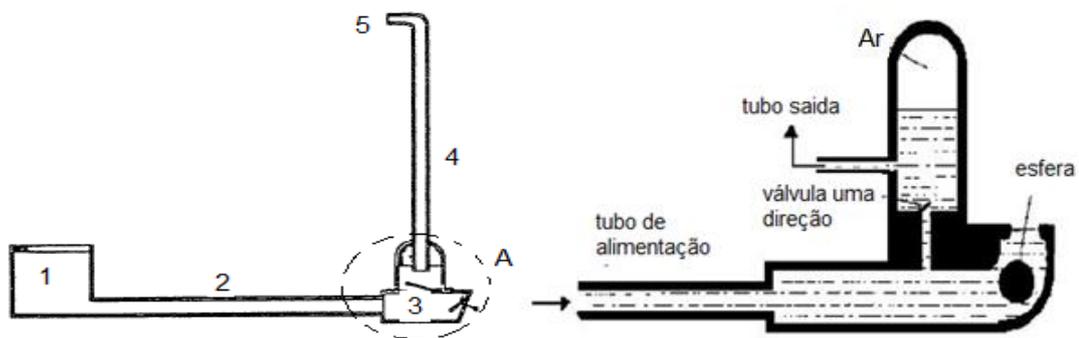


Figura 2.2 – Tipo de carneiro hidráulico por Montgolfier (França, 1796) [2] [3]

O princípio de funcionamento baseava-se no deslocamento de uma esfera de ferro ao longo do tubo, que subia a curva até bloquear a saída, originando assim o choque hidráulico. A água era assim obrigada a fluir pela válvula de sentido único. Depois, a pressão descia por ação do seu peso e a esfera voltava atrás no tubo dando início a um novo ciclo.

Este modelo sofria de um defeito dado que o ar presente na câmara acabava por ser dissolvido. Assim, decorrido algum tempo Montgolfier melhorou-o, retirando a bola de ferro e substituindo-a por uma válvula, de forma a introduzir ar de compensação na câmara, sendo este o *design* ainda hoje utilizado (Figura 2.3).

Após o seu aperfeiçoamento, nos locais que dispunham de condições adequadas, o carneiro hidráulico foi o principal elevador de água para casas, quintas, indústrias etc. Contribuiu para uma melhoria da produção agrícola, criação de extensas paisagens de jardinagem e principalmente para a saúde e saneamento.

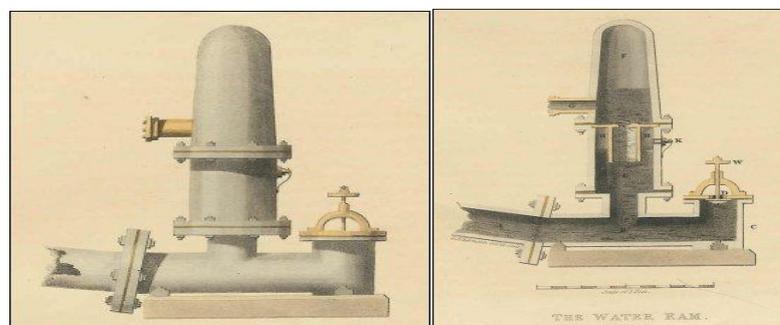


Figura 2.3 – “Tipo do carneiro hidráulico melhorado por Montgolfier [3]

A invenção do motor de combustão interna, o uso da eletricidade e das primeiras bombas mecânicas em conjunto com o baixo preço da energia fóssil, conduziram no início do século XX ao abandono dos carneiros hidráulicos e desinteresse pela sua melhoria.

No entanto, devido à crescente escassez dos combustíveis fósseis, aumento do seu custo, e preocupações ambientais, reverteu-se essa tendência havendo, hoje em dia, necessidade de promover a implementação de sistemas de bombagem baratos e com custos baixos de operação.

Atualmente existem empresas que fabricam e comercializam bombas de ariete com ergonomias e aspetos diferentes (Figura 2.4). No entanto o princípio de funcionamento mantém-se.



Figura 2.4 – Alguns tipos de carneiro hidráulico moderno nas comerciais [4], [5], [6], [7], [8]

2.3. INSTALAÇÃO

A configuração geral de uma bomba de ariete (Figura 2.5), inclui uma fonte de água, conduta de alimentação, unidade de bomba, conduta de elevação e armazenamento.

Relativamente à fonte de água, a bomba de ariete deve ser posicionada com uma queda suficiente para que a água corra graviticamente na conduta de alimentação para obter uma energia suficiente na bomba.

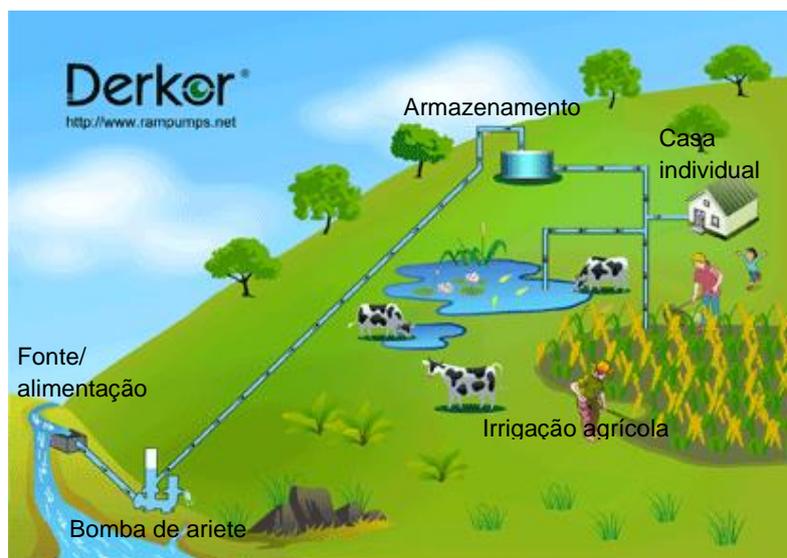


Figura 2.5 – Exemplo de uma bomba de ariete [9]

Quando se pretende um maior caudal de envio e o potencial hídrico disponível é abundante, pode-se considerar a instalação de dois ou mais carneiros hidráulicos em paralelo ou em serie, sendo a tubagem de envio comum (Figura 2.6).

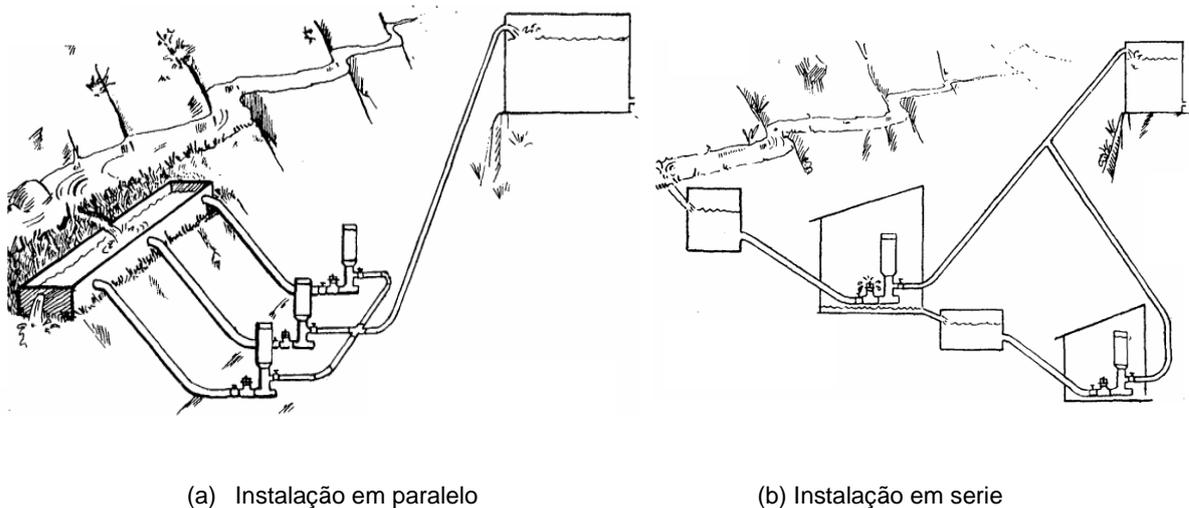


Figura 2.6 – Exemplo uma sistema da bomba de ariete em paralelo e em serie [2].

2.3.1. RESERVATÓRIO DE ALIMENTAÇÃO

O reservatório de alimentação tem como objetivo acumular água e garantir a cota da superfície livre necessária, evitando que a linha da energia varie ao longo do tempo. Se na prática o nível da nascente variar ao longo do ano, deve-se construir uma pequena represa ou reservatório, a fim de evitar a entrada de ar pelo tubo de alimentação e normalizar o caudal.

A diferença de nível da superfície livre no reservatório de alimentação e na bomba de ariete não deverá ser inferior a 1 m [10].

2.3.2. CONDUTA DE ALIMENTAÇÃO

A conduta de alimentação tem dois objetivos: serve para encaminhar a água para o corpo da bomba de ariete com uma velocidade alta, devendo resistir aos efeitos de choque hidráulico. Assim, esta conduta deve estar sempre abaixo da linha piezométrica, ser reta e lisa para minimizar as perdas de carga. Pode-se ponderar instalar uma conduta de alimentação com um diâmetro maior mas deve-se ter em conta que a velocidade do escoamento vai diminuir. Por sua vez, um tubo com diâmetro mais pequeno vai ter velocidade alta, mas também maiores perdas de carga. Por isso, a determinação do diâmetro desta conduta precisa de uma análise cuidadosa.

Na extremidade inicial (superior) deve-se instalar um crivo, que deverá ficar pelo menos 30 cm abaixo do nível da água na fonte de alimentação e 10 cm acima do seu fundo para evitar entrada de detritos que possam provocar o entupimento do mecanismo.

O material da conduta de alimentação também afeta o desempenho da bomba. O módulo de elasticidade do tubo causa significativas mudanças na elevação da pressão originada pelo golpe de ariete, decorrente da mudança de velocidade da onda de pressão na conduta. Assim Watt (1981) afirma que a conduta de

alimentação idealmente seria feita de aço ou ferro fundido, e as paredes do tubo seriam muito grossas em relação ao seu diâmetro ver (Figura 2.7).

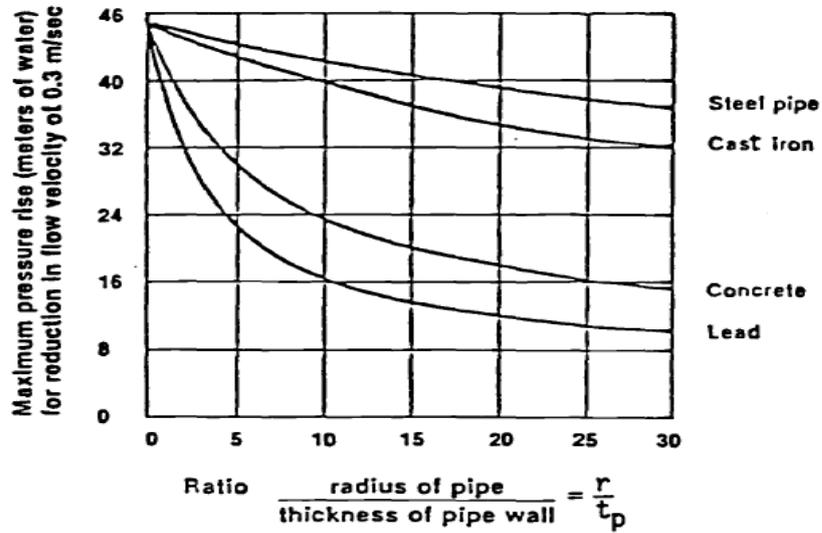


Figura 2.7 – Comparação da pressão máxima devida ao choque hidráulico com diferentes materiais e várias espessuras da parede do tubo de alimentação [11]

O comprimento da conduta de alimentação, L , pode estar compreendido entre determinados valores, definidos por diferentes autores:

- a. Azevedo Netto [10] recomenda:
 - $L \geq 1H$ a $1,2H$ (h =altura de elevação)
 - $5h < L < 10h$ (H =altura de alimentação)
 - $8\text{ m} < L < 75\text{ m}$
- b. Outras fórmulas empíricas [12]:
 - $6H < L < 12H$, (Krol)

$$L = \Delta h + \frac{0.3\Delta h}{H} \text{ (Eytelwein)} \quad (\text{Eq. 1})$$

$$L = \frac{900H}{(N^2 \cdot D)}, \text{ (Weisbach and Herrmann)} \quad (\text{Eq. 2})$$

$$L = 150 < \frac{L}{D} < 1000, \text{ (Calvert)} \quad (\text{Eq. 3})$$

Em que Δh é desnível entre altura de alimentação e elevação, H é altura de alimentação, N é o número das batidas por minuto e D é o diâmetro da conduta de alimentação.

Na prática, a equação de Calvert dá melhores orientações, uma vez que tem em conta diâmetro da conduta de alimentação [12].

2.3.3. CONDUTA DE ELEVAÇÃO

De acordo com Macintyre (1987), a conduta de elevação deve ser a mais reta possível com o mínimo de curvas e ter um diâmetro compreendido entre 1/3 e 1/2 da conduta de alimentação. As curvas e cotovelos, na conduta de elevação acarretam perdas de carga, prejudicando a elevação da água até à altura desejada [13]. O diâmetro da conduta de elevação pode ser aumentado para um valor um pouco acima do indicado na bomba a fim de se reduzir as perdas de carga por atrito [14].

Azevedo Netto (1998), recomenda uma altura de elevação entre 6 a 12 vezes o desnível entre a fonte de alimentação e a bomba.

2.3.4. CORPO DA BOMBA DE ARIETE

De acordo com o descrito anteriormente, os elementos principais do corpo da bomba de ariete são: a válvula escape, a válvula de admissão ao RAC, o reservatório de ar comprimido (RAC), a entrada da conduta de alimentação, a saída da conduta de elevação e o próprio corpo da bomba (Figura 2.11). As dimensões do corpo da bomba de ariete recomendadas pelos fabricantes são apresentadas no Quadro 2.1:

Quadro 2.1 – Vários das capacidades da bomba de ariete [11] (Watt 1975)

Bomba		1	2	3	3.5	4	5	6
Diâmetro interno da bomba, D_b	(mm)	32	38	51	63.5	76	101	127
	(polegada)	1¼	1½	2	2½	3	4	5
Caudal de alimentação, Q	(L/min)	7-16	12-25	27-55	45-96	68-137	136-270	180-410
Máximo de elevação, h	(m)	150	150	120	120	120	105	105

2.3.5. VÁLVULA DE ESCAPE

A válvula de escape ou impulsão é um dos componentes mais importantes da bomba de ariete. Deve, por isso, ser concebida de modo a que o peso, diâmetro e os movimentos possam ser adaptados. A função da válvula de impulsão é converter a energia cinética do fluido que flui através da conduta de alimentação em energia de pressão causada pelo choque hidráulico. A Figura 2.8 mostra alguns exemplos da válvula de escape.

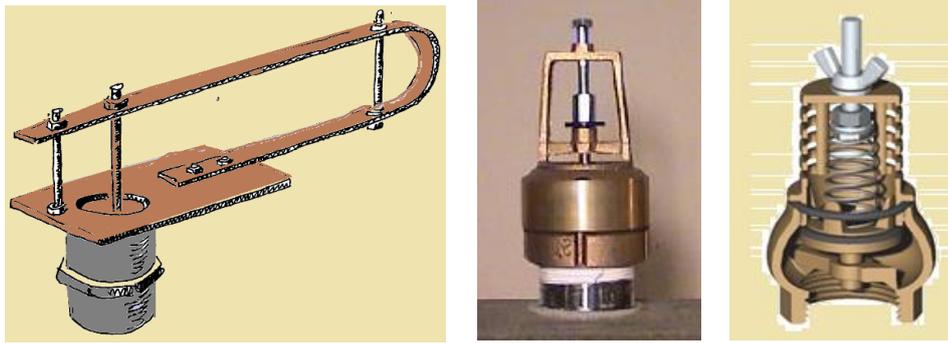
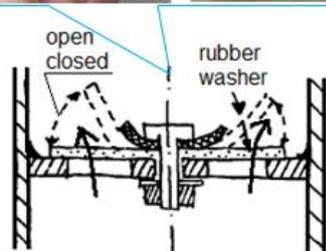


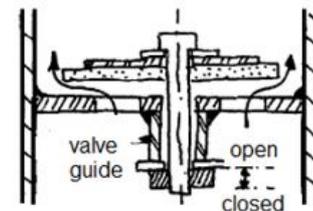
Figura 2.8 – Exemplos de válvulas de escape ou impulsão. [11],

2.3.6. VÁLVULA DE ADMISSÃO

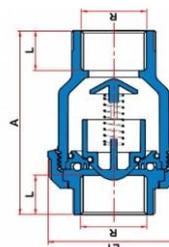
A válvula de admissão é uma válvula de sentido único que serve para permitir o escoamento da água para o reservatório de ar comprimido (RAC) para que seja elevada para o tanque de armazenamento. A válvula de admissão deve permitir um só sentido de escoamento, de modo que a água que entrou no RAC não possa voltar para o corpo da bomba. O diâmetro da válvula de admissão deve ser suficiente para permitir que a água bombeada entre no RAC com caudal suficiente sem grandes obstáculos. A Figura 2.9 mostra exemplos de válvulas de admissão.



(a) Válvula de borracha flexível (baseado em [11])



(b) válvula de guia [11]



(c) Válvula de admissão/retenção em metal [15]

Figura 2.9 – Exemplos de válvulas de admissão.

2.3.7. RESERVATÓRIO DE AR COMPRIMIDO, RAC

O reservatório de ar comprimido, RAC é uma câmara fechada, parcialmente cheia de ar e água, e não deve permitir a saída ou diminuição da quantidade de ar, criando alta pressão, dependendo da força e do tempo de fecho da válvula de escape. Esta pressão passa para a água dentro do RAC induzindo o escoamento pelo tubo de elevação. Se o RAC estiver completamente cheio de água poderá vibrar de forma significativa, situação prejudicial para o funcionamento e durabilidade da bomba.

O efeito do tamanho do RAC na operação da bomba de ariete não é claramente conhecido [11] mas alguns autores recomendam:

- O tamanho do RAC deve ser tão grande quanto possível para comprimir e amortecer a pressão, permitindo um caudal mais constante através do tubo de elevação e com menos perdas por atrito. Alguns autores sugerem que o volume de RAC deve ser igual ao volume de água no tubo de elevação. Assim, se o comprimento do tubo de elevação for grande, o volume do RAC também seria grande. No entanto, neste caso deve ser escolhido um tamanho menor que o dado pela relação anterior [11].
- Cleghorne (1919) recomenda um volume de RAC igual a cerca de duas vezes o volume da água na altura vertical de tubo de elevação [12].
- Krol (1951) refere que ocorre um aumento notável de 10% na eficiência da bomba quando o volume de RAC é duplicado e recomenda um volume de ar de cerca de 100 vezes o volume de água fornecida em cada ciclo [12].

2.3.8. VENTILAÇÃO DE ADMISSÃO DE AR (AIR VALVE)

O ar armazenado no RAC é lentamente absorvido pela turbulência da água que entra através da válvula de admissão, ou vai-se perdendo para o tubo de entrega. Para garantir um funcionamento contínuo da bomba, este ar tem de ser reposto pelo que se deve incluir uma válvula de admissão de ar. Um furo pequeno, inferior a 1 mm, é suficiente [12], (Figura 2.10). A válvula de admissão de ar deve ser ajustada para dar um pequeno jorro de água em cada impulso de compressão. Se a válvula é aberta demais, a câmara vai encher com o ar e a bomba irá então bombear apenas ar. Se a válvula não for suficientemente aberta e não permita que o ar suficiente possa entrar, a bomba vai bater com um som metálico e quebrar - isso deve ser corrigido imediatamente, aumentando a abertura da válvula de ar (Watt, 1975).

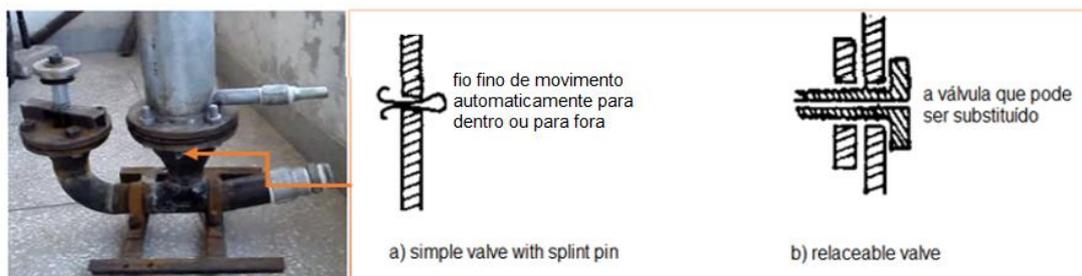


Figura 2.10 – Exemplo ventilação de ar [11]

2.4. COMPONENTES E FUNCIONAMENTO DA BOMBA

Basicamente os componentes da bomba de ariete são Figura 2.11:

- Válvula de escape (impulse valve): serve para gerar o choque hidráulico (golpe de ariete) e descarregar a água não bombeada.
- Válvula de admissão (delivery valve): serve para controlar a passagem da água do tubo de alimentação para a câmara de ar.
- Câmara de ar ou reservatório de ar comprimido (RAC): armazena a pressão acumulada pelo golpe de ariete e impulsiona a água para o tubo de elevação.

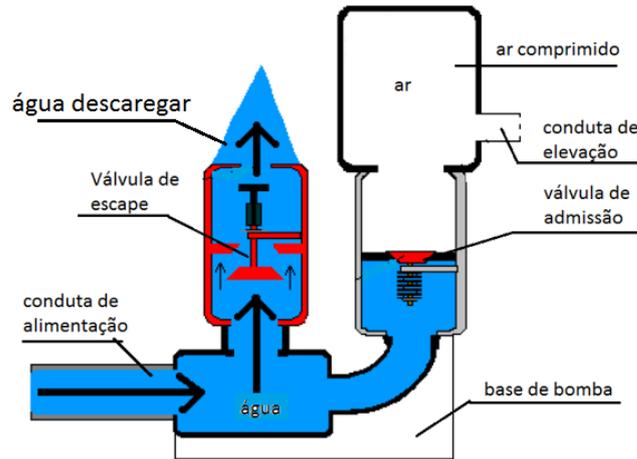


Figura 2.11 – Um esquema geral dos componentes da bomba de ariete [16].

O funcionamento da bomba é cíclico e contínuo e pode ser descrito em quatro fases:

1º Fase (Figura 2.12): a válvula de escape (B) abre, a válvula de admissão (C) fecha, a água da fonte corre por gravidade na conduta de alimentação (A), preenche o corpo da bomba de ariete e começa a sair através de válvula de escape (B). Este movimento continua durante um período de tempo t_1 até se atingir a velocidade U_0 (é a velocidade para a qual a resultante da pressão iguala o peso da válvula ou a força mínima da mola) na conduta de alimentação. Neste instante a força de pressão na válvula de escape vai iguala o seu peso, e a válvula quase fecha.

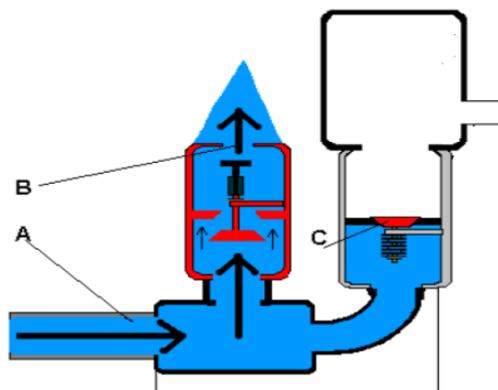


Figura 2.12 – Funcionamento da 1ª fase [16].

2º Fase (Figura 2.13) a velocidade máxima na conduta de alimentação, U_m , ocorre quando a válvula de escape (B) fecha repentinamente. Isso cria uma sobrepressão elevada (choque hidráulico, ΔH)

momentânea que, por sua vez força a válvula de admissão (C) a abrir permitindo a entrada de água no RAC, o que leva a uma compressão do ar e correspondente aumento de pressão da água no reservatório de ar comprimido (D). Devido ao aumento de pressão (e de carga hidráulica) a água começa a fluir para a conduta de elevação (E)

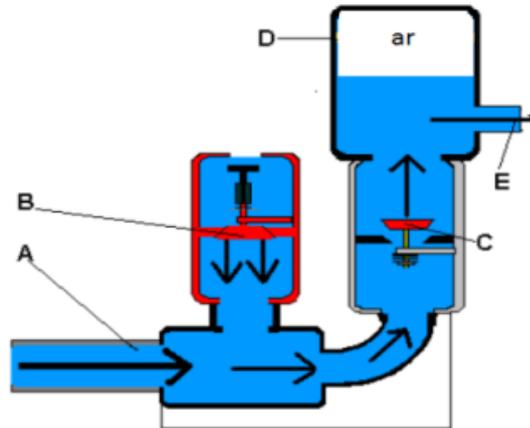


Figura 2.13 – Funcionamento da 2ª fase. [16]

3º Fase (Figura 2.14): a válvula de escape (B) está fechada, a água parou de fluir através da conduta de alimentação (A).

A onda de pressão gerada pelo choque hidráulico, produzido pelo fecho da válvula de escape, percorre a conduta deste o carneiro hidráulico até ao reservatório de alimentação e regressa ao carneiro. A partir de corrida uma fase ($2L/a$) desde o fecho da válvula de escape, ocorre uma subpressão interior no carneiro que, em conjunto com a pressão aumentada no interior do RAC, fecha a válvula de admissão. Entretanto o volume de ar no RAC continua a expandir-se devido ao escoamento na conduta de elevação.

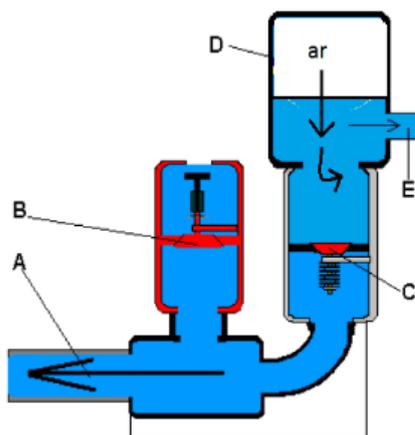


Figura 2.14 – Funcionamento da 3ª fase. [16]

4º Fase (Figura 2.15): A subpressão da conduta de alimentação, na secção da entrada no carneiro hidráulica, além de contribuir para o fecho da válvula de admissão ao RAC (3º fase), permite a abertura da válvula de escape - a resultante da pressão sobre esta válvula é agora inferior ao peso desta (ou da força máxima da mola comprimida). A Válvula de escape (B) abre e a água da conduta de alimentação

(A) começa novamente a fluir para a bomba e para a válvula de escape (B). A válvula de admissão (C) permanece fechada. O volume de ar no reservatório de ar comprimido (D) estabilizou-se e a água parou de fluir para dentro de conduta de elevação (E). Neste ponto começa um novo ciclo.

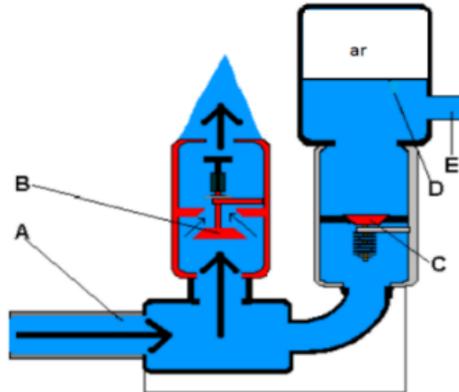


Figura 2.15 – Funcionamento da 4ª fase [16].

2.5. CARACTERÍSTICAS DO FUNCIONAMENTO

O estudo da bomba de aríete baseia-se na análise dos fatores que mais determinam os fenómenos que determinam o seu desempenho, nomeadamente, as perdas de carga e o choque hidráulico.

2.5.1. PERDAS DE CARGA

Nas condutas de alimentação e de elevação ocorrem perdas de carga (hf). Significativas em relação às alturas de elevação.

As referidas perdas de carga são divididas em dois grupos distintos:

- Perdas de carga contínuas (ΔH_C);
- Perdas de carga localizadas (ΔH_L).

Assim, de um modo geral, podemos decompor a perda de carga, hf , em duas parcelas:

$$hf = \Delta H_C + \Delta H_L \quad (\text{Eq. 4})$$

A primeira parcela da (Eq.4), designada por perda de carga contínua, é representativa da energia dissipada ao longo de todo o comprimento da conduta, admitindo-se que (em regime permanente uniforme) é uma função linear desse mesmo comprimento isto é:

$$\Delta H_C = J.L \quad (\text{Eq. 5})$$

Em que J (Eq.6) é a perda de carga unitária (perda de carga por metro de conduta), em (m/m) e L é o comprimento da conduta em (m).

A perda de carga unitária relaciona-se com fenómenos associados à viscosidade da água ao atrito entre a veia líquida e as paredes internas da conduta, podendo ser calculada pela fórmula universal de Darcy-Weisbach:

$$J = \frac{\lambda}{D} \cdot \frac{U^2}{2g} \text{ ou } J = \frac{8 \cdot \lambda \cdot Q^2}{g \cdot \pi^2 \cdot D^5} \quad (\text{Eq. 6})$$

Em que λ representa o coeficiente de resistência (Eq.9) ou (Eq.10), função do número de Reynolds (Eq.7) e/ou da rugosidade relativa da conduta, k/D .

$$\text{Re} = \frac{4Q}{\nu \cdot \pi \cdot D} \quad (\text{Eq. 7})$$

A viscosidade cinemática, ν , pode ser estimada em função da temperatura da água por aplicação da fórmula empírica de Poiseuille:

$$\nu = \frac{1,78 \times 10^{-6}}{1 + 0.0337T + 0.000221T^2} \quad (\text{Eq. 8})$$

Fórmula de Blasius para escoamento turbulento ($\text{Re} < 10^5$) numa conduta lisa

$$\lambda = \frac{0.316}{\text{Re}^{0.25}} \quad (\text{Eq. 9})$$

O coeficiente de resistência pode ser calculando pela fórmula de *Colebrook-White* em escoamentos do tipo turbulento liso, turbulento rugoso e de transição:

$$\lambda = \left(\frac{1}{-2 \log \left(\frac{k}{3.7D} + \frac{2.51}{\text{Re} \cdot \sqrt{\lambda}} \right)} \right)^2 \quad (\text{Eq. 10})$$

em que k é a rugosidade equivalente da conduta.

Assim, pela expressão de *Darcy – Weisbach*, as perdas de carga contínuas são dadas por:

$$\Delta H_c = \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{U^2}{2g} \quad (\text{Eq. 11})$$

A combinação da equação de *Colebrook-White* com a equação de *Darcy – Weisbach* permite obter a velocidade média do escoamento a partir de uma perda de carga unitária:

$$U = -2\sqrt{2gDJ} \cdot \log_{10} \left(\frac{k}{3.17D} + \frac{2.51\nu}{D\sqrt{2gDJ}} \right) \quad (\text{Eq. 12})$$

A rugosidade do tubo pode variar com o tipo de material, Quadro 2.2. No entanto, é necessário ter em atenção o envelhecimento da conduta na definição do valor de *k* a utilizar num dado problema prático.

Quadro 2.2 – Valores de rugosidade dos tubos, *k*. [13]

Material	<i>k</i> (mm)
Aço revestido	0.05 a 0.15
PVC	0.01 a 0.06
PEAD	0.003

A segunda parcela da (Eq.4) representa a perda de carga devida às singularidades existente (válvulas, curvas, mudanças diâmetros das condutas, entradas e saídas de reservatório e outros acessórios da instalação).

As perdas de carga localizadas são expressas em função da altura cinética do escoamento usando-se a seguinte equação:

$$\Delta H_L = K \cdot \frac{U^2}{2g} = K \cdot \frac{8Q^2}{g \cdot \pi^2 \cdot D^4} \quad (\text{Eq. 13})$$

em que o *K* é uma característica de cada tipo de acessório e da geometria da boca de entrada ou de saída de um reservatório.

Quadro 2.3 – Coeficiente de perdas de carga localizadas (D=25 mm) [10]

Acessórias	<i>K</i>
Saída normal no reservatório	0.5
Válvula de bola	0.4
Cotovelo curto raio 90°	0.9
Válvula de pé	1.75
Válvula de retenção tipo mola	2.5
Té saída lateral	1.8

2.5.2. CHOQUE HIDRÁULICO (GOLPE DE ARIETE)

Geralmente a definição de choque hidráulico designa as variações de pressão decorrentes de variações de caudal, causadas por alguma perturbação, voluntária ou involuntária, que se imponha ao escoamento de líquidos em condutas, tais como: operações de abertura ou fecho de válvulas, falhas mecânicas dos

dispositivos de proteção e controle, paragem de bombas causada pela interrupção do fornecimento de energia ao motor, havendo, no entanto, outros tipos de causas [17].

A Figura 2.16 ilustra um exemplo simples de ocorrência de choque hidráulico por causa do fecho de uma válvula. A magnitude do choque hidráulico é muito dependente de fatores como: tipo de materiais da conduta, tipo dos fluidos e velocidade do escoamento, tempo de manobra da válvula e o tempo de fase.

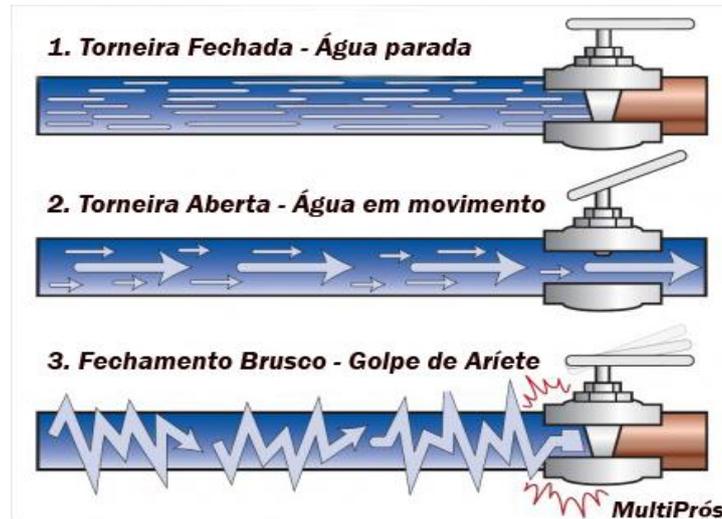


Figura 2.16 – Representação do efeito do choque hidráulico [18].

As consequências do choque hidráulico numa conduta, devido aos efeitos das sobrepressões, incluem a rotura da própria conduta e dos acessórios. Na fase das depressões há a destacar a possibilidade de ocorrência de rotura da veia líquida e de contaminação da água transportada. No entanto, por outro lado, este fenómeno pode tornar-se uma fonte alternativa de energia para elevar a água para um ponto mais alto, como se refere no mecanismo estudado neste trabalho.

A velocidade de propagação (celeridade) da onda de choque causada pela modificação brusca das condições de escoamento (por exemplo, fechamento da válvula de controlo), pode ser calculada por:

$$\text{Celeridade, } a = \frac{\sqrt{\frac{\varepsilon}{\rho}}}{\sqrt{1 + \frac{\varepsilon \cdot D \cdot C}{E \cdot e}}} \quad (\text{Eq. 14})$$

em que a é a celeridade (velocidade de propagação da onda) em m/s, ε é o módulo de elasticidade do fluido em $\text{N/m}^2 = \text{Pa}$ ($\varepsilon_{\text{água}} \approx 1.96 \text{ GPa}$ a cerca de $T = 4^\circ\text{C}$ e $\varepsilon_{\text{água}} \approx 2.03 \text{ GPa}$ a cerca de $T = 15^\circ\text{C}$), ρ é a massa volúmica do líquido em kg/m^3 ($\rho_{\text{água}} \approx 1000 \text{ kg/m}^3$), D é diâmetro interno da conduta expresso na mesma unidade da espessura, e , e E é o módulo de elasticidade do material da conduta Quadro 2.4.

Quadro 2.4 – Valores do módulo de elasticidade, E , dos materiais das condutas [13]

Material	E (10^9 N/m ² = Gpa)
Aço	210
Ferro fundido dúctil	170
Fibrocimento	23
PVC	3.1
PEAD	1.5

No que diz respeito às condições de fixação da conduta, podemos referir os seguintes casos:

Caso 1 – conduta ancorada apenas na extremidade de montante

$$C = 1 - \frac{\nu}{2} \quad (\text{Eq.15})$$

em que ν representa o coeficiente de *Poisson*.

Caso 2 – conduta ancorada contra qualquer deslocamento longitudinal

$$C = 1 - \nu^2 \quad (\text{Eq.16})$$

Caso 3 – conduta com juntas de expansão em todo o seu comprimento, $C = 1$

Os valores habituais do coeficiente de *Poisson* para diferentes materiais podem ser encontrados no Quadro 2.5.

Quadro 2.5 – Valores dos coeficientes de *Poisson*, ν [13]

Material	ν
Aço	0.29
Ferro fundido dúctil	0.21
PEAD	0.4 a 0.45
PVC	0.5

Na Figura 2.17 apresenta-se uma instalação típica (simplificada) da bomba de ariete. A variação de pressão e velocidade da onda que ocorre na conduta de alimentação é dependente do tempo de manobra da válvula. As manobras que ocasionam os regimes transitórios hidráulicos, como as realizadas sobre uma válvula, podem ser classificadas por comparação entre o tempo que dura a manobra “T” e o tempo de fase “T_f” que é o tempo necessário para uma onda elástica completar um percurso de ida e volta na conduta.

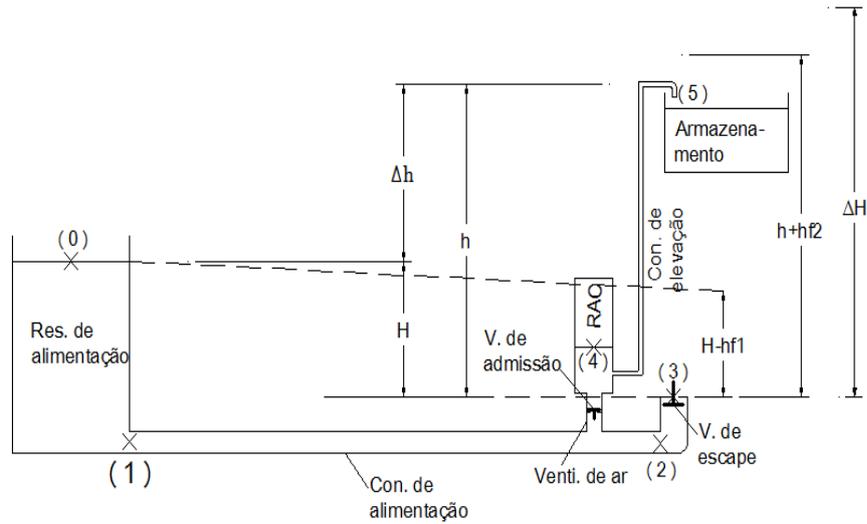


Figura 2.17 – Instalação típica em funcionamento [19]

O tempo de fase é dado por:

$$T_f = \frac{2L}{a} \quad (\text{Eq. 17})$$

No caso de se realizar uma manobra instantânea (situação mais gravosa) na válvula ($T \approx 0$):

$$\Delta H = \pm \frac{a \cdot \Delta U}{g} \quad (\text{Eq. 18})$$

A Figura 2.18 apresenta um esquema com as fases das variações da velocidade na conduta de alimentação, ao longo do tempo, explicadas de forma detalhada nos subcapítulos seguintes:

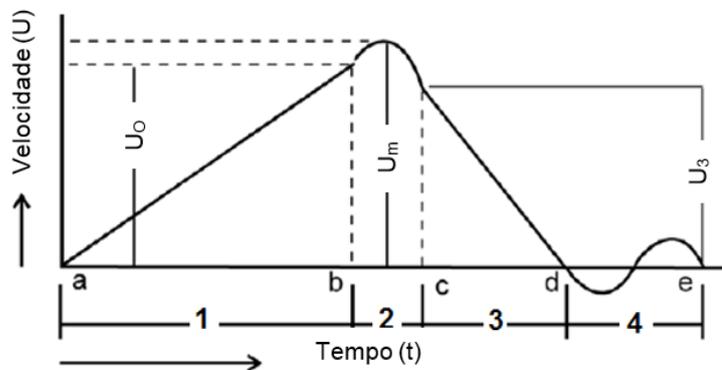


Figura 2.18 – Variação de velocidade longo do tempo na conduta de alimentação. [19]

2.5.2.1. Primeiro Período (1º fase)

Ocorre entre os instantes **a** e **b** da Figura 2.18.

Aplicando o *Teorema de Bernoulli* do escoamento permanente entre o ponto (0) e ponto (3) na Figura 2.17, a aceleração de escoamento na conduta de alimentação é dada por:

$$H - (1 + \sum K_L + \lambda \frac{L}{D} + K_V) \cdot \frac{U^2}{2g} = \frac{L \cdot dU}{g \cdot dt} \quad (\text{Eq. 19})$$

em que $\sum K_L$ é o somatório dos coeficientes de perdas de carga localizada na conduta de alimentação, λ é o fator de atrito da conduta (*Darcy-Waisbach*), L é o seu comprimento e D o diâmetro, K_V é o coeficiente de perda de carga na válvula de escape, U é a velocidade do escoamento na conduta de alimentação calculada pela equação de *Colebrook-White*, e H é a altura de alimentação.

$$1 + \sum K_L + \lambda \frac{L}{D} + K_V = M \quad (\text{Eq. 20})$$

Obtém-se uma nova apresentação para esta equação:

$$H - M \frac{U^2}{2g} = \frac{L}{g} \cdot \frac{dU}{dt} \quad (\text{Eq. 21})$$

A velocidade aumenta até ser alcançada a velocidade U_o , instante em que a força na válvula de escape iguala o peso da válvula W (que conta ainda com a força da mola, caso exista), e a válvula começa a fechar. A força da água sobre a válvula pode ser expressa como uma força de arrasto, F_D .

$$F_D = C_D \cdot A_V \cdot \gamma \cdot \frac{U^2}{2g} \quad (\text{Eq. 22})$$

Quando a válvula começa a fechar, $F_D = W$, e $U = U_o$ (Velocidade do escoamento na conduta de alimentação igual à velocidade do escoamento na saída da válvula de escape) e então a Eq.22, torna-se:

$$W = C_D \cdot A_V \cdot \gamma \cdot \frac{U^2}{2g} \quad (\text{Eq. 23})$$

em que ao C_D é o coeficiente de arrasto (*drag coefficient*) na válvula de escape ($C_D = 1.12$ para o disco circular perpendicular ao escoamento) [pg.441 em Lencastre. A].

em que W representa a soma do peso do disco da válvula com a força elástica da mola e o peso do disco da válvula:

$$W = W_V + K_M \cdot \Delta x \quad (\text{Eq. 24})$$

Pela combinação da Eq. 23 verifica-se que a velocidade U_o pode ser calculada da seguinte forma:

$$U_o = \sqrt{\frac{2g \cdot W}{C_D \cdot A_V \cdot \gamma}} \quad (\text{Eq. 25})$$

Ao conceito de arrastamento associa-se o coeficiente arrasto, C_D da válvula de escape que é a razão entre a força de resistência e o produto da pressão dinâmica com a secção projetada.

$$C_D = \frac{\text{Força da resistência (F}_r\text{)}}{\text{Pressão dinâmica (P}_D\text{)} \times \text{secção projetada (S)}} \quad (\text{Eq. 26})$$

Em que a pressão dinâmica para as correntes de escoamento é: $P_D = \frac{\rho \cdot U^2}{2}$ (Eq. 27)

A duração desta primeira fase é t_1 e pode ser obtida integrando a Eq. 21:

$$\int_a^b dt = t_1 = 2L \int_0^{U_o} \frac{dU}{2gH - M \cdot U^2} \quad (\text{Eq. 28})$$

Resultando em:

$$t_1 = \left(\frac{L^2}{2gHM} \right)^{1/2} \cdot \ln \left[\frac{\left(\sqrt{\frac{2gH}{M}} + U_o \right)}{\left(\sqrt{\frac{2gH}{M}} - U_o \right)} \right] \quad (\text{Eq. 29})$$

Ou:

$$t_1 = \left(\frac{L^2}{2gHM} \right)^{1/2} \cdot \ln \left[\frac{\left(1.0 + \sqrt{\frac{W \cdot M}{C_D \cdot A_V \cdot \gamma \cdot H}} \right)}{\left(1.0 - \sqrt{\frac{W \cdot M}{C_D \cdot A_V \cdot \gamma \cdot H}} \right)} \right] \quad (\text{Eq. 30})$$

A velocidade de escoamento permanente, U_s é obtida pela Eq. 21 com a variação $dU/dt = 0$.

$$U_s = \sqrt{\frac{2gH}{M}} \quad (\text{Eq. 31})$$

Definindo a relação de velocidades $U_o/U_s = m$, em que $0 < m < 1.0$, então:

$$U_o = m.U_s = m.\sqrt{\frac{2gH}{M}} \quad (\text{Eq. 32})$$

Por isso, o tempo da primeira fase pode ser simplificado, ficando:

$$t_1 = \left(\frac{L^2}{2gH.m} \right)^{1/2} \times \ln \left[\frac{1+(U_o/U_s)}{1-(U_o/U_s)} \right] \quad (\text{Eq. 33})$$

Se a válvula de escape se mantém aberta até se atingir a velocidade do escoamento permanente U_s , na conduta de alimentação, então $U_o = U_s$, e $t \rightarrow \infty$ e a válvula não fecha totalmente. Neste caso o $m = 1$ e o peso máximo da válvula escape, pode ser ajustado e obtido pela relação entre as Eq.25 e Eq.32:

$$W = W_{\max} = \frac{C_D.A_v.\gamma.H}{M} \quad (\text{Eq. 34})$$

Para a válvula funcionar continuamente, o valor de W terá de estar entre os seguintes limites:

$$0 < W < \frac{C_D.A_v.\gamma.H}{M} \quad (\text{Eq. 35})$$

O volume da água que sai a partir da válvula de escape durante a 1ª fase, V_1 é calculado pela equação:

$$V_1 = \int_0^{U_o} A.U.L \frac{dU}{\frac{2gH}{M} - U^2} - U^2 \int_0^{U_o} A.L \frac{U}{\frac{2gH}{M} - U^2} .dU \quad (\text{Eq. 36})$$

ou

$$V_1 = \frac{L.A}{M} \left[\ln \left(\frac{1}{1.0 - (U_o^2/U_s^2)} \right) \right] \quad (\text{Eq. 37})$$

Uma vez mais, se $U_o = U_s, V_1 = \infty$, logo a bomba não vai funcionar. Das equações (Eq. 20) e (Eq.34) podemos ver do comprimento da conduta de alimentação:

$$0 < L < D \left[\frac{C_D \cdot A_v \cdot \gamma \cdot H - W \left(1 + \sum h_L + K_V \right)}{W \cdot \lambda} \right] \quad (\text{Eq. 38})$$

2.5.2.2. Segundo Período (2º fase)

Ocorre entre os instantes **b** e **c** da Figura 2.18.

De acordo com o subcapítulo 2.4, os detalhes do fecho da válvula de escape são complicados, uma vez que a água e a válvula estão em movimento. O fecho depende de vários parâmetros, incluindo a velocidade da água no tubo de alimentação e peso da válvula. Teoricamente, a velocidade da água ao passar na válvula de escape aumenta até atingir o valor máximo no instante antes da válvula fechar completamente. Entretanto, como o comprimento da campânula da válvula é geralmente curto, a distância percorrida é pequena, e a resistência do escoamento através da válvula aumenta com o seu fecho, pelo que é provável que a velocidade máxima, U_m não seja significativamente diferente de U_o . Por isso a velocidade média durante o segundo período, U_2 é aproximadamente igual a U_o :

$$U_2 \cong U_o = m \sqrt{\frac{2gH}{M}} \quad (\text{Eq. 39})$$

Como U_2 é assumida constante, não há aceleração durante o segundo período e a sua duração, t_2 , é estimada assumindo o fecho instantâneo da válvula:

$$t_2 \leq \frac{2L}{a} \quad (\text{Eq. 40})$$

A quantidade máxima de água que escoa a partir da válvula durante o segundo período é calculada pela Eq.41:

$$V_2 = A U_o \cdot \frac{2L}{a} \quad (\text{Eq. 41})$$

2.5.2.3. Terceiro Período (3º fase)

A válvula de escape está fechada, causando o escoamento retardado, e a velocidade do escoamento na conduta de alimentação é reduzida relativamente à altura piezométrica ($h + h_r$) gerada acima da altura de alimentação estática, H . Por sua vez, h é a altura de elevação, e h_r é perda de carga na válvula de admissão obtida pela equação:

$$h_r = K_{Va} \frac{U_o^2}{2g} \left(1 - \frac{h}{h_{max}} \right) \quad (\text{Eq. 42})$$

Onde K_{Va} é o fator de perdas na válvula de admissão, determinado experimentalmente em condição de escoamento permanente e h_{max} é a altura máxima de elevação.

De acordo com a teoria do choque hidráulico para fecho instantâneo de uma válvula, a pressão máxima ΔH é teoricamente obtida pela Eq.18 e celeridade a é calculado pela Eq. 14. Se U_3 é a velocidade máxima de escoamento na conduta de alimentação durante ao terceiro período, a equação torna-se:

$$(U_3 - U_o) \left(\frac{a}{g} \right) = -(h + h_r) \quad (\text{Eq. 43})$$

$$U_3 = U_o - (h + h_r) \left(\frac{g}{a} \right) \quad (\text{Eq. 44})$$

O valor máximo da altura piezométrica teórica, $h_{max} = h$ é obtido se $U_3 = 0$ e $h_r = 0$:

$$h_{max} = \frac{a.U_o}{g} \quad (\text{Eq. 45})$$

Aplicando a equação de energia entre (0) e (4) (Figura 2.17), durante o 3º período obtém-se a equação:

$$-h - n \frac{U^2}{2g} = \frac{L}{g} \cdot \frac{dU}{dt} \quad (\text{Eq. 46})$$

em que n representa o fator das perdas de carga na conduta de alimentação e na válvula de admissão e h é altura de elevação. A duração do terceiro período obtém-se pela integração da Eq.44 entre $U = U_3$ e $U = 0$.

$$\int_C^D dt = t_3 = -2L \int_{U_3}^0 \frac{dU}{\frac{2gh}{n} + U^2} \quad (\text{Eq. 47})$$

Por isso:

$$t_3 = \left(\frac{2L}{gh.n} \right)^{1/2} \tan^{-1} \left(\frac{n.U_3^2}{2gh} \right)^{1/2} \quad (\text{Eq. 48})$$

A quantidade de água elevada durante o 3º período é:

$$V_3 = \frac{L.A}{n} \left[\ln \left(\frac{n.U_3^2}{2g} + 1.0 \right) \right] \quad (\text{Eq. 49})$$

2.5.2.4. Quarto Período (4º fase)

Ocorre entre os instantes *c* e *d* da Figura 2.18.

Devido à sobreposição de eventos, o quarto período é definido como o período necessário para uma reflexão completa da onda de pressão, após o qual as restantes ondas de pressão no tubo de alimentação são consideradas insignificantes. A sua duração é:

$$t_4 = \frac{2L}{a} \quad (\text{Eq. 50})$$

2.5.2.5. Ciclo Completo de Funcionamento

A duração de um ciclo completo de funcionamento da bomba de ariete é o somatório dos quatro períodos descritos:

$$T = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 \quad (\text{Eq. 51})$$

Ou seja:

$$T = \left(\frac{L^2}{2gH.M} \right)^{1/2} \cdot \ln \left[\frac{1+(U_o/U_s)}{1-(U_o/U_s)} \right] + \frac{4L}{a} + \left[\left(\frac{2L^2}{2g.n} \right)^{1/2} \cdot \tan^{-1} \left(\frac{n.U_3^2}{2gh} \right)^{1/2} \right] \quad (\text{Eq. 52})$$

O caudal medio elevado é:

$$q = \frac{V_3}{T} [\text{litro} / s] \quad (\text{Eq. 53})$$

ou

$$q = \frac{L.A}{n.T} \left[\ln \left(\frac{n.U_3^2}{2gh} + 1.0 \right) \right] \quad (\text{Eq. 54})$$

E a frequência de batimento da válvula (bat/min), pode-se definir como:

$$N = \frac{60}{T} \quad (\text{Eq. 55})$$

Por outro lado, a relação de volume escoado V_3/V_1 é:

$$V_3/V_1 = \frac{\frac{M}{n} \left[\ln \left(\frac{n.U_3^2}{2gh} + 1.0 \right) \right]}{\left[\ln \left(\frac{1.0}{1.0 - (U_0^2/U_s^2)} \right) \right]} \quad (\text{Eq. 56})$$

E o caudal media descarregado a partir da válvula de escape ($\text{m}^3/\text{segundo}$) é:

$$Q_D = \frac{L.A}{M.T} \left[\ln \left(\frac{1.0}{1.0 - (U_0^2/U_s^2)} \right) + \frac{2U_0}{a} \right] \quad (\text{Eq. 57})$$

2.6. ENERGIA E RENDIMENTO

O rendimento energético é traduzido pela relação entre a energia potencial que a água possui no estado inicial (energia potencial entrada, Epe), ou seja, à altura “H”, e as energias potenciais final de uma determinada quantidade (energia potencial saída, Eps) à altura “h”. A energia potencial no reservatório de alimentação e no ponto de entrega é dada por:

$$Epe = m.g.H = (\rho_{\text{água}} \cdot Q.t).g.H \quad (\text{Eq. 58})$$

$$Eps = m.g.h = (\rho_{\text{água}} \cdot q.t).g.(h - H) \quad (\text{Eq. 59})$$

Como o rendimento é equivalente à energia potencial de saída sobre a energia potencial de entrada, segundo Rankine pode ser calculado da seguinte forma [2], em relação de Eq. 58 e Eq.59:

$$\eta_R = \frac{q \cdot \rho_{\text{água}} \cdot t \cdot g \cdot (h - H)}{Q_D \cdot \rho_{\text{água}} \cdot t \cdot g \cdot H} = \frac{q(h - H)}{Q_D \cdot H} \cdot 100\% \quad (\text{Eq. 60})$$

Por seu lado, D’Aubuisson [2] calcula o rendimento de outra forma:

$$\eta_D = \frac{(q \cdot \rho_{\text{água}} \cdot t) \cdot g \cdot h}{((Q_D + q) \cdot \rho_{\text{água}} \cdot t) \cdot g \cdot H} = \frac{q \cdot h}{(Q_D + q) \cdot H} \times 100\% \quad (\text{Eq. 61})$$

Há ainda um outro método apresentado por fabricantes, que resulta usualmente valores de rendimento mais elevados [2]:

$$\eta_C = \frac{q \cdot h}{Q_D \cdot H} \cdot 100\% \quad (\text{Eq. 62})$$

Alem dos três métodos apresentados pode-se usar também outra forma [19], calculado pela seguinte expressão:

$$\eta = \frac{\frac{h \cdot M}{H \cdot n} \left[\ln \left(\frac{n \cdot U_3^2}{2gh} + 1.0 \right) \right]}{\left[\ln \left(\frac{1.0}{1.0 + (U_o^2 / U_s^2)} \right) \right]} \quad (\text{Eq. 63})$$

A potência da bomba em unidades do SI [watts] [19]:

$$P = q \cdot \gamma \cdot H \quad (\text{Eq. 64})$$

ou

$$P = 9.81 \frac{h \cdot L \cdot A}{n \cdot T} \left[\ln \left(\frac{n \cdot U_3^2}{2gh} + 1.0 \right) \right] \quad (\text{Eq. 65})$$

3

TRABALHO EXPERIMENTAL

3.1. PLANEAMENTO DO TRABALHO

Com este trabalho experimental pretendeu-se saber como é que uma bomba de ariete funciona e quais os parâmetros que mais influenciam o seu funcionamento: a proporção entre a altura de alimentação e de elevação, o tamanho do RAC e/ou o diâmetro e a elasticidade do tubo de alimentação. Foi também necessário determinar o rendimento do sistema para diferentes condições, para se poder prever o seu desempenho em Timor Leste.

Para se atingir os objetivos propostos, foi seguido o seguinte plano de trabalhos:

1. Montagem da bomba modelo;
2. Instalação do sistema;
3. Variação do Reservatório de ar comprimido (RAC);
4. Variação da altura de elevação;
5. Variação do diâmetro do tubo de elevação;
6. Variação do tubo de alimentação em material rígido (aço galvanizado) e plástico (PVC).

3.2. MONTAGEM DO MODELO

A construção do modelo da bomba de ariete foi feita a partir de materiais existentes e vendidos no mercado ver (Figura 3.1).

Foram utilizadas as instalações do laboratório de Hidráulica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, que incluem um pé-direito de dimensões adequadas para o trabalho pretendido e um sistema de recirculação de água que evita o desperdício durante a realização dos trabalhos experimentais.

Segue uma listagem de todos os materiais e ferramentas usados em cada componente do mecanismo:

- a. Fonte e conduta de alimentação.
 - Tanque de alimentação com 50 litros de volume
 - Tubo em PVC com 25 mm de diâmetro e 6 m de comprimento
 - Tubo em aço galvanizado com 25 mm de diâmetro e 6 m de comprimento
 - Válvula esférica com 25 mm de diâmetro (controlo de escoamento)

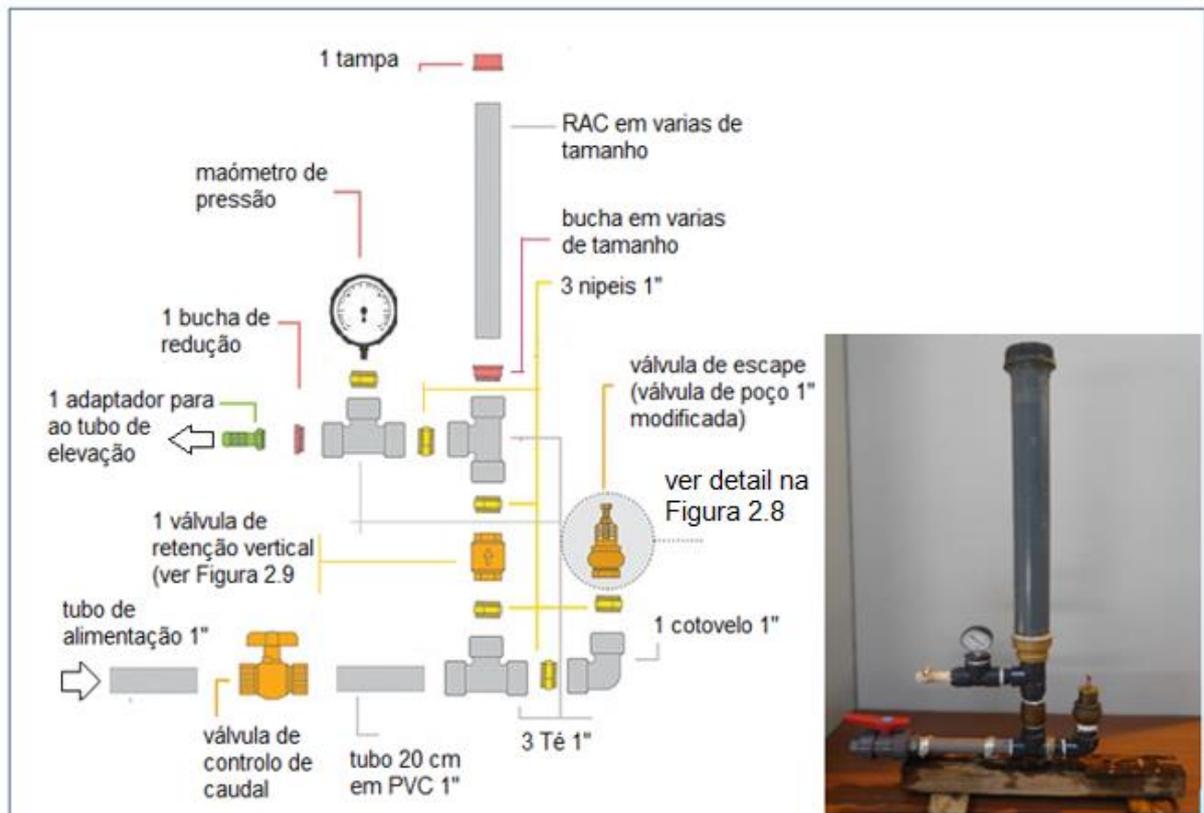


Figura 3.1 – Montagem da bomba de ariete modelo baseado em [20].

b. Bomba de ariete.

- Tubo PVC com 20 cm de comprimento e 25 mm de diâmetro
- 3 Tê em PVC com 25 mm de diâmetro
- 5 Nipeis (Junta roscada) em PVC com 25 mm de diâmetro
- 1 Cotovelo em PVC com 25 mm de diâmetro
- 1 Válvula de pé em metal roscada com 25 mm de diâmetro
- 1 Parafuso 7 mm de diâmetro, 2 anilhas e 2 porcas
- 1 Mola 60 mm de comprimento e 12 mm de diâmetro
- 1 Válvula de retenção de mola em metal com 25 mm de diâmetro

c. Reservatório de ar comprimido, RAC.

1) Primeiro grupo de RAC usado:

- Tubo em plástico transparente com 20 cm de altura e 1¼ polegadas de diâmetro
- Tubo em plástico transparente com 40 cm de altura e 1¼ polegadas de diâmetro
- Tubo em PVC com 60 cm de altura e 1¼ polegadas de diâmetro
- Tubo em PVC com 80 cm de altura e 1¼ polegadas de diâmetro
- Tubo em PVC com 100 cm de altura e 1¼ polegadas de diâmetro
- 5 Tampas com 1¼ polegadas de diâmetro
- 5 Reduções de 1¼ polegadas para 1 polegada de diâmetro

2) Segundo grupo de RAC:

- Tubo em PVC com 60 cm de altura e 1 polegada de diâmetro, 1 tampa e 1 redução.

- Tubo em PVC com 60 cm de altura e 1¼ polegadas de diâmetro, 1 tampa e 1 redução 1¼ polegadas para 1 polegada de diâmetro.
 - Tubo em PVC com 60 cm de altura e 1½ polegadas de diâmetro, 1 tampa e 1 redução 1½ para 1 polegada de diâmetro.
 - Tubo em PVC com 60 cm de altura e 2 polegadas de diâmetro, 1 tampa e 1 redução 2 polegadas para 1 polegadas de diâmetro.
- 3) Terceiro grupo de RAC:
- Tubo em PVC com 99,50 cm de altura e 1 polegadas de diâmetro, 1 tampa e 1 redução
 - Tubo em PVC com 60 cm de altura e 1¼ polegadas de diâmetro, 1 tampa e 1 redução 1¼ polegadas para 1 polegada de diâmetro.
 - Tubo em PVC com 47,90 cm de altura e 1½ polegadas de diâmetro, 1 tampa e 1 redução 1½ para 1 polegada de diâmetro.
 - Tubo em PVC com 28,30 cm de altura e 2 polegadas de diâmetro, 1 tampa e 1 redução 2 polegadas para 1 polegadas de diâmetro.
- d. Condução de elevação:
- 1) 1 Adaptador 1 para 1/2 polegadas de diâmetro.
 - 2) Tubo em PVC com 18 mm de diâmetro e 11,60 m de comprimentos, juntas e acessórios de instalação.
- e. Alguns materiais comuns necessários: braçadeiras, cola, fita etc.
- f. Ferramentas comuns necessárias: fita métrica, manómetro, paquímetro, cronómetro, chaves, etc. (Anexo 3).

3.3. PLANO DA INSTALAÇÃO DO SISTEMA

A Figura 3.2 esquematiza o plano da instalação da bomba de ariete.

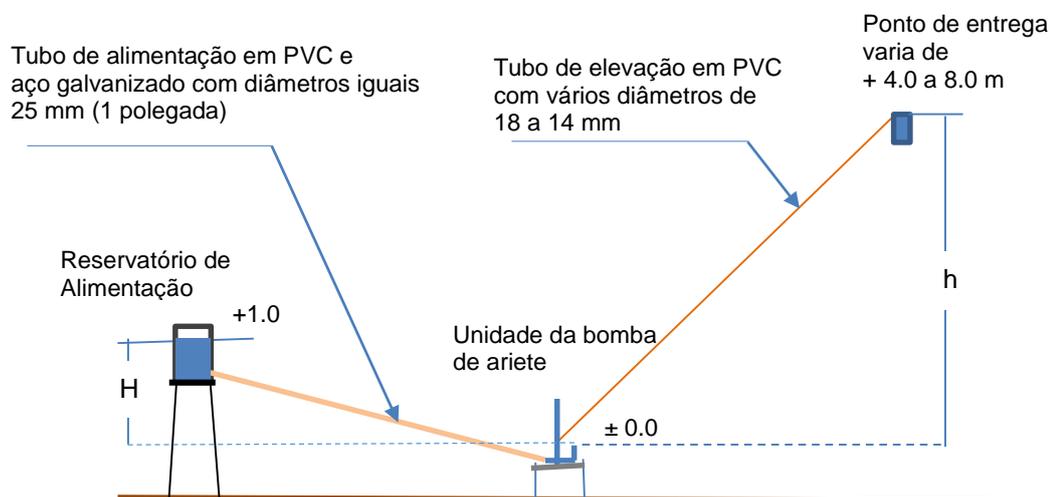


Figura 3.2 – Esquema da instalação

O reservatório de alimentação foi colocado 1 m acima da válvula de escape (nível de referência) e foi inicialmente usado um tubo de alimentação em PVC com 6 m de comprimento, substituído depois por um tubo de aço galvanizado com o mesmo comprimento. Ambos os tubos usados tinham o mesmo diâmetro interior (25 mm, ou seja, 1 polegada).

Acima da válvula de escape o tubo de alimentação foi elevado a diferentes alturas, tendo-se registado uma proporcionalidade entre a altura de alimentação e as alturas da elevação (H/h) de 1/4, 1/5, 1/6, 1/7 e 1/8, na (Figura 3.3).

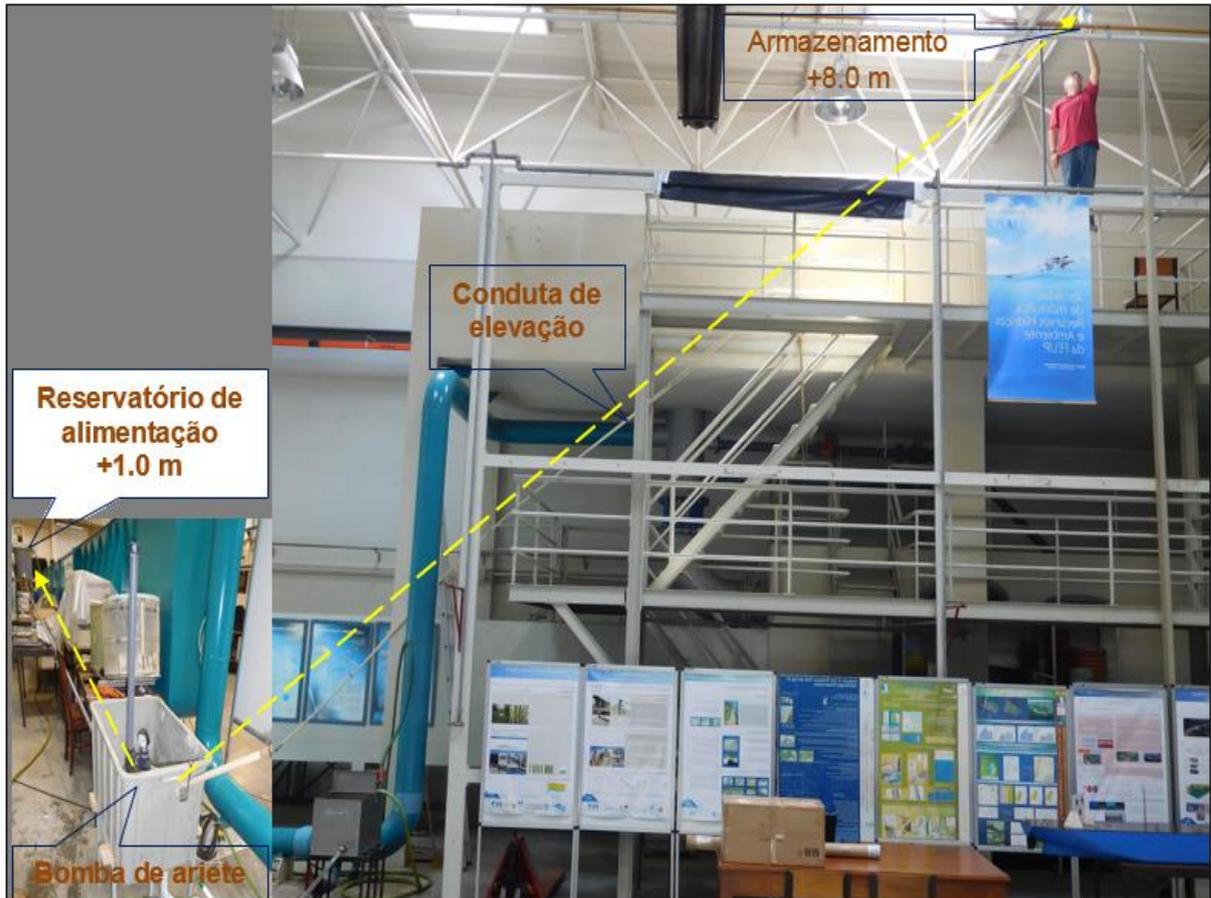


Figura 3.3 – Fotografia da instalação do modelo no Laboratório de Hidráulica da SHRHA-FEUP

3.4. VARIAÇÃO DO RESERVATÓRIO DE AR COMPRIMIDO, RAC

Para se definir o tamanho do reservatório de ar comprimido (RAC) que permite bombear a máxima quantidade de água sem introduzir uma vibração significativa no corpo da bomba, foram estudados três grupos de RAC diferentes:

- Primeiro grupo: 6 unidades de RAC de iguais diâmetros (33,2 mm) e com as seguintes alturas: 0, 20, 40, 60, 80, e 100 cm (Figura 3.4a).
- Segundo grupo: 4 unidades de RAC de iguais alturas (60 cm) e com diâmetros internos de 48,0, 36,0, 33,2 e 25 mm (Figura 3.4b).
- Terceiro grupo: 4 unidades de RAC, com iguais volumes (0,475 L) e diâmetros diferentes: 48,0, 36,0, 33,2 e 25 mm (Figura 3.4c).

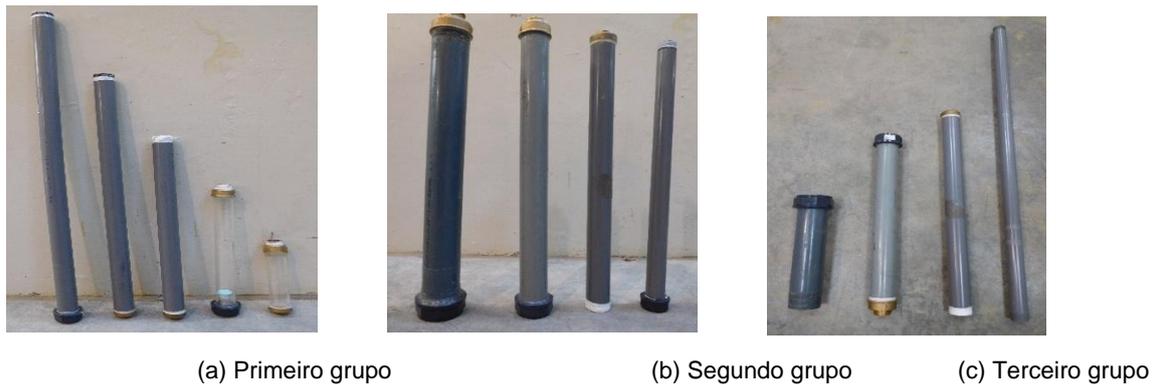


Figura 3.4 – Grupos de RAC

3.5. PROCEDIMENTO DE TESTE

Todos os testes efetuados, com alturas de elevação de 4,0 a 8,0 m seguiram o seguinte procedimento:

- a. Encher o reservatório de alimentação até ao nível máximo e garantir alimentação de água suficiente para manter esse nível constante.
- b. Posicionar a secção de jusante da conduta de elevação na altura desejada (4,0 m no teste inicial).
- c. Instalar o RAC pretendido na posição certa, sem fugas e devidamente estabilizado.
- d. Abrir totalmente a válvula de escape (controlado com regulação de mola) e a válvula de controlo de caudal, (Figura 3.5a).
- e. Regular a mola através do parafuso regulador
- f. Registo do número de batidas (N47) da válvula de escape por minuto.
 - Contar o número de batidas (N47) da válvula de escape por minuto, controlando com o parafuso regulador.
 - Medir a altura do parafuso (y_2). Comprimento da mola comprida, $\Delta y = y_1 - y_2$
 - Medir o volume de água descarregado através da válvula de escape (V_D) no tempo (T_D). Quantificar o caudal de descarga: $Q_D = V_D/T_D$ (L/min), (Figura 3.5b).
 - Medir o volume de água de elevação (V_E) no tempo (T_E). Quantificar o caudal de elevação, $q = V_E/T_E$ (litro/min), (Figura 3.5c).
- g. Repetir o procedimento da alínea **f**, para um número de batidas diferente.
- h. Repetir os procedimentos de alínea **c** até **g** para outro RAC desejado.

Uma vez seguido o procedimento descrito para cada um dos RAC dos três grupos apresentados, escolheram-se os três melhores (os que elevaram maior quantidade de água). Depois, repetiram-se os procedimentos da alínea **c** até alínea **g** para as alturas de elevação de 5,0 a 8,0 m mantendo a conduta de alimentação em PVC e alterando depois o diâmetro do tubo de elevação para 12 mm.
- i. De seguida, alterou-se a conduta de alimentação para aço galvanizado e, com o melhor RAC entre os três melhores do estudo anterior, repetiram-se os procedimentos da alínea **c** até **g** para as alturas de elevação de 4,0 a 8,0 m.

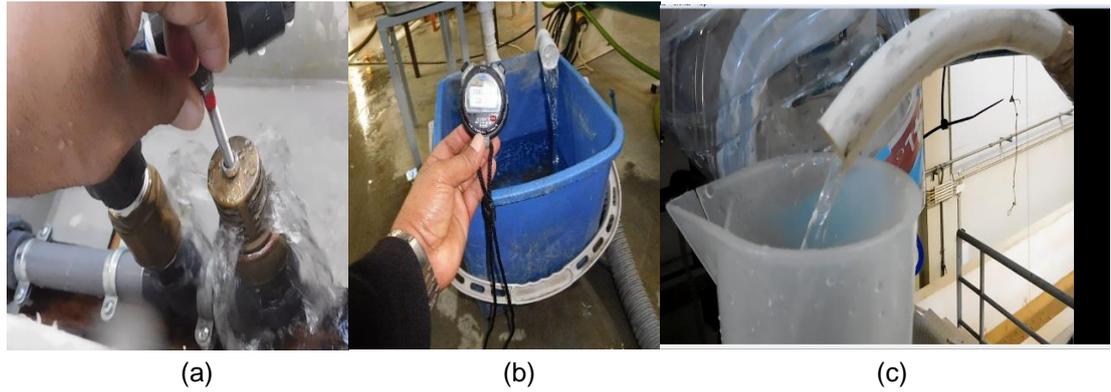


Figura 3.5 – Fotografias de experimento

Com o procedimento descrito foi possível:

- a. Estudar a influência do material da conduta de alimentação (flexível ou rígido) no desempenho do sistema.
- b. Descobrir qual o tamanho do RAC que vai resultar no máximo caudal entregue e no mínimo caudal descarregado.
- c. Saber qual a frequência (ou número) de batidas da válvula de escape que resulta no máximo de rendimento e no mínimo caudal descarregado.

4

ANÁLISE DE RESULTADOS

4.1. CONDUTA DE ALIMENTAÇÃO

Neste estudo, a conduta de alimentação foi materializada em aço galvanizado (material rígido) e PVC (material elástico), ambos com a mesma geometria (6 m de comprimento e 25 mm de diâmetro), ligando diretamente a bomba de ariete e o reservatório de alimentação (Figura 4.1). As relações entre a altura da superfície livre no reservatório de alimentação e o reservatório de entrega (H/h) estudadas foram: 1/4; 1/5; 1/6; 1/7 e 1/8.

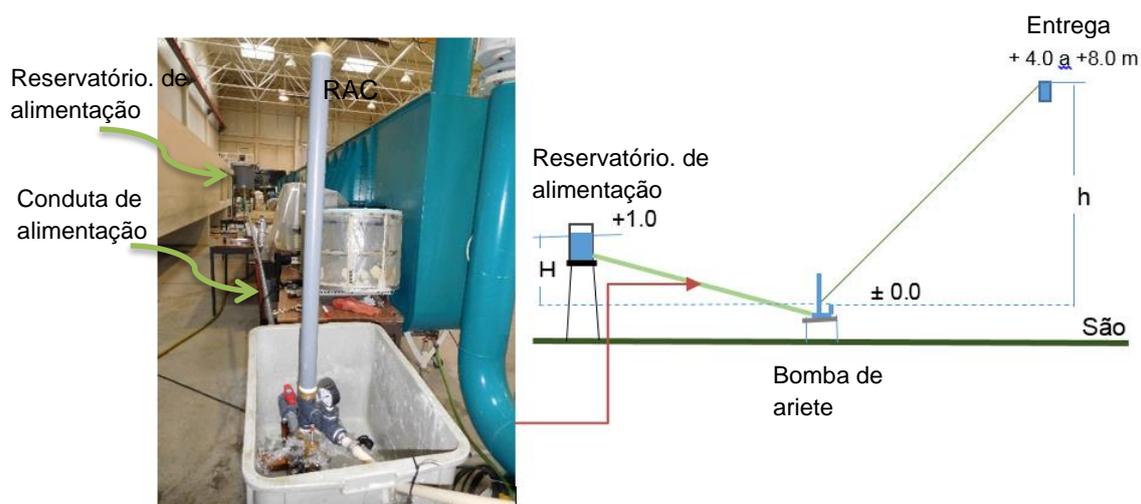


Figura 4.1 – Fotografia e esquema da instalação

A bomba funciona pela energia potencial a qual dependente da altura de alimentação. Aumentando a altura de alimentação, aumenta também a energia potencial na válvula de escape, a qual fecha e abre originando o choque hidráulico, permitindo a entrada de água no RAC. Na válvula de escape, a energia da água é inferior à da fonte de alimentação, por causa das perdas de carga na conduta. No (Quadro 4.1 e Quadro 4.2.) indicam-se as perdas de carga e altura piezométrica para cada variação de altura de elevação. Nos cálculos considerou-se: temperatura de água, $T = 17.9^{\circ}\text{C}$, rugosidade da conduta em PVC, $k = 0,035 \text{ mm}$ e em aço galvanizado, $k = 0,1 \text{ mm}$.

Quadro 4.1 – Perdas de carga e energia de pressão na conduta de alimentação em PVC

H (m)	h (m)	Q _D (L/min)	q (L/min)	Q (L/min)	Re	λ	J (m/m)	U (m/s)	ΣΔH _c (m)	ΣΔH _L (m)	ΣΔH (m)	H _b = P/γ (mca)
1.0	4.0	12.113	1.920	14.033	11206	0.0322	0.0149	0.164	0.089	0.0012	0.091	0.909
1.0	5.0	13.354	1.575	14.929	11921	0.0317	0.0166	0.174	0.100	0.0014	0.101	0.899
1.0	6.0	13.421	1.255	14.676	11719	0.0318	0.0161	0.171	0.097	0.0013	0.098	0.902
1.0	7.0	14.052	1.090	15.142	12091	0.0316	0.0170	0.176	0.102	0.0014	0.104	0.896
1.0	8.0	14.570	0.938	15.509	12384	0.0315	0.0178	0.180	0.107	0.0015	0.108	0.892

Quadro 4.2 – Perdas de carga e energia de pressão na conduta de alimentação em Aço

H (m)	h (m)	Q _D (L/min)	q (L/min)	Q (L/min)	Re	λ	J (m/m)	U (m/s)	ΣΔH _c (m)	ΣΔH _L (m)	ΣΔH (m)	H _b = P/γ (mca)
1.0	4.0	12.725	1.995	14.720	11754	0.0327	0.0167	0.174	0.100	0.0014	0.101	0.899
1.0	5.0	13.495	1.615	15.110	12066	0.0327	0.0175	0.178	0.105	0.0015	0.107	0.893
1.0	6.0	14.636	1.330	15.966	12749	0.0323	0.0193	0.187	0.116	0.0016	0.118	0.882
1.0	7.0	14.631	1.095	15.726	12557	0.0323	0.0187	0.184	0.112	0.0016	0.114	0.886
1.0	8.0	15.026	0.950	15.976	12757	0.0323	0.0194	0.188	0.116	0.0016	0.118	0.882

Nos quadros anteriores h representa a altura de elevação, Q_D e q o caudal descarregado e o caudal de elevação (subcapítulo 3.6 alínea f). Q é o caudal total de alimentação ($Q = Q_D + q$), Re é número de Reynolds e λ é fator de atrito determinado com base na fórmula de Colebrook-White. A velocidade U é velocidade média pela Eq. 12.

As quantidades de água elevada em cada variação da altura de alimentação são apresentados na Figura 4.2. Os valores são diferentes entre a conduta de alimentação rígida e elástica, por causa das diferentes características físicas entre ambos os materiais.

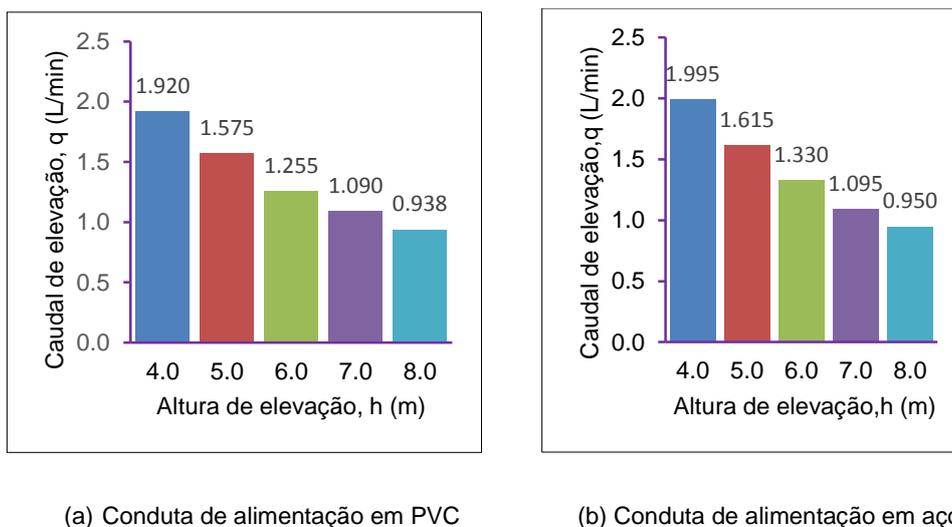


Figura 4.2 – Caudais de elevação em função da altura de elevação, para conduta de alimentação em PVC e em aço galvanizado

Verifica-se que, com uma conduta de alimentação em material rígido (aço galvanizado), a bomba consegue elevar uma maior quantidade de água na conduta de elevação, em comparação com o material elástico (PVC). Estes resultados podem ser explicados pelo facto do módulo de elasticidade do aço ($E = 210 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ ou 210 GPa) ser muito superior ao do PVC ($E = 3,10 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ ou 3,1 GPa). Com efeito, sabe-se que quanto maior for o módulo de elasticidade do material da conduta, maior é o valor da celeridade das ondas de choque e mais intenso é o fenómeno do choque hidráulico. Por outras palavras, um material mais rígido não absorve o impacto do choque hidráulico tão bem como um material elástico, pelo que o escoamento sofre um maior aumento de pressão.

4.2. ESTUDO DA RELAÇÃO ENTRE O CHOQUE HIDRÁULICO E A PRESSÃO NO ESCOAMENTO

O aumento de pressão devido ao choque hidráulico depende de vários fatores, nomeadamente: tipo e características dos materiais da conduta de alimentação, velocidade e tempo de manobra da válvula.

Ao se utilizarem condutas fabricadas em dois materiais diferentes (PVC e aço galvanizado), mas com o mesmo diâmetro e comprimento, pretendeu-se obter resultado experimentais que permitissem uma análise comparativa sobre o tipo de material que torna a bomba mais eficiente.

4.2.1. CONDOTA EM PVC

A conduta em PVC tinha as seguintes características: diâmetro 25 mm, comprimento 6,0 m, espessura 3,5 mm e módulo de elasticidade (E) $3,1 \times 10^9 \text{ N/m}^2$. Foi ancorada apenas na extremidade de montante com parâmetro adimensional, $C = 0,75$ (Eq.12).

O fluido escoado (água) tem, por sua vez, as seguintes características: massa específica 1000 kg/m^3 e Módulos de elasticidade (ϵ) $= 1,96 \times 10^9 \text{ N/m}^3$. (Quadro 2.3).

A velocidade da propagação da onda ou celeridade é $660,82 \text{ m/s}$, calculada pela Eq.14.

No Quadro 4.3, indicam-se os valores do choque hidráulico e as pressões para cada altura de elevação, tendo em conta a ocorrência de uma manobra rápida, sendo o tempo da manobra menor do que o tempo de fase ($T < T_f$).

Quadro 4.3 – Características do choque hidráulico e pressões na conduta de alimentação em PVC

h	U = ΔU	T _f	$\Delta H = P/\gamma$	P (N/m ²)	P (bar)	P ¹ (bar)
4	0.164	0.018	11.07	108611.3	1.09	0.60
5	0.174	0.018	11.69	114674.8	1.15	0.70
6	0.171	0.018	11.51	112896.1	1.13	0.80
7	0.176	0.018	11.84	116129.9	1.16	0.90
8	0.180	0.018	12.11	118769.0	1.19	1.00

U: correspondente pela U no Quadro 4.1.

P¹: pressão medida pelo manómetro no tubo saída da bomba.

4.2.2. CONDOTA EM AÇO GALVANIZADO

A conduta em aço galvanizado tem as seguintes características: diâmetro 25 mm, comprimento 6,0 m, espessura 3,0 mm, e módulo de elasticidade (E) $210 \times 10^9 \text{ N/m}^2$. A conduta foi ancorada apenas na extremidade de montante ($C = 0,855$, calculado pela Eq. 15). O fluido escoado (água) tem as características apresentadas no subcapítulo anterior.

A velocidade da propagação da onda de choque ou celeridade é 1355,65 m/s, calculada pela Eq. 14. No Quadro 4.3 indicam-se alguns valores característicos do choque hidráulico e das pressões para cada altura de elevação, admitindo também uma manobra instantânea (ou rápida) em que o tempo da manobra é menor do que o tempo de fase ($T < T_f$).

Quadro 4.4 – Características do choque hidráulico e pressões na conduta de alimentação em aço galvanizado

h	U = ΔU	T _f	$\Delta H = P/\gamma$	P (N/m ²)	P (bar)	P ¹ (bar)
4	0.174	0.009	24.03	235702.0	2.36	0.60
5	0.178	0.009	24.64	241753.1	2.42	0.70
6	0.187	0.009	25.88	253895.8	2.54	0.80
7	0.184	0.009	25.49	250053.1	2.50	0.90
8	0.188	0.009	25.93	254334.9	2.54	1.00

U: correspondente com **U** no Quadro 4.2.

P¹: pressão medida pelo manómetro no tubo saída da bomba.

4.3. VÁLVULA DE ESCAPE E NÚMERO DE BATIDAS

Na Figura 4.3 e Figura 4.4, apresenta-se a relação entre o número de batidas e o caudal elevado, para cada conduta de alimentação. A quantidade máxima de água elevada ocorre para cerca de 60 batidas por minuto. Se a mola for regulada de modo a permitir uma excursão maior da válvula, os batimentos são mais espaçados e mais fortes até ao limite de energia potencial na entrada da válvula, altura em que os batimentos acabam por parar. Neste caso, a quantidade de água que entra no RAC a partir da válvula de admissão é maior por batida, mas é também maior o intervalo de tempo, por isso a quantidade de água elevada por minuto é menor. Por outro lado, se a mola for mais alargada, os batimentos tornam-se mais rápidos e diminui a força de cada batimento até ao limite máximo de abertura da válvula, no qual os batimentos vão parar. Neste caso a quantidade de água que entra no RAC a partir da válvula de admissão é menor por batida e é também menor o intervalo do tempo, por isso o caudal bombeado por minuto é menor.

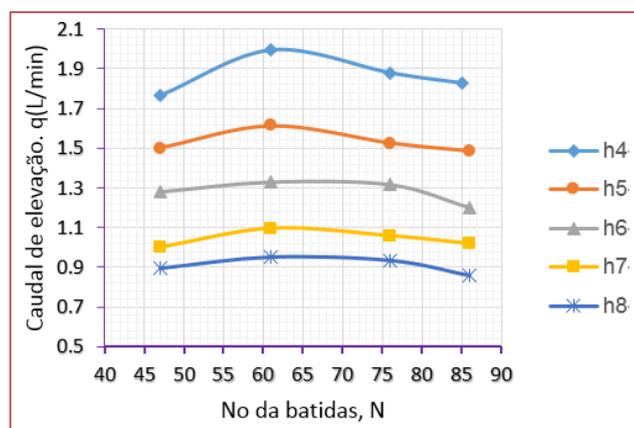


Figura 4.3 – Variação do caudal elevado com o número de batidas (conduta de alimentação em aço Galvanizado).

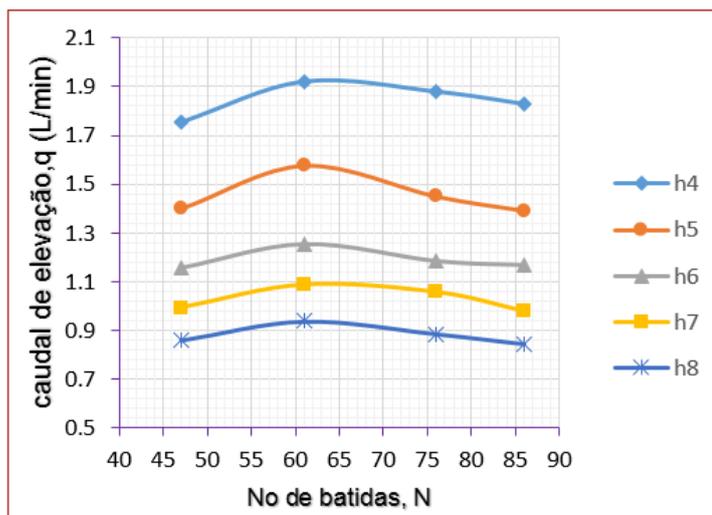


Figura 4.4 – Variação do caudal elevado com o número de batidas (conduta de alimentação em PVC).

4.4. RESERVATÓRIO DE AR COMPRIMIDO

4.4.1. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Apresentam-se os resultados obtidos a partir dos trabalhos realizados em laboratório. Na instalação usaram-se os quatros grupos de RAC referidos anteriormente, todos com uma altura de elevação de 4.0 m e conduta de alimentação em PVC com 6.0 m de comprimentos. O objetivo foi saber qual é o tamanho do RAC que permite o máximo caudal de elevação e o mínimo caudal de descarga e sem vibrações que comprometam a integridade da bomba.

De seguida apresentam-se os resultados obtidos cada grupo de RAC:

- a. Primeiro grupo de RAC: todos com diâmetro 25 mm mas com alturas de 0, 20, 40, 60, 80 e 100 cm Figura 4.5. No início do trabalho experimental, colocou-se a bomba a funcionar sem RAC, o que é possível, sendo o caudal elevado apenas com a variação instantânea da pressão, mas verificou-se que o caudal de elevação era apenas 0,814 L/min, quando com os RAC ele pode subir para um valor máximo de 1,897 L/min com o RAC nº 4, diminuindo lentamente se a altura do RAC continuar a aumentar. Nesta configuração, é possível perceber a variação e a limitação de altura do RAC no funcionamento do sistema.

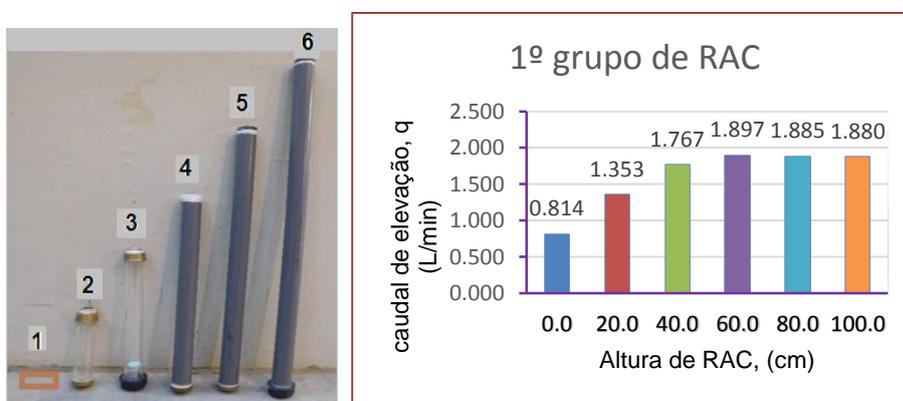


Figura 4.5 – Primeiro grupo de RAC e caudal de elevação

- b. Segundo grupo de RAC: todos com uma altura de 60 cm (valor do RAC com melhor desempenho no primeiro grupo) e com diâmetros distintos, o que resulta em volumes a partir de 0,051 litros (sem o corpo de RAC) aumentando gradualmente até 1,137 litros valor que resulta no maior caudal de elevação 1,920 L/min Figura 4.6. Nesta configuração é possível que o caudal ainda aumente se o diâmetro de CAR continuar aumentando.

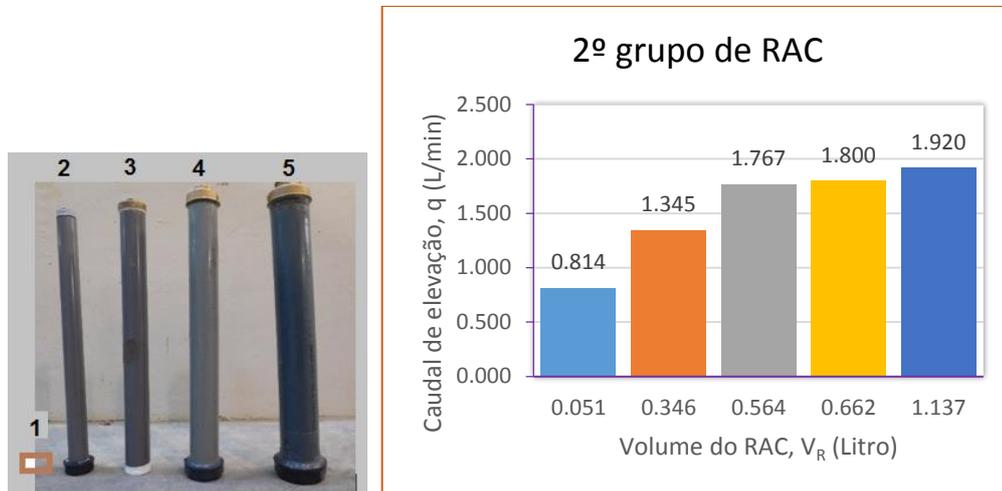


Figura 4.6 – Segundo grupo de RAC e caudal de elevação

- c. Terceiro grupo de RAC: Manteve-se o volume de 0,564 litros de volume, correspondente ao RAC com melhor desempenho no primeiro grupo, e variou-se os diâmetros Figura 4.7. O caudal de elevação máximo encontra-se no RAC nº 2, com 60 cm de altura e 33 mm de diâmetro. Neste caso, a melhor configuração de diâmetro e altura corresponde ao RAC nº 2 assim como no primeiro grupo.

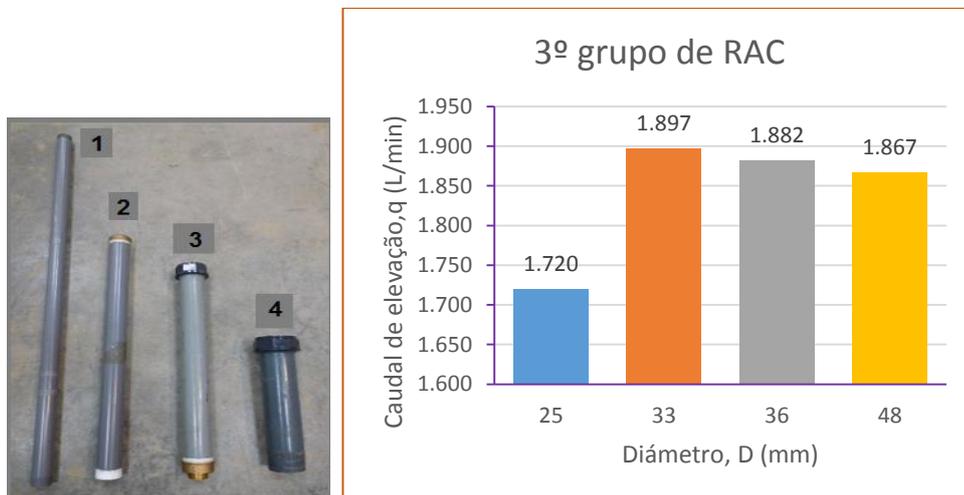


Figura 4.7 – Terceiro grupo de RAC e caudal de elevação

- d. Quarto grupo de RAC Figura 4.8: por uma questão de rápida aplicação em zonas sem recursos materiais próximos, fez-se ainda o estudo de RAC materializados com garrafas transparentes com vários volumes para, por um lado, continuar o estudo da segunda configuração de RAC Figura 4.6 e por outro, para medir a proporção volume ar e volume de água dentro no RAC.

Verificou-se que, aumentando o volume até 3,536 litros, o máximo caudal de elevação encontra-se entre 1,106 e 1,671 litros, começando a descer de forma linearmente estável.

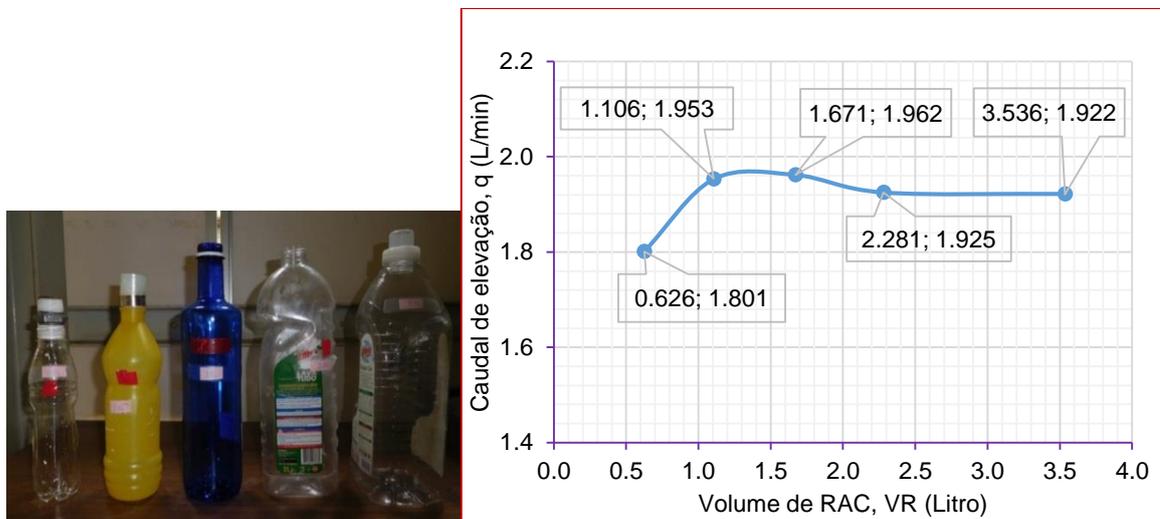


Figura 4.8 – Quarto grupo de RAC e caudal de elevação

4.4.2. COMPARAÇÃO COM RAC RECOMENDADOS NA BIBLIOGRAFIA

Os resultados deste trabalho experimental foram comparados com recomendações publicadas na bibliografia da especialidade:

Watt, S. B, (1975) [16] refere que o volume de RAC deve ser aproximadamente igual ao volume de água dentro do tubo de elevação, Neste caso em específico:

- ✓ O volume de água dentro do tubo de elevação é 1,506 litros.
- ✓ Os resultados experimentais Figura 4.8 indicam que o máximo caudal de elevação, 1,962 L/min, se verifica para o RAC com um volume de 1,671 litros, 11% superior à recomendação de Watt.

Cleghorne (1919) [12], recomenda um volume de RAC cerca de duas vezes o volume de água no altura vertical do tubo de elevação ou desnível entre a secção de saída do tubo de elevação e a válvula de escape. No presente caso:

- ✓ Duas vezes o volume de água dentro do tubo de elevação vertical iguala $2 \times 1,018 = 2,036$ litros.
- ✓ Mais uma vez, o caudal máximo de elevação (é 1,962 litros/min (no RAC com volume 1,671 litros), 18 % abaixo da recomendação de Cleghorne.

Krol (1951) [12], afirma que o volume do RAC deve ser 100 vezes o volume de água fornecida por ciclo. Verificou-se no presente trabalho experimental que:

- ✓ No estudo da válvula de escape, Figura 4.3 e Figura 4.4, o número de batidas que resulta na máxima quantidade de água elevada é aproximadamente 60 batidas por minuto, ou seja, uma batida por segundo.
- ✓ Neste caso, sendo o caudal máximo de elevação 1,962 L/min (no RAC com volume 1,671 litros), então o volume de água por ciclo é aproximadamente 0,033 litros. O volume de RAC 100 vezes o volume de água por ciclo seria 3,30 litros. Esta recomendação resultaria num RAC 49% superior.

4.5. RENDIMENTO

Para saber como varia o rendimento da bomba de ariete, foi feito o estudo deste parâmetro variando a proporção altura de alimentação e a altura de elevação: $H/h = 1/4, 1/5, 1/6, 1/7$ e $1/8$ Figura 4.1.

Os rendimentos obtidos estão apresentados Quadro 4.5 e foram calculados pelas equações Eq.60, Eq.61 e Eq.62. O caudal de alimentação (Q) é o somatório do caudal de elevação (q) e do caudal descarga (Q_D) na válvula de escape, se for aumentar a altura de elevação diminuir o caudal de elevação e aumentar o caudal descarregar, ver Quadro 4.5.

Quadro 4.5 – Rendimento da bomba de ariete

	H	h	q	Q _D	Q	%q	Rendimento, η		
							η_D	η_R	η_C
Conduto de alimentação em Aço	1.0	4.00	1.995	12.725	14.720	13.6	59.9	53.6	69.3
	1.0	5.00	1.615	13.495	15.110	10.7	59.4	54.5	66.5
	1.0	6.00	1.330	14.636	15.966	8.3	56.2	52.2	61.3
	1.0	7.00	1.095	14.631	15.726	7.0	54.6	51.2	58.7
	1.0	8.00	0.950	15.026	15.976	5.9	53.5	50.6	56.9
Conduto de alimentação em PVC	1.0	4.00	1.918	12.113	14.031	13.7	59.6	53.2	69.1
	1.0	5.00	1.575	13.354	14.929	10.5	58.0	53.0	64.8
	1.0	6.00	1.255	13.421	14.676	8.6	56.4	52.3	61.7
	1.0	7.00	1.090	14.052	15.142	7.2	55.7	52.2	60.0
	1.0	8.00	0.938	14.570	15.508	6.1	53.8	50.9	57.3

De entre os três métodos de definição do rendimento, o proposto por *Rankine* apresenta valores de rendimento mais baixos do que o de *D'Aubussion* e do que o definido pelos fabricantes, que dos três é o que apresenta valores mais elevados.

A definição do rendimento é a energia potencial na saída, dividida pela energia potencial na entrada, que dependente da altura e do caudal. Analisando o princípio de cada método, no caso de estudo desenvolvido nesta dissertação decidiu-se utilizar o método de *D'Aubussion* para o dimensionamento do sistema.

5

PROJETO DE APLICAÇÃO DA BOMBA DE ARIETE NO SUCO TUTUALA

5.1. INFORMAÇÕES GERAIS SOBRE O SUCO TUTUALA

O Suco Tutuala é um dos 2 sucos do subdistrito de Tutuala, localizado a leste do distrito de Lautem, a cerca de 300 km da capital de Timor Leste, Dili Figura 5.1.



Figura 5.1 – Localização do local de aplicação

O suco Tutuala tem 4 aldeias com 1652 habitantes (sensos do suco registados em 2010). Geograficamente localizado no topo de zonas montanhosas, é um local difícil para obter fontes de recursos de água. Em cuco Tutuala existem apenas duas fontes de água, a fonte de Cene e a fonte de Came. Estas fontes não são suficientes para abastecer nem mesmo as necessidades domésticas. Por isso, algumas famílias escolhem viver em grupos nas zonas baixas, na proximidade de cursos de água para viverem da vida agrícola. Em relação às condições topográficas, algumas destas zonas permitem um abastecimento gravítico mas outras precisam de sistemas de elevação.

Com base nas observações do autor, no mês de julho 2015, constata-se que existem vários locais nesta e noutras zonas rurais que podem usar a bomba de ariete para elevar a água até às comunidades, para que as necessidades das populações sejam garantidas. Um dos locais assinalados para a instalação deste sistema é um grupo de 12 famílias (84 pessoas) da aldeia Pitilete instaladas a cerca de 250 m da fonte de água Cene.

5.2. LOCAL DO PROJETO E OS DADOS PARA DIMENSIONAMENTO

A aldeia de Pitilete é uma das 4 aldeias do suco Tutuala, sub-distrito Tutuala que pertence ao distrito de Lautem. Na Figura 5.2 está indicado o local de projeto em que se planeia construir uma rede de abastecimento de água com sistema elevatório materializado por uma bomba de ariete.

Neste grupo, a comunidade é composta por 12 casas de família (84 habitantes) no ano de projeto 2015, que se estima aumentar para 100 habitantes no ano horizonte (2025). Tendo em conta a quantidade de água na fonte e a capacidade do bombeamento, a utilização de água neste fornecimento será para já exclusivamente para garantir as necessidades básicas dos consumidores.

Outros dados necessários para dimensionamento da rede foram recolhidos no local:

- O caudal médio na fonte no mês de novembro (altura em que se registam os valores mínimos) é de 15 L/s;
- A cota topográfica da alimentação ($Z_a = +262$ m);
- Cota de instalação da bomba ($Z_b = +252$ m);
- Cota de instalação do reservatório de armazenamento ($Z_r = +287$ m);
- Comprimento máximo da conduta de alimentação ($L_{max} = 50$ m);
- Comprimento da conduta de elevação ($L_e = 260$ m).

Na Figura 5.2 e na Figura 5.3 indicam-se as informações gerais da fonte, alimentação, ponto de instalação da bomba e local de armazenamento.

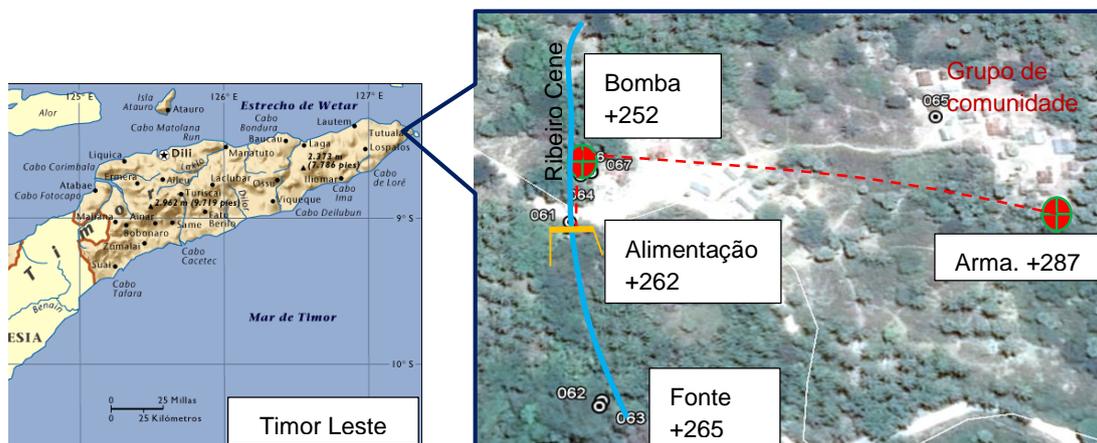


Figura 5.2 – Local do projeto

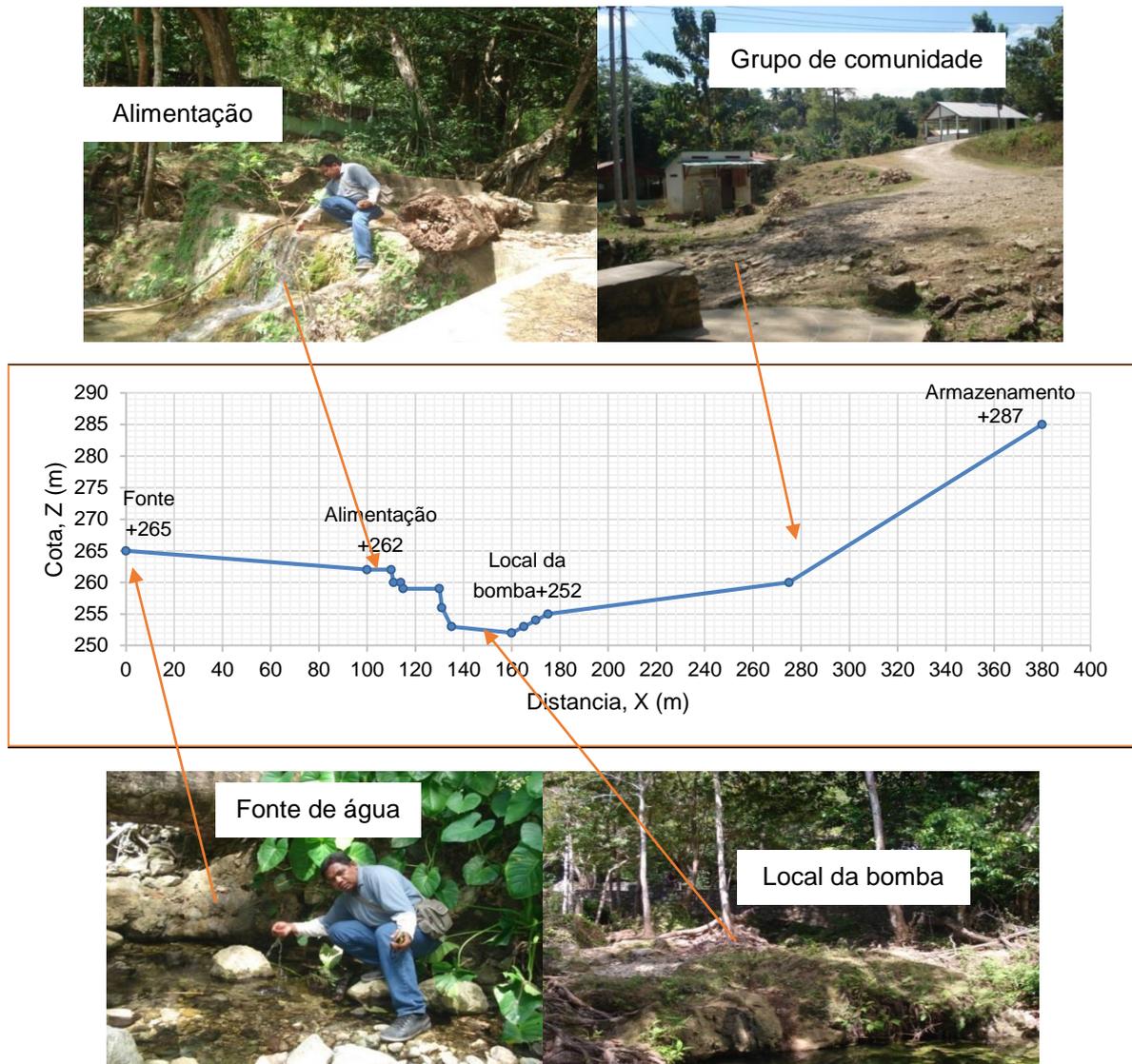


Figura 5.3 – Perfil global da rede

5.3. DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA

A especificação do sistema deste projeto engloba o dimensionamento da conduta de alimentação, da conduta de elevação, da bomba de ariete, e do reservatório de armazenamento e baseia-se nas informações recolhidas no local e nas especificações apresentadas nos subcapítulos seguintes.

5.3.1. CRITÉRIOS DE DIMENSIONAMENTO

O correto funcionamento da bomba de ariete obriga ao cumprimento dos seguintes requisitos [21]:

- A quantidade mínima de água bruta na fonte de alimentação deve ser suficiente para o funcionamento da bomba, sem colocar em causa as condições ambientais e ecossistemas a jusante;
- A quantidade de água na fonte deve ser, no mínimo 0,50 L/s, contínua ao longo do ano;

- O uso de água da fonte de alimentação ser autorizado pelas autoridades competentes e com permissão formal da comunidade, ou do proprietário caso seja instalada em terrenos particulares.
 - A fonte de água deverá estar a uma altura vertical suficiente para alimentar a bomba e elevar o caudal de consumo até ao armazenamento;
 - A bomba não deve ser instalada em áreas inundáveis, de deslizamentos de terra ou de prováveis erosões;
 - A Potência de elevação da bomba de ariete deverá ser, no máximo, até 15 vezes a altura de alimentação, sendo o valor ideal de 6 vezes a altura de alimentação;
 - Quando o caudal de elevação é maior do que a capacidade de uma bomba, devem ser instaladas duas ou mais bombas em paralelo;
 - A instalação da bomba de ariete não deve interferir com os outros sistemas existentes;
- No presente caso de estudo, e nas áreas indicadas para instalação do sistema e da bomba, as condições descritas são cumpridas.
- Para uma pré-seleção dos parâmetros a instalar e definição dos componentes da bomba, foram consultados os dados apresentados no Quadro 2.1, nomeadamente quanto à capacidade da bomba.

Teve-se ainda em conta as indicações do subcapítulo 2.3.3, em que se refere que o diâmetro da conduta de elevação está entre 1/3 a 1/2 do diâmetro da conduta de alimentação.

O caudal de dimensionamento considerado, foi calculado de acordo com as características da população a abastecer:

- Capitação para zonas rurais (30 a 60) L/hab/dia [21]
- Fator de ponta diária, $f_{p,diária} = 1,1$ a $1,15$ [21]

5.3.2. AS GRANDEZAS DE LABORATÓRIO E AS GRANDEZAS DE PROJETO

- a. Resultados experimentais do trabalho laboratorial com o tubo de alimentação em aço:
- Altura de alimentação, $H_m = 1,0$ m
 - Altura de elevação, $h_m = 4,0$ m
 - Diâmetro da conduta de alimentação, $D_m = 25$ mm
 - Diâmetro da conduta de elevação, $d_m = 19$ mm
 - Caudal de elevação, $q_m = 1,995$ L/min
 - Caudal descarga, $Q_m = 12,725$ L/min
 - Rendimento de D'Aubuisson, $\eta_D = 60$ %
- b. Valores de projeto:
- Caudal de alimentação disponível no local: 0,50 L/s (30 L/min).
 - Altura de alimentação máxima: $H = 10,0$ m;
 - Altura de elevação: $h_p = 35$ m (nível de água no armazenamento);
 - Comprimento da conduta de alimentação, $L_A = 25$ m;
 - Comprimento da conduta de elevação, $L_E = 260$ m (necessária até ao armazenamento);
 - Conduta de alimentação em aço galvanizado;
 - Conduta de elevação em PEAD;
 - Temperatura média da água $t = 15^\circ\text{C}$ (estimativa).
 - O caudal total de elevação é o consumo diário medio anual com fator de ponta e mais 20% para rega com capitação 45 L/hab/dia e fator de ponta 1.15 $q_r = (C_{DM} A \times f_{p,diária}) + 20\%$ (rega) $\approx 4,313$ L/min

5.3.3. CONDUTA DE ELEVAÇÃO

Tendo em conta que o caudal de alimentação não é abundante, definiu-se que o caudal de elevação seria apenas o necessário para consumo diário medio anual com o fator de ponta diária e 20% para rega, $q_{r,p} = 4,313$ L/min, pelo que o diâmetro correspondente será 1/2 vezes o diâmetro da conduta de alimentação $d_p = 25$ mm e o valor de rugosidade do tubo para o material definido (PEAD) será $k = 1$ mm.

A altura de elevação para o caudal definido, considerando escoamento permanente, pode ser calculada pelos valores do Quadro 5.1:

Quadro 5.1 – Altura de elevação, h_b

Grandezas	Símbolo	Referências	Resultados
A viscosidade cinemática	ν	(Eq.9)	1.145×10^{-6} m ² /s
Número de Reynolds	Re	(Eq.8)	3199
Coefficiente de atrito	λ	(Eq.11)	0.0721 m
As perdas de carga unitária	J	(Eq.6)	0.00315 m/m
Perdas de carga continua	ΔH_c	(Eq.5)	0.819 m
Perdas de carga localizadas	ΔH_L	0.1 ΔH_c	0.082 m
Perdas de carga total	hf_E	(Eq.4)	0.901 m
Altura de elevação efetivo	h_b	$h + hf_E$	35.901 m

5.3.4. CONDUTA DE ALIMENTAÇÃO E CAPACIDADE DA BOMBA

Tendo em conta as condições topográficas no local de projeto, considerou-se mais favorável em termos económicos e de segurança, escolher a altura de alimentação, $H = 10,0$ m desde a válvula de escape até ao nível mínimo da superfície da água na alimentação. O comprimento total da conduta será 25,0 m (critério de Calvert, Eq.3), instalada com ancoragens para evitar qualquer deslocamento longitudinal e, de acordo com a Eq.16, $C = 0,92$.

Para minimizar a flexibilidade e com isso aumentar a altura do choque hidráulico, a conduta será em material rígido (em aço galvanizado) e o diâmetro interior será 25 mm, com espessura maior ou igual a 3 mm.

Com as informações registadas no subcapítulo 5.3.2., obteve-se a entre as grandezas no modelo e no protótipo, usada para verificar o diâmetro escolhido Quadro 2.1.

Relação caudal e diâmetro no modelo e no protótipo: $\frac{q_m}{q_{r,p}} = \frac{D_m}{D_p}$, $D_p = D \approx 50$ mm,

- Relação altura de alimentação e elevação no modelo e no protótipo:

$$\frac{H_m}{H_p} = \frac{h_m}{h_p}, H_p = 8,975 \approx 10,0 \text{ m}$$

No momento em que o escoamento saído a partir da válvula de escape atinge a velocidade máxima, o escoamento é considerando permanente $du/dt = 0$ e a velocidade de escoamento na conduta iguala a velocidade na válvula, $U = U_0$. Nestas condições, a força de água na secção da válvula é praticamente igual e a válvula vai fechar, sendo $F_D = W$ (o peso da válvula inclui a força da mola $W = 1,75$ kg (17,7 N), o coeficiente arrasto (drag), $C_D = 1,12$ e a secção projetada do escoamento na válvula, $A_v = 0,005675$ m²).

Quadro 5.2 – Altura de alimentação efetiva, H_b e caudal de alimentação

Grandezas	Símbolo	Referencias	Resultados
A velocidade do escoamento enquanto a válvula vai fechada ($F_D \approx W$)	U_o	(Eq.25)	1.03 m/s
Número de Reynold	Re	(Eq.8)	44978 (turbulento)
Coeficiente de atrito	λ	(Eq.10)	0.0217 m
Perdas de carga continua	ΔH_c	(Eq.12)	0.587 m
Perdas de carga localizadas	ΔH_L	$0.1\Delta H_c$	0.059 m
Perdas de carga total	h_{f_A}	(Eq.4)	0.646 m
Altura de elevação efetivo	H_b	$H - h_{f_A}$	9.354 m
Caudal de descarregar	Q_D	(Eq.61)	23.276 L/min
Caudal de alimentação	Q	$Q_D + q_r$	27.598 L/min

O caudal total de alimentação, 28 L/min, é aproximadamente o necessário para cumprir com os requisitos pré-definidos que são apresentadas no Quadro 2.1 e é menor do que o caudal disponível na alimentação (30 L/min). A fonte de alimentação vai, assim fornecer 28 L/min à bomba de ariete, em que 4,313 L/min serão elevados e o resto descarregado.

As especificações definidas para a bomba (Figura 5.4):

- a. O diâmetro de entrada do corpo da bomba (duas vezes o diâmetro da conduta de alimentação), $D_b = 100$ mm;
- b. Diâmetro da conduta de elevação (1/2 vezes o diâmetro da conduta de alimentação), $d = 1$ polegada (25 mm).
- c. De acordo com a recomendação de Krol (1951), o volume de RAC deve ser cerca de 100 vezes o volume de água fornecida por cada ciclo, pelo que
 - $V_R = 100 \times q_{ciclo} \approx 7,2$ litros ($q_{ciclo} = q_r/60$)
 - Material do RAC em tubo aço galvanizado com ($t = 3$ mm) 100 mm de diâmetro e 92 cm de altura.
- d. Diâmetro do tubo de saída para a junta na conduta de elevação: 25 mm.
- e. Válvula de escape com 85 mm de diâmetro e 1,75 kg de peso próprio incluindo a força da mola;
- f. Válvula de admissão com 100 mm de diâmetro, do tipo de Flexible ruber washer Figura 2.9a.
- g. Base em aço L 100.100.7 soldada no corpo da bomba e ancorada na fundação.

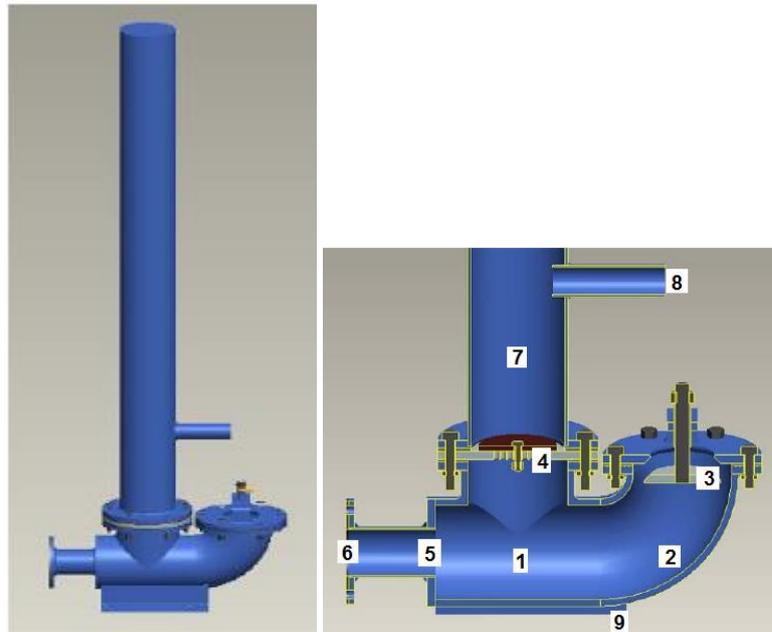


Figura 5.4 – Tipo da bomba dimensionado

1. Tee 4"
2. Cotovelo 90° 4"
3. Válvula de escape/impulso (fabricação) R = 85 mm e peso 1,75 kg
4. Válvula de admissão do tipo Flexible ruber washer
5. Redução 4" x 2"
6. Entrada de conduta de alimentação 2,0"
7. RAC com 4" (7,2 litros) de volume
8. Tubo de saída para elevação 1,0"
9. Base em aço L 100.100.7

5.3.5. ARMAZENAMENTO

A capacidade de armazenamento foi determinada com base nas quantidades de água afluyente e nas necessidades de abastecimento, para um dia médio. Neste caso a bomba de ariete vai funcionar durante 24 horas elevando o caudal 4,313 L/min (6211 L/dia) e as utilizações de acordo com as percentagens de flutuação por dia, Anexo A - 4.

A Figura 5.5 representa a regularização necessária neste caso de estudo. Verifica-se que a capacidade de armazenamento, sendo o somatório entre os valores *a* e *b* da figura, terá de ser igual a 1718 litros ($\approx 2.0 \text{ m}^3$),

Preconiza-se assim um reservatório com secção circular, diâmetro interno de 1,50 m, altura de água 1,20 m, espaço livre entre superfície e plataforma 0,20 m e tubo de saída 0,20 m acima do fundo.

O uso da água armazenada será feito por um sistema comum, com torneiras públicas que poderão servir um máximo de seis casas.

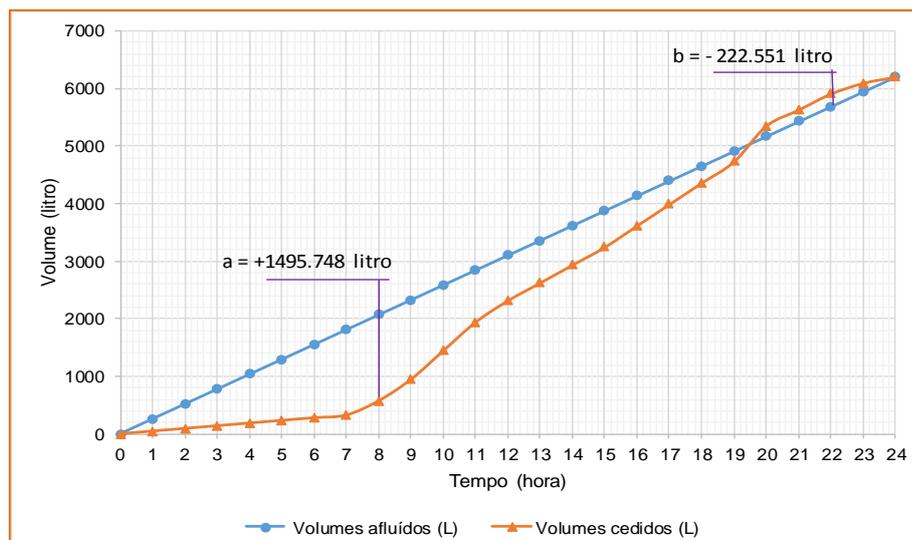


Figura 5.5 – Regularização de transporte [quadro de computação em anexo]

5.4. TAREFAS E CUSTOS DA INSTALAÇÃO

Para construir o sistema aqui projetado, com bomba de ariete na aldeia Pitilete suco Tutuala, as seguintes tarefas e materiais serão necessários (com os correspondentes custos resumidos no Quadro 5.3):

- Execução da captação (reservatório de alimentação): cimento, areia, cofragens e mão-de-obra para regularização do terreno e execução do reservatório.
- Instalação da conduta de alimentação: tubos em aço galvanizado 50 mm ($e \geq 3$ mm), acessórios, e mão-de-obra.
- Bomba e fundação: bomba, cimento, aço L.100.100.7, acessórios, porcas e anilhas, areia e mão-de-obra.
- Execução de ancoragens: cimento, areia e mão-de-obra.
- Sistema de abastecimento a jusante do armazenamento: tubagens, acessórios, mão-de-obra.

Quadro 5.3 – Custos da construção do sistema

No.	Materiais	Preço (USD)
I	Captação (reservatório de alimentação)	250.00
II	Conduta de alimentação	350.00
III	Bomba	350.00
IV	Ancoragens	250.00
V	Conduta de elevação	570.00
VI	Armazenamento	650.00
VII	Distribuição	300.00
VIII	Drenagem	150.00
IX	Mobilização	250.00
X	Mão-de-obra	1500.00
Custo total (USD) =		4620.00

5.5. MONTAGEM, MONITORIZAÇÃO E MANUTENÇÃO

A energia que faz a bomba funcionar tem origem na conduta de alimentação, pelo que ela tem de ser instalada cuidadosamente, de acordo com as especificações técnicas de dimensionamento, e cada conexão deve ser reforçada com betão, ancorada contra qualquer deslocamento, e não se deve mover ou agitar devido ao choque hidráulico.

Na extremidade inicial (superior) deve-se instalar um crivo, que deverá ficar pelo menos 30 cm abaixo do nível da água e 10 cm acima do fundo.

O corpo da bomba deve ser montado em cima de uma base plana, horizontal e devidamente fixada no solo. Para referência futura na execução do sistema, apresenta-se uma lista

Quadro 5.4 de várias falhas na montagem da bomba de ariete e respetivas soluções.

Quadro 5.4 – Registo de falhas e possíveis soluções [21]

Problemas ou falhas	As Causas Prováveis	Soluções
Bomba não funciona automaticamente no início quando a válvula de escape está aberta.	<ol style="list-style-type: none"> 1. A água na conduta de alimentação não é suficiente para produzir a pressão na bomba. 2. Fugas na conduta de alimentação. 3. Válvula de admissão não está operacional. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Operar manualmente até a bomba começar funcionar bem automaticamente 2. Reparar a conduta de alimentação. 3. Reparar a válvula de admissão. 4. Reparar a conduta de alimentação
Bomba arranca, faz batidas rápidas e depois para.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Existência de ar dentro no tubo de alimentação. 2. Válvula de escape não está bem ajustada. 3. Pressão de elevação insuficiente para manter o funcionamento da válvula. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Retirar o ar existente no tubo de alimentação. 2. Apertar ou prolongar a mola da válvula de escape 3. Bombear manualmente até que a válvula comece a funcionar.
A bomba funciona de forma desigual e lenta, eventualmente parando.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Existência de ar no tubo de alimentação. 2. Fugas no tubo de alimentação ou a bomba está a permitir a entrada de ar. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Purgar o ar do tubo de alimentação. 2. Vedar o tubo de alimentação ou a bomba.
A bomba funciona normalmente mas depois para.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Enquanto o tubo de elevação enche pode haver alguns pontos em que a água não consegue recuar durante um ciclo, e deste modo a válvula de escape não consegue reabrir. 2. Escoamento de alimentação insuficiente devido à diminuição do nível da superfície de água no reservatório de alimentação. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Realizar uma operação manual até a válvula reabrir e começar a funcionar automaticamente. 2. Reduzir o batimento da válvula de escape para a bomba utilizar menos água. Controlar o nível de água no tanque de alimentação.

Se a bomba instalada funciona sem problemas, então é apenas necessário uma inspeção a cada três ou quatro meses e, eventualmente, reforçar o aperto dos acessórios, porcas e parafusos, limpar o interior da bomba de sedimentos acumulados, e verificar as válvulas no sentido de detetar alguma fuga e/ou desgaste.

As válvulas devem ser lubrificadas duas vezes por ano, a bomba e outras partes expostas ao Sol devem ser pintadas uma vez por ano e as telas e outros locais de acumulação de sedimentos devem ser inspecionados conforme necessário.

6

CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

6.1. CONCLUSÕES

Após a realização do trabalho experimental para o estudo das características de funcionamento da bomba de ariete, a análise dos resultados obtidos e a comparação dos mesmos com as expressões teóricas e com outros trabalhos de investigação anteriores resultam nas seguintes conclusões:

- a. A bomba de ariete funciona exclusivamente com a energia da água, aproveitando o fenómeno do choque hidráulico produzido pela abertura e fecho repentino da válvula de escape. Salienta-se que, na instalação experimental, não houve qualquer fornecimento de energia elétrica, nem mesmo no arranque da bomba.
- b. Como o escoamento na conduta de alimentação é não permanente (varia ao longo do tempo), a análise do choque hidráulico que é, no fundo, o motor da bomba de ariete, é complexo. Como o tempo de execução deste estudo é limitado, não foi possível aprofundar esse tema e analisar a aplicabilidade/validade das expressões teóricas apresentadas na literatura da especialidade para descrever o fenómeno.
- c. O volume de água elevado para o reservatório de armazenamento depende dos seguintes fatores:
 - Rigidez dos materiais: a conduta de alimentação fabricada com um material rígido (aço galvanizado) permitiu bombear um caudal acerca de 4% superior ao bombeado utilizando um material elástico (PVC);
 - Altura de alimentação: a altura mínima não deve ser inferior 1,0 m de forma a assegurar uma velocidade do escoamento e/ou pressão adequados ao funcionamento do dispositivo, e tendo em conta o limite de resistência dos materiais do conduta e da bomba;
 - Números das batidas da válvula de escape: este parâmetro variou entre 45 batidas por minuto (limite abaixo do qual a pressão da mola superior é maior do que a pressão de água no tubo de alimentação, e a válvula passa a estar aberta), até 90 batidas por minuto (pressão da mola é inferior à pressão da água no tubo de alimentação, altura em que a válvula passa a estar fechada). No entanto, constatou-se que o número de batidas que resulta no caudal máximo é de cerca de 60 batidas por minuto (1 batida por segundo);
 - Tamanho do RAC: o tamanho do RAC não é fácil de determinar. Tendo por base este trabalho experimental, assim como recomendações anteriores, conclui-se que o volume do RAC deve ser aproximadamente igual ao volume de água contido dentro no tubo de elevação. Quanto maior for o comprimento do tubo de elevação, maior será o volume do RAC, devendo considerar-se o volume mínimo adequado.
Nos projetos de aplicação em que o comprimento da conduta de elevação é maior, será mais adequado utilizar a recomendação de Krol (1951).

- Diâmetro da conduta de elevação: está associado ao tubo de alimentação. Se for pequeno, terá elevadas perdas de carga, mas se for maior terá menor pressão e menos perdas de carga mas também menor velocidade. É um parâmetro que precisa de um estudo cuidado para encontrar o valor mais adequado.
- d. Rendimento: o rendimento da bomba foi calculado pelos três métodos (D'Aubuisson, Rankine e dos fabricantes), para se obter uma comparação de valores em proporção com as alturas de alimentação e de elevação (H: h = 1: 4, 1: 5, 1: 6, 1: 7 e 1: 8):
- O método de D'Aubuisson considera que o ponto de referência está no orifício da válvula de escape. Por este método obteve-se um rendimento variável entre 60% e 53% para a proporção de alturas entre 1:4 a 1: 8, respetivamente para a conduta de alimentação em aço galvanizado, e entre 59% e 53%, para a mesma proporção de alturas, com a conduta em PVC.
 - O método de Rankine considera que o ponto de referência está na superfície da fonte de alimentação. Por este método obtiveram-se rendimentos entre 54% e 50% na proporção de alturas 1: 4 a 1: 8, respetivamente, com a conduta de alimentação em aço galvanizado, e entre 53 % e 50 %, para a mesma proporção de alturas usando a conduta em PVC.
 - Os fabricantes consideram que o ponto de referência está no orifício da válvula de escape. Com este método, neste trabalho experimental, obtiveram-se rendimentos entre 69% e 57% na proporção de alturas 1:4 a 1: 8, respetivamente com a conduta de alimentação em aço galvanizado e entre 69% e 56% para a mesma proporção de alturas com a conduta em PVC.
 - Entre os três métodos, o método de D'Aubuisson foi o usado para dimensionar o sistema a aplicar na aldeia Pitilete suco Tutuala, em Timor-Leste.
- e. A teoria de análise das características por fases de funcionamento no subcapítulo 2.5.2.1. até 2.5.2.5 não foi utilizada na análise dos resultados experimentais nem no dimensionamento do projeto, devido à indefinição de alguns parâmetros que não foi possível determinar claramente neste trabalho.

6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Os problemas em estudo nesta dissertação de mestrado, relacionados com as características da bomba de ariete, embora aparentemente simples são complexos. Por esse motivo, é necessário continuar o presente estudo e apresentar desenvolvimentos específicos sobre as características de cada fase de funcionamento da bomba.

É também necessário desenvolver métodos para a correta definição das dimensões e da geometria do reservatório de ar comprimido, ou seja, para a definição do volume mais adequado para garantir a segurança e elevada eficiência na elevação do volume de água para consumo pretendido. De igual forma, o diâmetro da conduta de elevação precisa de uma definição mais específica e de se estudar o desempenho de outros materiais.

A criação de uma ferramenta de cálculo automático, para auxílio no pré-dimensionamento de um carneiro hidráulico, com base nas características locais e incluindo uma análise económica, é também um assunto que teria interesse desenvolver no futuro.

Além disso, e tendo em vista a realização de projetos melhor ajustados às condições locais, considera-se fundamental caracterizar devidamente os hábitos de consumo de água das populações que habitam em zonas rurais de países em desenvolvimento, como é o caso de Timor. Esses dados permitiriam a conceção e o dimensionamento de sistemas de elevação de água mais direcionados e otimizados para essas populações. Por último, tratando-se de uma instalação experimental de um carneiro hidráulico numa zona rural de Timor-Leste, preconiza-se a monitorização do funcionamento do sistema durante os primeiros anos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] – Concelho Ministro de Timor-Leste., *Plano Estratégico de Desenvolvimento Timor-Leste*, (2011 – 2030), Díli, 2011.
- [2] – Take. J. H. P. M., *Communications on Hydraulic and geotechnical engineering, Hydraulic Rams and Comparative Investigation*. Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering. Netherlands (March 1988).
- [3] – Mota M. Â., *Projeto de Carneiro Hidraulico Com Intregação de Energia Elétrica Proveniente de Fonte Renovável*, Dissertação de Mestrado, Instituto Politecnica de Viseu, 2014.
- [4] – <https://www.pinterest.com/ron1152/projects-to-try/>, 15/06/2016
- [5] – <http://atlaspub.20m.com/rampg.htm>, 15/06/2016
- [6] – <http://www.globalsources.com/si/AS/Wuhan-HT/6008848535731/pdtl/24hours-Farm-Agricultural-Hydraulic-Ram-Pump-Water-Pumping-Machine-System-Lift-More-Than-50ton-Pe/1082948590.htm>, 15/06/2016.
- [7] – http://www.alibaba.com/product-detail/Hydraulic-RAM-Water-Pump_11672608/showimage.html, 15/06/2016
- [8] – <http://alajuela-city.evisos.co.cr/bombas-de-ariete-id-23408>, 15/06/2016.
- [9] – <http://www.rampumps.net/> .28/04/2016.
- [10] – Netto. A., *Manual de Hidráulica*, Editora edgard blucher LTDA, 8ª edição atualizada, São Paulo Brasil, 1998.
- [11] – Watt, S. B., *A Manual on the Hydraulic Ram for Pumping Water*. Intermediate Tecnology Publications Ltd., London, 1981.
- [12] – Schiller E. J., *International Development Research Centre (IDRC), Manuscript Report. Proceedings of a Workshop on Hydraulic Ram Pump (Hydram) Technology*. Tanzania.1984.
- [13] – Marques J. A. A, Sousa J. J. O., *Hidráulica Urbana (Sistema de abastecimento de água e de drenagem de águas residuais)*, Universidade de Coimbra, 3ª edição atualizada, Coimbra Portugal, outubro 2011.
- [14] – Dardot J., *comportamento hidráulico de gotejadores pressurizados por carneiro hidráulico*. Trabalho da especialização, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2012.
- [15] – <http://www.minasbombas.com/produto/VALVULA-DE-RETENCAO-VERTICAL-Minas-Bombas/224/>, 15/06/2016
- [16] – John C., *Home Built Hydraulic Ram Pumps*, NW Independent Power Resources, North Bend, 2003
- [17] – https://pt.wikipedia.org/wiki/Golpe_de_ar%C3%ADete.31/05/2016
- [18] – <http://www.zillow.com/blog/what-is-water-hammer-89764/>, 15/06/2016
- [19] – Schiller E. J, Kahangire P., *Analysis and computerized model of the automatic hydraulic ram pump*, Journal, Department of Civil Engineering, University of Ottawa, Canada KIN 9B, 1984.
- [20] <http://revistagloborural.globo.com/vida-na-fazenda/noticia/2015/05/como-fazer-o-carneiro-hidraulico.html>, 2/07/2017.

[21] – Jeffery T. D., Thomas T. H., Smith A. V., Glover P. B., *Design, Sizing, Construction and Maintenance of Gravity-Fed System in Rural Areas* (Module 6 hydraulic ram pump), Department Technology Unit-Warwick University, Action Centre la Faim, Paris, 2005.

[22] – Dirtjen Cipta Karya, Kementerian Pekerjaan Umum., *Pedoman Penyediaan Air Minum Berbasis Masyarakat Pd-T-05-5-2005-C*, Jakarta Indonésia, 2005.

[23] – Joko T., *Unit Produksi dalam sistem Penyediaan Air Minum*, Graha Ilmu, Jakarta Indonésia, (2010).

ANEXOS

A - 1. FOTOGRAFIAS DO TRABALHO EXPERIMENTAL REALIZADO NO LABORATÓRIO DE HIDRÁULICA DA FEUP



Fig. A-1 – Ferramentas usadas

A - 2. DADOS E RESULTADOS DO TRABALHO EXPERIMENTAL

Quadro A-2a – Conduta de alimentação em Aço (25 mm de diâmetro)

Altura de elevação, h	Número das batidas, caudal de descarga e de elevação				
4 m	Número das batidas, N	47	61	76	85
	Caudal de descarregar, Q_D (L/min)	15.979	12.725	10.163	8.996
	Caudal de elevação, q (L/min)	1.763	1.995	1.87	1.827
5 m	Número das batidas, N	47	61	76	86
	Caudal de descarregar, Q_D (L/min)	16.079	13.495	10.854	9.498
	Caudal de elevação, q (L/min)	1.5	1.615	1.525	1.483
6 m	Número das batidas, N	47	61	76	86
	Caudal de descarregar, Q_D (L/min)	16.484	14.636	12.077	9.679
	Caudal de elevação, q (L/min)	1.28	1.33	1.317	1.2
7 m	Número das batidas, N	47	61	76	86
	Caudal de descarregar, Q_D (L/min)	16.358	14.631	12.006	10.584
	Caudal de elevação, q (L/min)	1.002	1.095	1.058	1.02
8 m	Número das batidas, N	47	61	76	86
	Caudal de descarregar, Q_D (L/min)	16.911	15.026	12.267	10.293
	Caudal de elevação, q (L/min)	0.895	0.95	0.933	0.86

Quadro A-2b – Conduta de alimentação em PVC (25 mm de diâmetro)

Altura de elevação, h	Número das batidas e caudal de descarga e de elevação				
4 m	Número das batidas, N	47	61	76	86
	Caudal de descarregar, Q_D (L/min)	16.333	12.113	10.233	18.000
	Caudal de elevação, q (L/min)	1.763	1.918	1.878	1.827
5 m	Número das batidas, N	47	61	76	86
	Caudal de descarregar, Q_D (L/min)	17.699	13.354	12.848	9.569
	Caudal de elevação, q (L/min)	1.400	1.575	1.450	1.392
6 m	Número das batidas, N	47	61	76	86
	Caudal de descarregar, Q_D (L/min)	16.507	13.421	10.722	12.248
	Caudal de elevação, q (L/min)	1.157	1.255	1.185	1.168
7 m	Número das batidas, N	47	61	76	86
	Caudal de descarregar, Q_D (L/min)	16.547	14.052	11.124	9.566
	Caudal de elevação, q (L/min)	0.993	1.090	1.058	0.978
8 m	Número das batidas, N	47	61	76	86
	Caudal de descarregar, Q_D (L/min)	16.863	14.570	11.050	9.864
	Caudal de elevação, q (L/min)	0.858	0.938	0.885	0.843

A - 3. MATERIAIS E FERRAMENTAS



Fig. A-3a – Ferramentas usadas

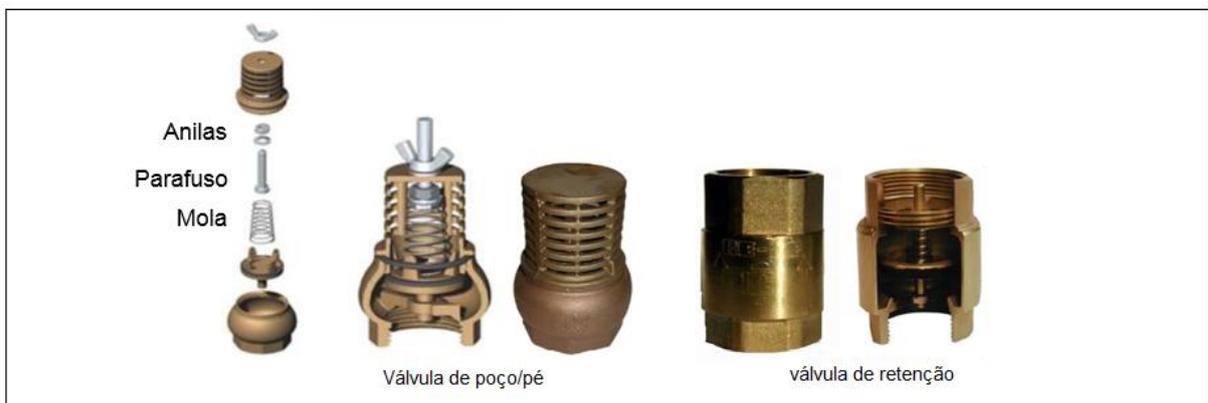


Fig. A-3b – Válvulas utilizadas

A - 4. CALCULO CAPACIDADE DE ARMAZENAMENTO

Quadro A-4a – Flutuação da utilização de água [23]

Período	Total da hora	Utilização por hora (%)	Total de utilização por período (%)	Afluente por hora (%)	Total de afluente por período (%)	Armazenar	
						Surplus (%)	Deficit (%)
22 – 05	7	0.75	5.25	4.17	29.19	23.94	-
05 – 06	1	4	4	4.17	4.17	0.17	-
06 – 07	1	6	6	4.17	4.17	-	1.83
07 – 09	2	8	16	4.17	8.34	-	7.66
09 – 10	1	6	6	4.17	4.17	-	1.83
10 – 13	3	5	15	4.17	12.51	-	2.49
13 – 17	4	6	24	4.17	16.68	-	7.32
17 – 18	1	10	10	4.17	4.17	-	5.83
18 – 20	2	4.5	9	4.17	8.34	-	0.66
20 – 21	1	3	3	4.17	4.17	1.17	-
21 - 22	1	1.75	1.75	4.17	4.17	2.42	-
Soma	24		100		100	27.7	27.62

Quadro A-4b – Regularização de transporte de água

Hora	Porcentagem de utilização*	Volume afluência (L)		Consumos (L)		Volume de armazenar (L)
		Por hora	Cumulativo	Por hora	Cumulativo	
0	0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1	0.75	258.780	258.780	46.580	46.580	212.200
2	0.75	258.780	517.560	46.580	93.161	424.399
3	0.75	258.780	776.340	46.580	139.741	636.599
4	0.75	258.780	1035.120	46.580	186.322	848.798
5	0.75	258.780	1293.900	46.580	232.902	1060.998
6	0.75	258.780	1552.680	46.580	279.482	1273.198
7	0.75	258.780	1811.460	46.580	326.063	1485.397
8	4	258.780	2070.240	248.429	574.492	1495.748
9	6	258.780	2329.020	372.643	947.135	1381.885
10	8	258.780	2587.800	496.858	1443.992	1143.808
11	8	258.780	2846.580	496.858	1940.850	905.730
12	6	258.780	3105.360	372.643	2313.493	791.867
13	5	258.780	3364.140	310.536	2624.029	740.111
14	5	258.780	3622.920	310.536	2934.565	688.355
15	5	258.780	3881.700	310.536	3245.101	636.599
16	6	258.780	4140.480	372.643	3617.744	522.736

17	6	258.780	4399.260	372.643	3990.388	408.872
18	6	258.780	4658.040	372.643	4363.031	295.009
19	6	258.780	4916.820	372.643	4735.674	181.146
20	10	258.780	5175.600	621.072	5356.746	-181.146
21	4.5	258.780	5434.380	279.482	5636.228	-201.848
22	4.5	258.780	5693.160	279.482	5915.711	-222.551
23	3	258.780	5951.940	186.322	6102.032	-150.092
24	1.75	258.780	6210.720	108.688	6210.720	0.000
Soma	100			6210.720		
A capacidade de armazenamento, $V_{ar} = 1495.748 + 222.551 = 1718.299$ litros ≈ 2.0 m ³						

Ou a capacidade, $V_{ar} = \xi \times q_r \times \text{tempo} = 27.66 \% \times 258.78 \text{ L/dia} \times 24 \text{ hora} = 1718.89$ litros ≈ 2.0 m³

Em que ξ é o valor medio entre porcento surplus e deficit.