

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E  
AMBIENTAL**

**ANÁLISE DE TRANSIENTES HIDRÁULICOS EM SISTEMA  
DE ADUÇÃO DE ÁGUA POR BOMBEAMENTO**

**CLARA RESENDE DE AGUIAR**

**ORIENTADOR: ALEXANDRE KEPLER SOARES**

**MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL EM ENGENHARIA  
AMBIENTAL II**

**BRASÍLIA/DF: DEZEMBRO/2020**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E  
AMBIENTAL**

**ANÁLISE DE TRANSIENTES HIDRÁULICOS EM SISTEMA  
DE ADUÇÃO DE ÁGUA POR BOMBEAMENTO**

**CLARA RESENDE DE AGUIAR**

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA AMBIENTAL.

**APROVADA POR:**

---

**ALEXANDRE KEPLER SOARES, PhD (ENC/Unb)  
(ORIENTADOR)**

---

**ARTHUR TAVARES SCHLEICHER, MsC (ENC/UnB)  
(EXAMINADOR INTERNO)**

---

**CRISTIANO GONÇALVES NASCIMENTO GOUVEIA  
(EXAMINADOR EXTERNO)**

**DATA: BRASÍLIA/DF, 17 DE DEZEMBRO DE 2020.**

## FICHA CATALOGRÁFICA

AGUIAR, CLARA RESENDE

Análise de transientes hidráulicos em sistema de adução de água por bombeamento.

ix, 57 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Ambiental, 2020)

Monografia de Projeto Final – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Transiente hidráulico

2. Golpe de aríete

3. Adutora

4. Sistema hidráulico

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

Aguiar, C.R. (2020). *Análise de transientes hidráulicos em sistema de adução de água por bombeamento*. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 57 p.

## CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: CLARA RESENDE DE AGUIAR

TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL:

GRAU / ANO: Bacharel em Engenharia Ambiental / 2020

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta monografia de Projeto Final e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de Projeto Final pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

---

NOME

[EMAIL](#)

## **AGRADECIMENTOS**

Eu, Clara Resende de Aguiar, gostaria de agradecer imensamente aos meus pais, Joel Carvalho de Aguiar e Rosy Rodrigues Resende de Aguiar, pelo apoio incondicional que sempre me deram para a conclusão do curso de Engenharia Ambiental. Agradeço à minha irmã, Luá Resende de Aguiar, por todo carinho e torcida que sempre teve por mim.

Agradeço às amigas que construí ao longo desse caminho que o tornaram muito mais leve e divertido.

Agradeço também a todos os professores que tive o privilégio de frequentar as aulas. Cada um tem uma parcela muito significativa na minha formação. Um agradecimento especial ao professor Alexandre Kepler Soares, meu orientador, por toda paciência e disponibilidade em me ajudar a cumprir esta etapa de minha vida.

## RESUMO

Pela relevância dos sistemas de transporte de fluido no cotidiano e pelos potenciais danos (mais ou menos graves) que podem ocorrer durante o transporte do fluido, verifica-se a conveniência do estudo relativo aos fenômenos físicos ligados a esses sistemas. Mais especificamente: transientes hidráulicos.

Perturbações no regime de escoamento do fluido tais como as decorridas de manobras de válvulas e paradas de bombas hidráulicas são comuns nos sistemas de transporte em geral, e é pela formação de ondas de pressão que se dá o ajuste das condições de fluxo do fluido transportado. Essas perturbações fazem com que o fluido escoe com variações de velocidade e pressão no tempo e no espaço, dando origem ao fenômeno do fluxo transitório, também conhecido como transiente hidráulico.

Soares *et al.* (2013) analisaram o fluxo transitório em um sistema de bombeamento de água causado pelo desligamento de uma das bombas da estação elevatória de Prado – Instituto Politécnico da Guarda (IPG), localizada em Guarda, Portugal. Em seus estudos, foram realizadas saídas de campo para coleta de dados referentes à pressão interna da tubulação no momento em que ocorria o transiente hidráulico e de dados da taxa de fluxo em estado permanente.

O presente trabalho buscou realizar a modelagem do sistema hidráulico no estudo de caso apresentado em Soares *et al.* (2013) e a comparação dos dados adquiridos em campo pelos autores com os resultados numéricos obtidos através do software comercial ALLIEVI.

Neste trabalho, foram construídos sete cenários diferentes com o intuito de avaliar suas condições de contorno em relação às respostas de pressão em um ponto logo após a bomba de sucção; a influência do tipo de fechamento da válvula de retenção, seja instantâneo ou conforme a curva de fechamento apresentada; e a influência da descarga livre para a atmosfera.

A comparação entre os dados gerados nas simulações e os dados obtidos em campo mostrou que a teoria clássica do golpe de aríete é imprecisa para a descrição do comportamento das variações de pressão no interior do sistema hidráulico. Porém, os primeiros valores de pico de pressão, máximo e mínimo, são descritos de forma satisfatória nas simulações.

Em geral, pelos dados obtidos através das simulações e pela literatura consultada, observa-se que o uso de softwares como o Allievi é recomendável, principalmente, para estudos de sistemas em fase de projeto, pois os resultados gerados são majorados, o que é significativo para a segurança do sistema.

Palavras-chave: Transiente hidráulico; golpe de aríete; adutora; sistema hidráulico

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2. OBJETIVOS .....</b>	<b>3</b>
2.1. OBJETIVO GERAL.....	3
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	3
<b>3. TRANSIENTES HIDRÁULICOS EM CONDUTOS FORÇADOS.....</b>	<b>4</b>
3.1. DESCRIÇÃO DO FENÔMENO.....	4
3.2. EQUAÇÕES GOVERNANTES .....	9
3.3. SOLUÇÃO NUMÉRICA – MÉTODO DAS CARACTERÍSTICAS .....	13
3.4. IMPLICAÇÕES DEVIDO À OCORRÊNCIA DE TRANSIENTES HIDRÁULICOS .....	20
3.5. CAUSAS DOS TRANSIENTES .....	21
3.6. MODELAGEM MATEMÁTICA .....	22
<b>4. METODOLOGIA.....</b>	<b>25</b>
4.1. SISTEMA DE ADUÇÃO.....	25
4.2. O PROGRAMA ALLIEVI.....	28
4.3. CENÁRIOS .....	33
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>39</b>
5.1. RESERVATÓRIO DE NÍVEL CONSTANTE COMO CONDIÇÃO DE CONTORNO À JUSANTE.....	39
5.2. RESERVATÓRIOS DE NÍVEL VARIÁVEL COM DESCARGA LIVRE COMO CONDIÇÃO DE CONTORNO À JUSANTE .....	41
5.3. LEI DE ALTURA COM RESERVATÓRIO ASSOCIADO E LEI DE VAZÃO POR PRESSÃO.....	42
<b>6. CONCLUSÃO.....</b>	<b>44</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>46</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Comportamento do fluxo antes, durante e após uma perturbação. (Adaptado de: <a href="https://www.youtube.com/watch?v=NCVZi_rcMZU&amp;t=2439s">https://www.youtube.com/watch?v=NCVZi_rcMZU&amp;t=2439s</a> ) .....	4
Figura 3.2 – Sistema reservatório-tubo-válvula (Adaptado de: Chaudhry, 2014) .....	5
Figura 3.3 – Propagação e reflexão da onda de pressão no fluxo transitório. (Adaptado de: Chaudry, 2014) .....	6
Figura 3.4 – Variação de pressão na válvula e no ponto médio da tubulação; perdas de carga negligenciadas. (Adaptado de: <a href="https://www.youtube.com/watch?v=NCVZi_rcMZU&amp;t=2439s">https://www.youtube.com/watch?v=NCVZi_rcMZU&amp;t=2439s</a> ) .....	8
Figura 3.5 – Linhas características no plano $x-t$ (Soares, 2007) .....	15
Figura 3.6 – Sistema reservatório-tubo-válvula (Adaptado de: Chaudhry, 2014) .....	16
Figura 3.7 – Malha de cálculo método das características (Adaptada de: Soares, 2007) ....	18
Figura 3.8 – Diagrama dos modelos hidráulicos para tubos em série (Adaptado de Abreu et al., 1999 por Soares, 2007) .....	23
Figura 4.1 – Esquema simplificado do sistema de adução de água de Guarda (Adaptado de: Soares <i>et al.</i> , 2013) .....	26
Figura 4.2 – Perfil do sistema de adução de Guarda. (Soares <i>et al.</i> , 2013) .....	26
Figura 4.3 – Detalhes do sistema de adução de Guarda. (Soares et al., 2008) .....	27
Figura 4.4 – Interface gráfica do software ALLIEVI .....	31
Figura 4.5 – Cenário 1.1 – Sistema com válvula de retenção com fechamento instantâneo e reservatório de nível constante à jusante .....	33
Figura 4.6 – Cenário 1.2 – Sistema com válvula de retenção simulada como válvula de regulação e reservatório de nível constante à jusante .....	33
Figura 4.7 – Cenário 2.1 – Sistema com válvula de retenção com fechamento instantâneo e reservatório de nível variável à jusante .....	34
Figura 4.8 – Cenário 2.2 – Sistema com válvula de retenção simulada como válvula de regulação e reservatório de nível variável à jusante .....	34

Figura 4.9 – Cenário 3.1 – Sistema com válvula de retenção com fechamento instantâneo e lei de altura. ....	35
Figura 4.10 – Cenário 3.2 – Sistema com válvula de retenção modelada como válvula de regulação e lei de altura. ....	35
Figura 4.11 – Cenário 4.1 – Sistema com válvula de retenção com fechamento instantâneo e lei de vazão. ....	36
Figura 4.12 – Figura 4.11 – Fechamento da válvula de retenção. ....	37
Figura 5.1 – Valores de pressão observados no ponto P1 e resultados obtidos por simulação considerando válvula de retenção com fechamento instantâneo e reservatório de nível constante como condição de contorno à jusante. ....	39
Figura 5.2 – Valores de pressão observados no ponto P1 e resultados obtidos por simulação considerando válvula de retenção modelada como válvula de regulação e reservatório de nível constante como condição de contorno à jusante. ....	39
Figura 5.3 – Valores de pressão observados no ponto P1 e resultados obtidos por simulação considerando válvula de retenção com fechamento instantâneo e três reservatório de nível variável com descarga livre como condição de contorno à jusante. ....	40
Figura 5.4 – Valores de pressão observados no ponto P1 e resultados obtidos por simulação considerando válvula de retenção modelada como válvula de regulação e três reservatório de nível variável com descarga livre como condição de contorno à jusante.....	41
Figura 5.5 – Valores de pressão observados no ponto P1 e resultados obtidos por simulação considerando válvula de retenção com fechamento instantâneo e lei de altura com descarga para reservatório de nível constante como condição de contorno à jusante. ....	42
Figura 5.6 – Valores de pressão observados no ponto P1 e resultados obtidos por simulação considerando válvula de retenção modelada como válvula de regulação e lei de altura com descarga para reservatório de nível constante como condição de contorno à jusante. ....	42
Figura 5.7 – Valores de pressão observados no ponto P1 e resultados obtidos por simulação considerando válvula de retenção com fechamento instantâneo e lei de vazão como condição de contorno à jusante. ....	43

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 4.1 Elementos modelados no programa ALLIEVI .....	30
Tabela 4.2 Cenários. ....	33

## LISTA DE SÍMBOLOS

$a$	celeridade (velocidade de propagação da onda)
$A$	área interna da seção transversal do tubo
$B$	propriedade extensiva
$C^+$	característica positiva
$C^-$	característica negativa
$C_N$	número de Courant
$D$	diâmetro interno do tubo
$E$	módulo de elasticidade de Young
$f$	fator de atrito de Darcy-Weisbach
$g$	aceleração da gravidade
$H$	carga piezométrica
$K$	módulo de elasticidade da água
$L$	comprimento da tubulação
$n$	número de seções de cálculo
$P$	pressão
$Q$	vazão
$t$	tempo
$v$	volume
$V$	velocidade média de escoamento do fluido
$x$	coordenada ao longo do eixo do tubo
$\beta$	propriedade intensiva
$\lambda$	multiplicador desconhecido (Método das Características)

$\rho$  massa específica do fluido

$\varphi$  parâmetro adimensional que depende das propriedades elásticas do conduto

# 1. INTRODUÇÃO

Sistemas de transporte de fluidos por condutos forçados como redes de distribuição de água para abastecimento, sistemas de irrigação, hidroelétricas, gasodutos e oleodutos são fundamentais para viabilidade de diversas atividades econômicas e manutenção da saúde pública. Além de estarem presentes em grandes e complexas obras que demandam planejamento e alto investimento, esses sistemas também são utilizados para instalações mais simples. Assim, pela relevância dos sistemas de transporte de fluido no cotidiano e pelos potenciais danos (mais ou menos graves) que podem ocorrer durante o transporte do fluido, verifica-se a conveniência do estudo relativo aos fenômenos físicos ligados a esses sistemas.

Perturbações no regime de escoamento do fluido tais como as decorridas de manobras de válvulas e paradas de bombas hidráulicas são comuns nos sistemas de transporte em geral, e é pela formação de ondas de pressão que se dá o ajuste das condições de fluxo do fluido transportado (Boulos *et al.*, 2005). Essas perturbações fazem com que o fluido escoe com variações de velocidade e pressão no tempo e no espaço (Ghidaoui *et al.*, 2005), dando origem ao fenômeno do fluxo transitório, também conhecido como transiente hidráulico. Caso o sistema não possua uma estrutura capaz de suportar essas variações, diversos tipos de danos podem ocorrer e levar a resultados de perda da garantia da segurança hídrica, no caso de um sistema de adução de água para abastecimento; a acidentes fatais; ou a grandes perdas econômicas (Boulos *et al.*, 2005).

Durante a situação de fluxo transitório, ou seja, quando o regime de escoamento está no processo de adaptação: variando de um estado permanente inicial para um estado permanente final – diferente do inicial – ocorre uma conversão de energia cinética em pressão através da geração de ondas que se propagam ao longo da tubulação, e isso altera o fluxo, velocidade e pressão do fluido no seu interior. A flutuação dos valores de pressão, então, varia entre máximos e mínimos.

É geralmente a pressão máxima que provoca a ruptura da tubulação caso esta não tenha resistência mecânica suficiente ou não esteja protegida de forma apropriada. Por outro lado, caso o valor mínimo de pressão diminua até um ponto abaixo da pressão atmosférica, pode ocorrer a entrada de ar e líquidos contaminados através de pequenas rachaduras ou fissuras existentes (Boulos *et al.*, 2005). Daí o colapso do conduto ocorre quando a relação

espessura/diâmetro é muito pequena. Além destes problemas, se as pressões mínimas atingem valores abaixo da pressão de vapor do líquido transportado, o fenômeno cavitação pode ocorrer e causar ainda mais danos à instalação (Porto, 2006). Valores mínimos de pressão acima da pressão atmosférica não geram efeitos negativos para a segurança do sistema. Tendo isso em mente, é importante que a amplitude das flutuações esteja dentro de um limite aceitável.

Para que o analista faça as melhores tomadas de decisão, é necessário o uso de um programa computacional capaz de simular o transiente hidráulico e gerar, como resultado, os valores de pressão que caracterizam o fenômeno. Com estes resultados, tornam-se mais sólidos o controle e a prevenção dos prejuízos que podem surgir do desenvolvimento de transientes hidráulicos, conseqüentemente, os valores encontrados auxiliam a seleção de um sistema com resistência mecânica suficiente para suportar as oscilações de pressão.

A análise hidráulica, então, é necessária na etapa de projetos de engenharia para verificação de diversos parâmetros e características que irão garantir a segurança do sistema, e também é necessária no estágio de operação para diagnóstico de problemas de mau funcionamento ou de causas de ruptura de condutos.

É comum na análise hidráulica de escoamento permanente e de simulações no período estendido considerar que modificações nas pressões e vazões ao longo do sistema ocorrem instantaneamente, ou seja, o tempo transcorrido para estabilização do escoamento após uma perturbação é negligenciado, assim como os efeitos dinâmicos ocorridos durante esse período (Soares, 2007). Apesar disso, a utilização de modelos hidráulicos que levam em consideração o comportamento dinâmico dos escoamentos internos é cada vez maior na engenharia. Tais modelos dinâmicos são regidos por equações da continuidade e da quantidade de movimento, governantes do fenômeno hidráulico, e são de difícil solução analítica, sendo necessária a aplicação de métodos numéricos e a adoção de simplificações para se chegar a uma solução.

Modelos comerciais para simulação do fluxo transitório trazem resultados satisfatórios para estimativa de pressões extremas na fase de projeto, permitem a verificação da necessidade de dispositivos de proteção e qual deles é mais adequado. Entretanto, esses modelos comerciais podem trazer algum nível de imprecisão para análise e realização de diagnósticos de sistemas reais. Desenvolvimentos têm sido realizados e disponibilizados nos modelos

comerciais, mas a adequação a sistemas reais, no que diz respeito à reprodução das condições de escoamento, ainda geram dúvidas na modelagem hidráulica no escoamento transitório.

Dentro do contexto apresentado, este trabalho se propõe a analisar e comparar com dados obtidos em campo diferentes respostas da variação de pressão no interior de uma adutora durante o acontecimento do fenômeno golpe de aríete, sendo consideradas diferentes condições de contorno.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. OBJETIVO GERAL**

O presente trabalho teve como objetivo a realização de uma análise comparativa entre as respostas da modelagem de transitórios hidráulicos geradas por um software e os dados obtidos em campo.

### **2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

A modelagem hidráulica do sistema de adução por bombeamento tem como objetivos específicos:

- a) Analisar os resultados numéricos obtidos em termos da variação de cargas de pressão em pontos onde tais cargas são frequentemente de maior magnitude e compará-los aos dados monitorados;
- b) Analisar os resultados gerados pela modelagem das válvulas de retenção dos conjuntos motor-bomba;
- c) Analisar a modelagem da condição de contorno de jusante como reservatório de nível fixo ou de nível variável.

### 3. TRANSIENTES HIDRÁULICOS EM CONDUTOS FORÇADOS

A literatura foi consultada e, neste capítulo, são apresentadas a descrição do fenômeno hidráulico, as equações analíticas e sua resolução numérica, bem como exemplos de modelagem hidráulica para a reprodução dos escoamentos transientes em condutos forçados.

#### 3.1. DESCRIÇÃO DO FENÔMENO

Segundo Chaudhry (2014), o transiente hidráulico ou fluxo transitório é um estágio intermediário de fluxo, ocorre quando as condições variam de um estado de regime permanente para outro estado de regime permanente. Ou seja, tem-se uma situação em que as condições de escoamento, como velocidade e pressão, são constantes em relação ao tempo em todos os pontos e, por ocorrência de alguma perturbação, essas condições variam até retornar novamente a um estado permanente, porém diferente do inicial (Figura 3.1). O fenômeno transiente hidráulico faz referência à variação de pressão causada pela mudança de regime de fluxo, na qual ocorre uma variação entre picos máximos e mínimos de pressão.

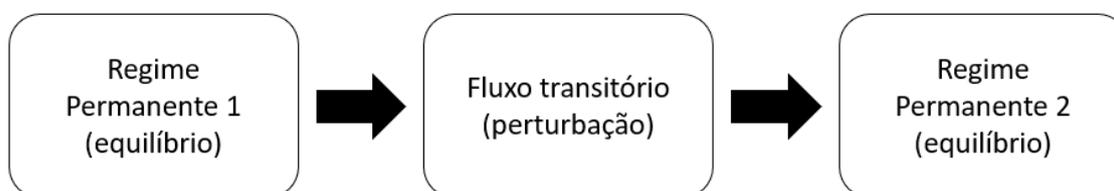


Figura 3.1 – Comportamento do fluxo antes, durante e após uma perturbação. (Adaptado de: Alarcon, 2020)

Chaudhry (2014) apresenta uma situação que ilustra de forma clara o fenômeno e mostra como as condições de fluxo em uma tubulação se comportam após uma perturbação gerada pelo fechamento instantâneo de uma válvula: tem-se um sistema composto por um reservatório de nível constante, à montante, com uma tubulação interligada a esse reservatório e uma válvula de controle em um ponto da tubulação, à jusante, ilustrado pela Figura 3.2.

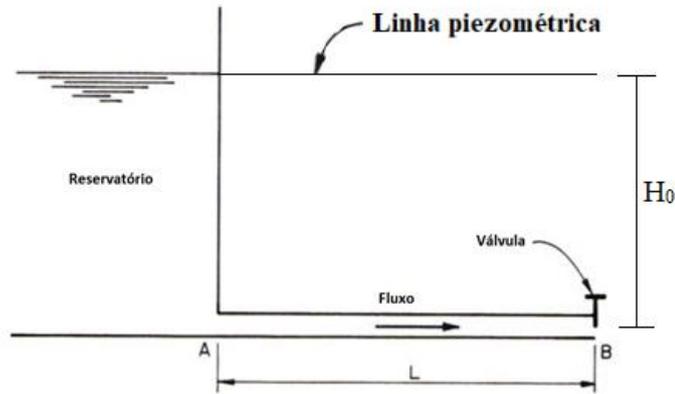


Figura 3.2 – Sistema reservatório-tubo-válvula (Adaptado de: Chaudhry, 2014).

Na situação apresentada por Chaudry (2014) é assumido que a parede da tubulação é elástica, não possui atrito e o fluido é compressível. A sequência de eventos que caracterizam o fenômeno é dividida em quatro estágios pelo autor, para melhor entendimento:

Inicialmente, a válvula encontra-se completamente aberta e o fluxo possui uma velocidade inicial  $V_0$  em direção à válvula – considera-se o fluxo em direção à válvula com velocidade positiva e em direção ao reservatório com velocidade negativa. No tempo  $t = 0$ , a válvula se fecha repentinamente, reduzindo o fluxo através desse dispositivo a zero de forma instantânea. A energia cinética do fluido é então convertida em um aumento de pressão na válvula, essa transformação tem como consequência a formação de uma onda de pressão positiva que passa a se deslocar no sentido reservatório. Em uma onda de pressão positiva, a altura piezométrica atrás da frente de onda é maior (Porto, 2006), assim, a altura piezométrica do escoamento ainda não perturbado é menor do que a do escoamento já perturbado (Figura 3.3a). Sendo  $a$  a velocidade de propagação da onda e  $L$  o comprimento da tubulação, então a frente da onda atinge o reservatório no tempo  $t = L/a$ . Neste momento, o diâmetro de toda a tubulação está expandido, velocidade do fluido é zero e a linha piezométrica equivale a  $H_0 + \Delta H$  (Figura 3.3b).

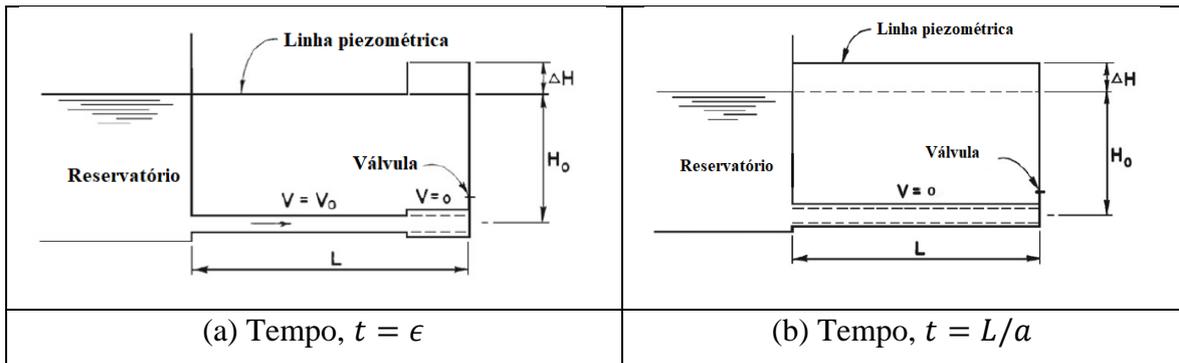


Figura 3.3 – Propagação e reflexão da onda de pressão no fluxo transitório. (Adaptado de: Chaudry, 2014)

No momento em que a onda chega ao reservatório ( $t = L/a$ ) começa um segundo estágio do fenômeno de transiente hidráulico. Agora, em  $t = L/a$ , há uma diferença de pressão entre o reservatório e a tubulação adjacente. Por conta dessa diferença de pressão, o fluido começa a escoar da tubulação para dentro reservatório com velocidade  $-V_0$ . Assim, a velocidade do fluido na entrada é reduzida de zero para  $-V_0$ . Isso faz com que a pressão dentro da tubulação decaia para  $H_0$  pelo processo de reflexão da onda na forma de onda negativa, com altura piezométrica atrás da frente de onda igual a  $H_0$ , menor do que à frente,  $H_0 + \Delta H$  (Porto, 2006) - (Figura 3.3c). Ao chegar na válvula, em  $t = 2L/a$ , a pressão ao longo de toda a tubulação é equivalente a  $H_0$  e a velocidade do fluido é  $-V_0$  (Figura 3.3d).

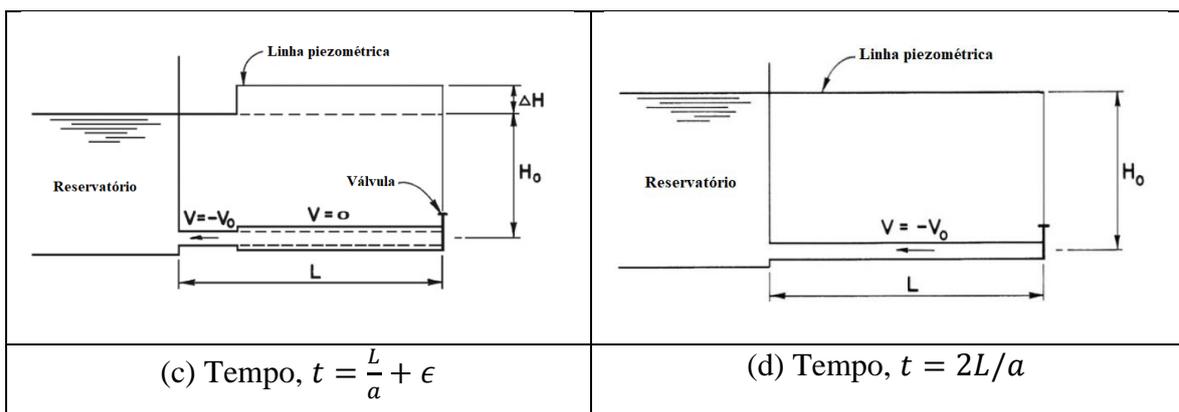


Figura 3.3 – (continuação) – Adaptado de: Chaudry, 2014.

Um terceiro estágio do fenômeno se inicia quando a onda chega na válvula. Como a válvula encontra-se totalmente fechada, não é possível que uma velocidade negativa seja mantida,

pois não há fluido atravessando a válvula em direção ao reservatório. Por consequência, a velocidade do fluido muda instantaneamente de  $-V_0$  para 0, a pressão na válvula decai para  $H_0 - \Delta H$  e uma onda negativa se propagada em direção ao reservatório (Figura 3.3e). Após da frente de onda a pressão é  $H_0 - \Delta H$  e a velocidade do fluido é zero. A frente de onda atinge o reservatório no tempo  $t = 3L/a$ , nesse momento: toda a tubulação tem pressão igual a  $H_0 - \Delta H$  e o fluido tem velocidade igual a zero (Figura 3.3f).

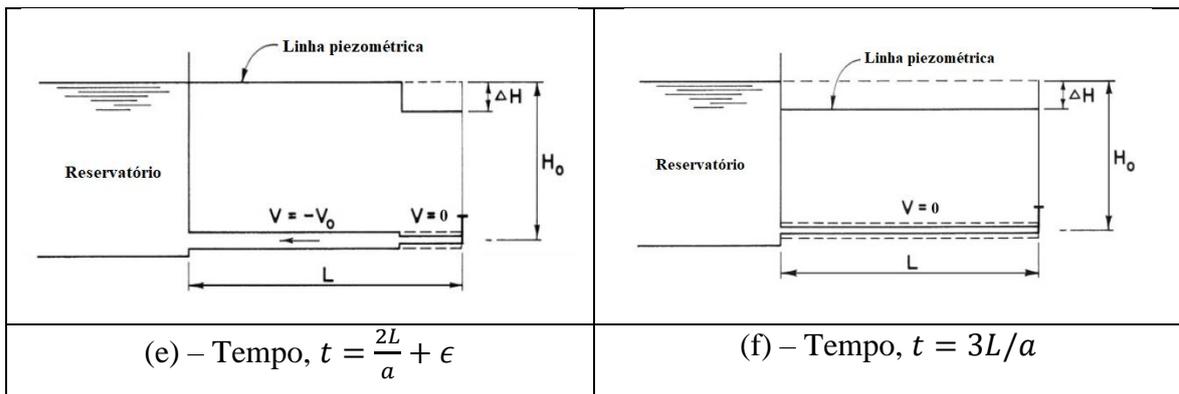


Figura 3.3 – (continuação) – Adaptado de: Chaudry, 2014.

No início do quarto estágio, assim que a onda negativa atinge o reservatório, há novamente uma diferença de pressão entre o reservatório e a tubulação, mas dessa vez a pressão no reservatório é maior do que na tubulação:  $H_0$  e  $H_0 - \Delta H$ , respectivamente. Por esse motivo, o fluido passa a escoar do reservatório para dentro da tubulação com velocidade  $V_0$ ; uma onda positiva passa a viajar em direção à válvula (Figura 3.3g). No tempo  $t = 4L/a$ , a onda atinge a válvula, a pressão em toda a tubulação torna-se a mesma que a do reservatório ( $H_0$ ) e a velocidade do fluido é  $V_0$ . Assim, nesse momento, as condições na tubulação são as mesmas das condições de fluxo permanente inicial, exceto por agora a válvula estar fechada (Figura 3.3h).

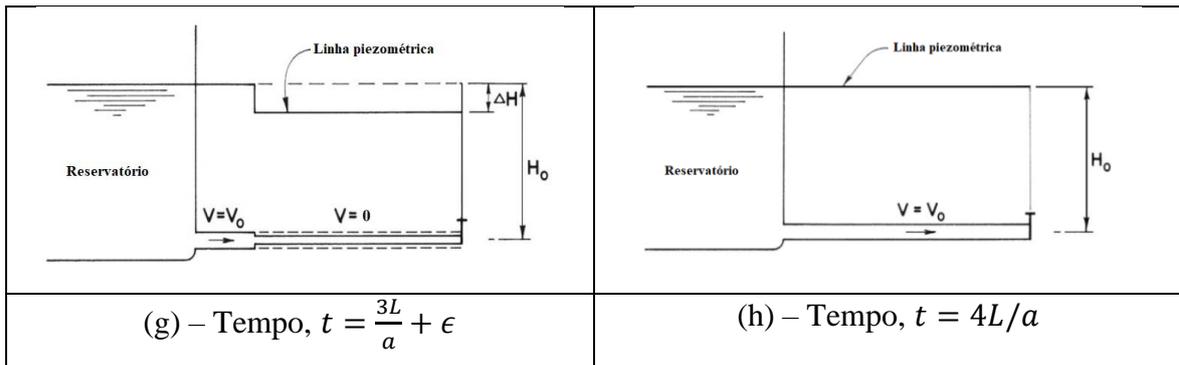
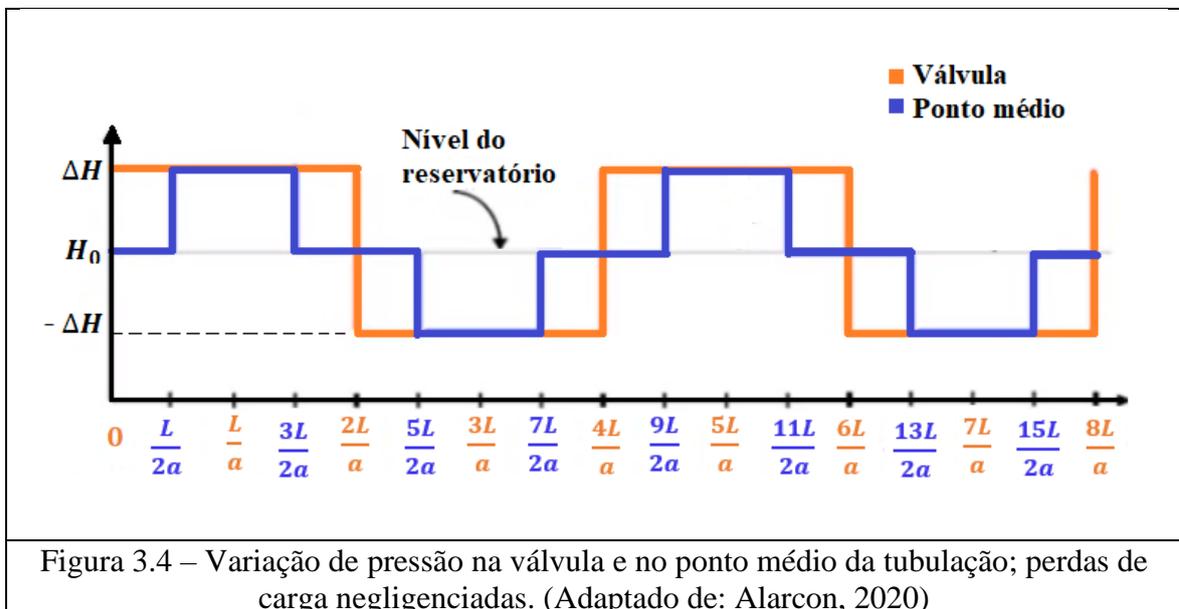


Figura 3.3 – (continuação) – Adaptado de: Chaudry, 2014.

Como a válvula encontra-se fechada, toda essa sequência de eventos se repete novamente, sempre em períodos de tempo igual a  $4L/a$ , desde que seja assumido uma tubulação sem atrito – a Figura 3.4 mostra como se comporta a variação de pressão na válvula e no ponto médio da tubulação, para essa situação em que o atrito não é considerado. Entretanto, em um sistema real, as ondas de pressão são dissipadas graças à perda de energia durante o movimento de vai-e-vem da onda. Então, depois de algum tempo, o fluxo volta ao equilíbrio e o fluido torna-se estacionário, fica completamente parado (Chaudry, 2014).



Boulos *et al.*, 2005 diz que, em um sistema real, um som parecido com o som provocado por uma máquina de guerra (aríete) ou por uma martelada é ouvido logo após o momento em

que a perturbação, fechamento da válvula, no caso, é provocado: isto indica que parte da energia cinética é convertida não só em pressão, mas também em energia sonora. O transiente hidráulico dito rápido é chamado de golpe de aríete e pode ser identificado, também, pelo som provocado pelo fenômeno.

Soares (2007) pontua que é possível analisar os sistemas de distribuição de água sob uma larga variedade de condições de fluxo graças às modernas técnicas computacionais vigentes, e que muitos aperfeiçoamentos têm sido realizados na análise transitória em termos de precisão e eficiência dos modelos. Dois modelos são considerados na análise transitória de condutos sob pressão: o modelo da coluna rígida, quando são admitidos o líquido incompressível e o conduto rígido, este modelo utiliza a abordagem de modelo concentrado e é empregado para analisar os fenômenos de oscilação de massa (transitórios lentos com baixas frequências); e o modelo da coluna elástica (abordagem modelo distribuído), que considera os efeitos de compressibilidade do líquido e elasticidade do conduto, utilizado para a análise do golpe de aríete (transitórios rápidos com altas frequências).

### **3.2. EQUAÇÕES GOVERNANTES**

O teorema de transporte de Reynolds relaciona as variáveis de uma quantidade específica de massa do fluido, chamada de sistema, com as variáveis de um volume de controle, que é um volume no espaço: uma entidade geométrica que independe do fluido (Munson *et. al.*, 2004).

O sistema, composto sempre pelas mesmas partículas de fluido, pode se mover, mudar de forma e interagir com o meio à medida que viaja de um local para outro (Munson *et. al.*, 2004). Já o volume de controle geralmente é fixo em uma determinada região, mas em algumas aplicações também pode se mover e ter sua forma modificada. Para o caso estudado, o volume de controle mantém-se fixo, mas a sua forma muda com o tempo, devido à variação da pressão interna na tubulação (Chaudry, 2014). A matéria contida no volume de controle pode variar ao longo do tempo e, conseqüentemente, a quantidade de massa no volume de controle também pode variar com o tempo (Munson *et. al.*, 2004).

O teorema de transporte de Reynolds é oportuno para a análise do fluxo unidimensional do fluido pela abordagem Euleriana, em que não interessa seguir as partículas fluidas e determinar como as propriedades dessas partículas variam em função do tempo, mas interessa o que acontece em uma região do espaço (volume de controle), enquanto o fluido atravessa essa região (Chaudry, 2014).

A relação entre a taxa de variação temporal de uma propriedade extensiva para um sistema e para um volume de controle é apresentada pela Equação 3.1, teorema de Transporte de Reynolds:

$$\frac{dB}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} \beta \cdot \rho \cdot dv + \int_{SC} \beta \cdot \rho \cdot \vec{V} \cdot d\vec{A} \quad \text{Equação 3.1}$$

sendo:  $B$  = Propriedade extensiva;

$\beta$  = Propriedade intensiva equivalente;

$\rho$  = Massa específica do fluido;

$\vec{V}$  = Velocidade do fluxo;

$dv$  = diferencial de volume;

$d\vec{A}$  = diferencial de área;

A equação (3.1) mostra que a taxa de variação total de qualquer propriedade extensiva  $B$  do sistema é igual à taxa de variação temporal da propriedade dentro do volume de controle (VC) somada ao fluxo da propriedade  $B$  do sistema através das superfícies de controle (SC), ou seja, a quantidade que sai menos a que entra no VC. Para melhor entendimento: os limites do volume de controle são chamados de superfície de controle.

Perturbações no fluxo, planejada ou acidentais, induzem a uma variação espacial e temporal da velocidade e pressão interna do conduto. Esse fluxo transitório que foi desencadeado pode ser considerado unidimensional, pois a contribuição do fluxo axial é muito mais significativa do que a do radial (Ghidaoui *et al.*, 2005), principalmente em condutos forçados, pois geralmente a extensão da tubulação é muito maior que o seu diâmetro. Assim, as variações que ocorrem no eixo  $y$  e  $z$  podem ser desprezadas, nesse caso. Então, assumindo que o fluxo seja unidimensional, as equações que descrevem o fenômeno golpe de aríete e governam as variações temporais e espaciais (na direção axial) podem ser derivadas aplicando o teorema de transporte de Reynolds para as propriedades extensivas massa e quantidade de movimento em um volume de controle.

Outras hipóteses também são consideradas nas equações básicas que governam o fenômeno do Golpe de Aríete, são elas: fluido monofásico, homogêneo e compressível; variações na massa específica do fluido e temperatura durante o escoamento transitório são desprezíveis comparadas às variações de pressão e vazão; perdas de carga durante os transitórios hidráulicos são calculadas a partir de formulações para o escoamento permanente; o material do tubo possui comportamento reológico elástico linear; não há movimento ao longo do eixo

axial da tubulação, ou seja, a interação fluido-estrutura é negligenciada; e o tubo é retilíneo e uniforme, com uma área da seção transversal constante e sem escoamento lateral (Soares, 2007 apud Covas, 2003).

O passo-a-passo do cálculo, com derivação detalhada para se chegar às equações governantes pode ser encontrado em Chaudry (2014).

Através da aplicação dos princípios de conservação de massa e de momentum a um volume de controle, chega-se às equações da continuidade e da quantidade de movimento, respectivamente:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad \text{Equação 3.2}$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + g \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{fV|V|}{2D} = 0 \quad \text{Equação 3.3}$$

sendo:  $H = H(x, t)$  = Carga piezométrica;

$V = V(x, t)$  = Velocidade do fluido;

$x$  = Dimensão no espaço longitudinal;

$t$  = Tempo;

$D$  = Diâmetro interno da tubulação;

$a$  = Velocidade de propagação da onda (celeridade);

$g$  = Aceleração da gravidade;

$f$  = Fator de atrito de Darcy-Weisbach;

A resolução desse sistema de equações é feita por técnicas numéricas, como o método das características, método das diferenças finitas, método dos elementos finitos, métodos espectrais e método dos elementos de contorno (Chaudry, 2014). Em geral, não há uma solução analítica simples para o conjunto de equações. Uma das técnicas mais utilizados é o método das características, em que, a partir das equações governantes, chega-se a quatro equações diferenciais ordinárias, que são aplicadas para o cálculo das incógnitas carga piezométrica ( $H$ ) e velocidade do fluxo ( $V$ ) ao longo do tempo em que o transiente hidráulico ocorre e ao longo do comprimento do conduto.

A Equação 3.4, que descreve a velocidade da onda (celeridade), é dada por:

$$\frac{1}{a^2} = \frac{d\rho}{dP} + \frac{\rho}{A} \frac{dA}{dP}$$

Equação 3.4

Sendo:  $a$  = Velocidade de propagação da onda (celeridade);

$\rho$  = Densidade do fluido;

$P$  = Pressão;

$A$  = Área da secção transversal da tubulação;

O primeiro termo no lado direito da equação representa o efeito da compressibilidade do fluido na velocidade da onda e o segundo termo, representa o efeito da flexibilidade do material que é feita a tubulação (Ghidaoui *et al.*, 2005).

Considerando um sistema de adutora com parede de material elástico e transportando fluido compressível, tem-se a seguinte equação que caracteriza a velocidade da onda (Chaudhry, 2014 *apud*. Halliwell, 1963):

$$a = \sqrt{(K/\rho)[1 + (\frac{K}{E}) \varphi]}$$

Equação 3.5

sendo:  $\varphi$  = Parâmetro adimensional que depende das propriedades elásticas do conduto;

$E$  = Módulo de elasticidade de Young da parede do conduto;

$\rho$  = Densidade do fluido;

$K$  = Módulo de elasticidade da água.

A velocidade da onda ou celeridade depende, então, do módulo de elasticidade da água; densidade do fluido; das propriedades elásticas do conduto: extensão do conduto, espessura da parede, material da tubulação; e das características externas: tipo de suporte para a tubulação e a liberdade de movimentação da mesma na direção longitudinal. O módulo de elasticidade da água depende da temperatura, pressão e da quantidade de gases dissolvidos arrastados durante o escoamento do fluido (Chaudhry, 2014).

Para os diferentes tipos de materiais que são feitos os condutos, a magnitude de propagação da onda varia de 100 a 1400 m/s (Ghidaoui *et al.*, 2005). A celeridade em condutos feitos de materiais metálicos como o ferro fundido se apresenta geralmente numa faixa maior do que a celeridade em caso de condutos plásticos. Como já mencionado, esses valores dependem dos módulos de elasticidade dos diferentes tipos de condutos, que no caso de condutos metálicos são maiores do que em condutos plásticos.

Quando se quer estimar a celeridade na etapa de projeto, utiliza-se a fórmula teórica apresentada, com valor tabelado do módulo de elasticidade do material do tubo (Soares, 2007). Porém, quando se pretende estudar uma adutora já existente, é interessante que se faça testes em campo com transdutores de pressão para essa estimativa. Desta forma, a celeridade pode ser estimada baseada no tempo de propagação da primeira onda de pressão entre dois transdutores de pressão:  $a = L/t$  (Soares, 2007), sendo  $L$  a distância entre dois transdutores de pressão e  $t$  o tempo em que a onda percorre a distância  $L$ .

### 3.3. SOLUÇÃO NUMÉRICA – MÉTODO DAS CARACTERÍSTICAS

Como já mencionado, perturbações que ocorrem em um fluxo de escoamento rápido, sejam elas planejadas ou acidentais, induzem a mudanças espaciais e temporais na velocidade do fluxo e na pressão interna dos sistemas de tubulação (Ghidaoui *et al.* 2005).

As equações da continuidade (3.2) e da quantidade de movimento (3.3), que governam o fenômeno golpe de aríete, são dificilmente resolvidas analiticamente. Em razão disso, algumas técnicas numéricas podem ser utilizadas para solução dessas equações diferenciais parciais não lineares hiperbólicas como o método das características, método das diferenças finitas, modelo espectral, método dos elementos finitos e método das ondas características são utilizadas para estimativa de soluções aproximadas.

Segundo Sam Ani e Khayatzadeh (2002), o método das características é um excelente meio para análise de transitórios hidráulicos que ocorrem em um sistema composto por uma única tubulação, pois dá a possibilidade de dividir a tubulação em comprimentos de seções iguais que satisfazem a condição de estabilidade de Courant ( $C_N \leq 1$ ). Entretanto, de acordo com os autores, o método dá uma resposta pior quando aplicado a um sistema composto por várias tubulações ou com velocidades de onda que variam. Esse problema ocorre, pois o método das características necessita que a discretização espacial de todos os condutos satisfaçam a condição de Courant.

Dentre os métodos numéricos apresentados na literatura, o método das características é um dos mais utilizados para a solução de problemas que envolvem o fenômeno golpe de aríete, especialmente se a velocidade da onda é constante (Chaudhry, 2014). É amplamente empregado para soluções aproximadas das equações diferenciais parciais não-lineares: equação da quantidade de movimento (3.3) e equação da continuidade (3.2), que governam um fluxo transitório.

Essas equações podem ser reescritas de acordo com as equações 3.6 e 3.7:

$$L_1 = \frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + RQ|Q| = 0 \quad \text{Equação 3.6}$$

$$L_2 = a^2 \frac{\partial Q}{\partial x} + gA \frac{\partial H}{\partial t} = 0 \quad \text{Equação 3.7}$$

sendo:  $R = f/(2DA)$ ;

$\lambda =$  Multiplicador desconhecido;

$Q = VA =$  Vazão de escoamento;

Combinando as equações (3.6) e (3.7) linearmente e utilizando um multiplicador  $\lambda$  desconhecido, tem-se  $L = L_1 + \lambda L_2 = 0$ . Então, somando à equação (3.6) a multiplicação de (3.7) por  $\lambda$  e em seguida fazendo um rearranjo dos termos, chega-se à seguinte configuração, Equação 3.8:

$$\left(\frac{\partial Q}{\partial t} + \lambda a^2 \frac{\partial Q}{\partial x}\right) + \lambda gA \left(\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{1}{\lambda} \frac{\partial H}{\partial x}\right) + RQ|Q| = 0 \quad \text{Equação 3.8}$$

Se  $H = H(x, t)$  e  $Q = Q(x, t)$ , com  $x$  dependendo de  $t$ , então a derivada total de cada incógnita é:

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} \frac{dx}{dt} \quad \text{Equação 3.9}$$

$$\frac{dH}{dt} = \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial H}{\partial x} \frac{dx}{dt} \quad \text{Equação 3.10}$$

Definindo o multiplicador desconhecido  $\lambda$  como:

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{dx}{dt} = \lambda a^2 \quad \text{Equação 3.11}$$

Ou seja,

$$\lambda = \pm \frac{1}{a} \quad \text{Equação 3.12}$$

e

$$\frac{dx}{dt} = \pm a \quad \text{Equação 3.13}$$

Usando as equações (3.9) e (3.10), a equação (3.8) pode ser reescrita como:

$$C^+ = \frac{dQ}{dt} + \frac{gA}{a} \frac{dH}{dt} + RQ|Q| = 0 \quad \text{Equação 3.14}$$

se

$$\frac{dx}{dt} = +a \quad \text{Equação 3.15}$$

e

$$C^- = \frac{dQ}{dt} - \frac{gA}{a} \frac{dH}{dt} + RQ|Q| = 0 \quad \text{Equação 3.16}$$

se

$$\frac{dx}{dt} = -a \quad \text{Equação 3.17}$$

Assim, as duas equações diferenciais parciais hiperbólicas não-lineares (3.2) e (3.3) são convertidas em equações diferenciais ordinárias (com tempo  $t$  sendo a variável independente), com as relações (3.15) e (3.17) sendo impostas.

As equações (3.2) e (3.3) são válidas para qualquer ponto do plano  $x-t$ , mas, para o cálculo da solução aproximada do problema, utilizam-se as equações (3.14) e (3.16), que representam duas retas no plano  $x-t$ , chamadas de linhas características positiva ( $C^+$ ) e negativa ( $C^-$ ), e que possuem declividade  $\pm 1/a$ .

A Figura 3.2 representa as linhas características positiva e negativa no plano. Fisicamente, essas linhas representam o caminho percorrido por uma perturbação no plano  $x-t$ . Por exemplo, uma perturbação que ocorre no ponto A no tempo  $t_0$  tem efeito ao longo de toda a linha AP e alcança o ponto P após o intervalo de tempo  $\Delta t$ .

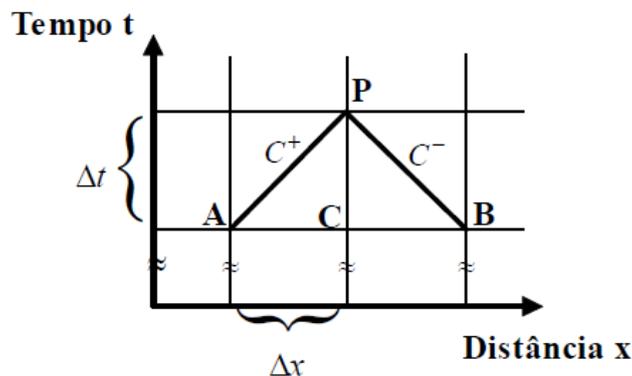


Figura 3.5 – Linhas características no plano  $x-t$  (Soares, 2007)

Chaudhry (2014) ilustra a seguinte situação para entendimento do significado físico das linhas características: Seja o sistema composto por reservatório de nível constante no ponto  $x = 0$ , tubulação de comprimento  $L$  e válvula localizada em  $x = L$ , como mostra a Figura 3.3. A ocorrência de um fluxo transitório é provocada pelo fechamento da válvula e as equações (3.14) e (3.16) são válidas ao longo de toda a tubulação ( $0 < x < L$ ).

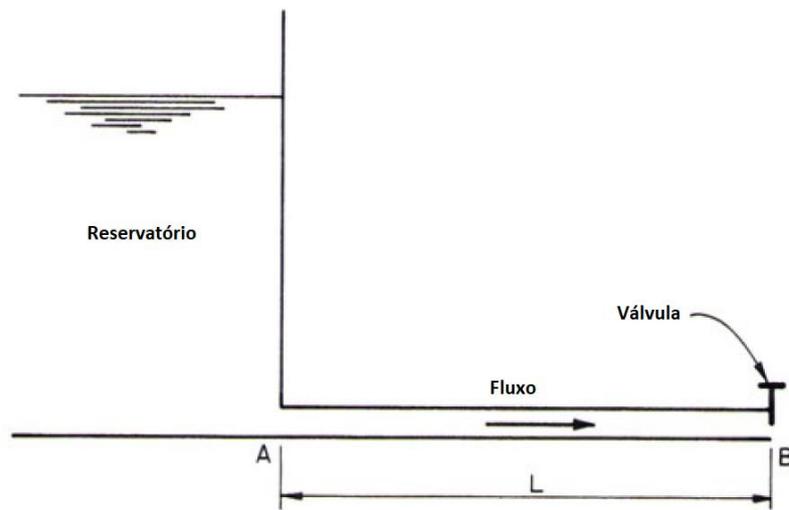


Figura 3.6 – Sistema reservatório-tubo-válvula (Adaptado de: Chaudhry, 2014)

No tempo  $t = 0$ , o fluxo encontra-se em regime permanente com uma velocidade inicial  $V_0$  constante, até que a válvula é completamente fechada. Esta ação provoca um distúrbio e faz com que o fluxo que passa pela válvula seja reduzido a zero. Como consequência, há um aumento de pressão na válvula e por conta do aumento da pressão, uma onda de pressão positiva começa a se propagar no sentido reservatório. A linha característica BP, mostrada na Figura 3.2, representa o caminho percorrido por esta onda no plano  $x-t$ . Pode-se dizer que as linhas características AC e BC representam o caminho percorrido por perturbações iniciadas em qualquer ponto do sistema.

Considera-se  $H$  e  $Q$  com valores conhecidos em  $t = t_0$ . O objetivo, então, é calcular os valores de  $H$  e  $Q$  no tempo  $t = t_0 + \Delta t$ . Com referência à Figura 3.1,  $H$  e  $Q$  são conhecidos nos pontos A e B e buscam-se seus valores no ponto P. Para isso,  $H_p$  e  $Q_p$  são calculados através da resolução das equações (3.14) e (3.16). Multiplica-se o lado esquerdo da equação (3.14) por  $dt$  e em seguida é calculada a integral entre os limites A e P, onde é válida, obtendo a equação 3.18:

$$\int_A^P dQ + \frac{gA}{a} \int_A^P dH + R \int_A^P Q|Q|dt = 0 \quad \text{Equação 3.18}$$

A estimativa dos dois primeiros termos da equação (3.18) pode ser feita de maneira relativamente fácil, diferentemente para o terceiro termo, que representa as perdas por atrito. Essa dificuldade maior ocorre porque não se sabe explicitamente a variação de Q em relação ao tempo. Usando uma aproximação de primeira ordem, a estimativa da integral do terceiro termo vem como:

$$R \int_A^P Q|Q|dt \cong RQ_A|Q_A|(t_P - t_A) = RQ_A|Q_A|\Delta t \quad \text{Equação 3.19}$$

A equação (3.18) torna-se:

$$Q_P - Q_A + \frac{gA}{a}(H_P - H_A) + R\Delta t Q_A|Q_A| = 0 \quad \text{Equação 3.20}$$

Seguindo os mesmos passos feitos para a resolução da equação (3.14), encontra-se como resultado para a equação (3.16):

$$Q_P - Q_B - \frac{gA}{a}(H_P - H_B) + R\Delta t Q_B|Q_B| = 0 \quad \text{Equação 3.21}$$

A equação (3.20) pode ser escrita como:

$$Q_P = C_p - C_a H_P \quad \text{Equação 3.22}$$

E a equação (3.21) como:

$$Q_P = C_n + C_a H_P \quad \text{Equação 3.23}$$

sendo:

$$C_p = Q_A + \frac{gA}{a} H_A - R\Delta t Q_A|Q_A| \quad \text{Equação 3.24}$$

$$C_n = Q_B - \frac{gA}{a} H_B - R\Delta t Q_B|Q_B| \quad \text{Equação 3.25}$$

$$C_a = \frac{gA}{a} \quad \text{Equação 3.26}$$

A equação (3.22), conhecida como equação característica positiva, é válida ao longo da linha característica AP e equação (3.23), equação característica negativa, é válida ao longo da linha característica BP. Os valores de  $C_p$  e  $C_n$  são conhecidos e são constantes em cada passo

de tempo, apesar de poderem variar de um intervalo para outro.  $C_a$  é uma constante que depende das características do conduto.

Com o sistema de duas equações, (3.22) e (3.23), e duas incógnitas,  $H_P$  e  $Q_P$ , é possível encontrar uma solução para todos os pontos interiores da malha de cálculo (Figura 3.4) no tempo  $t_0 + \Delta t$ . Nos pontos de fronteira, têm-se as incógnitas  $H_P$  e  $Q_P$ , mas só há disponível uma das duas equações características. Para a solução nos pontos de contorno, são necessárias outras equações em termos de  $H$  e  $Q$ .

Considerando o sistema representado na Figura 3.3, a tubulação é dividida em  $n$  seções, cada uma com comprimento  $\Delta x$ . Os pontos extremos ( $N = 0$  e  $N = n$ ) estão na fronteira e os demais pontos estão no interior da malha. As condições de regime permanente no tempo  $t = t_0$  são calculadas e em seguida, utilizando as equações (3.22) e (3.23), calcula-se  $H$  e  $Q$  para os pontos interiores. Para o cálculo nos pontos em  $N = 0$  utiliza-se a equação característica negativa e nos pontos em  $N = n$ , utiliza-se a equação característica positiva.

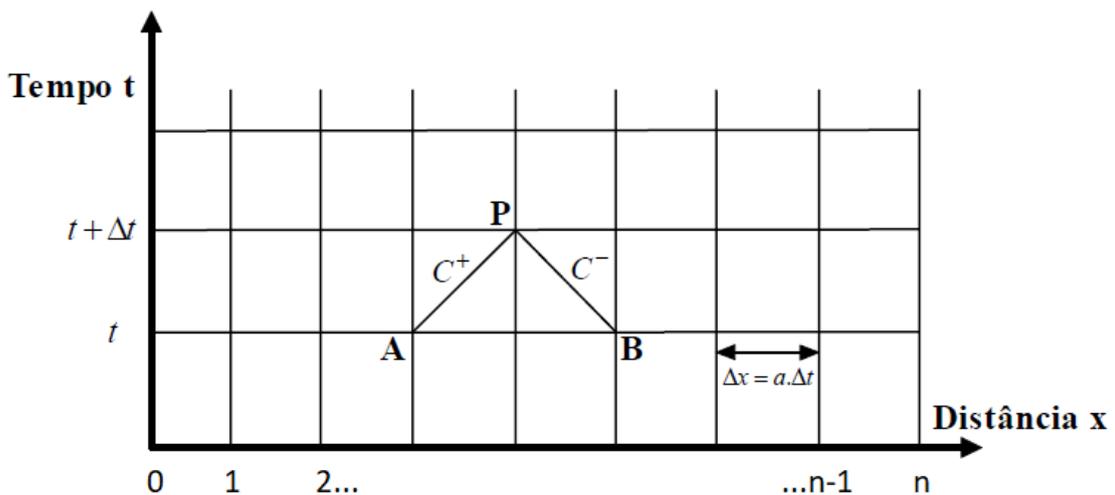


Figura 3.7 – Malha de cálculo método das características (Adaptada de: Soares, 2007)

Para que uma solução numérica de equações diferenciais parciais seja precisa, as aproximações feitas por diferenças finitas devem satisfazer a condição de estabilidade de Courant:

$$\Delta x \geq a\Delta t \quad \text{Equação 3.28}$$

O número de Courant,  $C_N$ , é definido como a razão entre a velocidade da onda  $a$  e a velocidade da onda encontrada numericamente,  $\Delta x/\Delta t$ :

$$C_N = \frac{a}{\Delta x/\Delta t} = \frac{a\Delta t}{\Delta x} \quad \text{Equação 3.29}$$

Assim, para que o esquema numérico seja estável, o passo de tempo  $\Delta t$  e o comprimento da seção  $\Delta x$  devem ser escolhidos para que:

$$C_N \leq 1 \quad \text{Equação 3.30}$$

É razoável assumir que o critério seja válido se os termos não lineares forem relativamente pequenos em relação aos outros termos das equações governantes (Chaudhry, 2014).

O uso da solução numérica baseada na discretização fixa da malha de cálculo do método das características, também chamada de método do intervalo de tempo fixo, é uma condição bastante desejada pela sua facilidade de cálculo quando comparada à utilização de uma malha não fixa tanto no tempo quanto no espaço. A utilização da malha fixa viabiliza ao analista um controle maior em relação aos cálculos, possibilitando a estimativa da pressão e velocidade no espaço em um intervalo de tempo constante. Essa técnica facilita demasiadamente o cálculo das condições de transitório hidráulico em sistemas de tubulação e redes de transporte de fluidos.

O esquema de malha fixa necessita de um intervalo de tempo  $\Delta t$  comum, entretanto, as tubulações de um sistema geralmente têm comprimentos e velocidades de onda diferentes, inviabilizando que o critério de Courant seja satisfeito caso seja usado os mesmos intervalos de tempo. Esse tipo de problema de discretização pode ser resolvido por técnicas de interpolação, ajustes artificiais ou por uma junção dos dois artifícios (Ghidaoui *et al.* 2005; Sam Ani e Khayatzaeh 2002).

Wood et al. (2005) compararam a formulação e performance computacional de dois métodos numéricos usados para modelagem de transientes hidráulicos em sistemas de distribuição de água: método das características (euleriano) e o método das ondas características (lagrangeano). A abordagem euleriana reformula as equações governantes, transformando-as em equações diferenciais totais, que então são expressas na forma de diferenças finitas. Também atualiza o estado hidráulico do sistema em pontos fixos da malha de cálculo à medida que o tempo avança com incrementos uniformes. A abordagem lagrangeana,

utilizada no método das ondas características, investiga o movimento e transformação das ondas de pressão ao longo do sistema, e atualiza o estado hidráulico do sistema (estado do escoamento) em intervalos de tempo fixos ou variáveis. Os modelos foram contrastados com respeito a quão próxima foi a combinação de seus resultados com soluções analíticas, quão próxima foi a combinação entre seus próprios resultados, quanto tempo levou para o modelo ser executado e quantas etapas de cálculo foram necessárias para isso. Resultados indicaram que a precisão dos métodos é comparável, porém o método lagrangeano foi computacionalmente mais eficiente para a análise de grandes sistemas de distribuição de água.

No estudo de Ghidaoui *et al.* (2005) é realizada uma extensa revisão sobre a análise dos transitórios hidráulicos em condutos forçados e, neste estudo, para exemplificação da popularidade do método das características, os autores apresentam onze pacotes de software disponíveis comercialmente para o estudo do golpe de aríete, sendo que oito deles utiliza o método das características, dois são baseados no método das diferenças finitas implícito e somente um emprega o método da expansão de ondas planas, também conhecido como método das ondas características. Segundo os autores, o método das características é amplamente utilizado graças à sua simplicidade, precisão e facilidade de programação.

### **3.4. IMPLICAÇÕES DEVIDO À OCORRÊNCIA DE TRANSIENTES HIDRÁULICOS**

A geração de ondas no fenômeno transiente hidráulico é o mecanismo utilizado para ajuste das condições de fluxo. Esse fenômeno é inevitável e ocorre naturalmente em sistemas de distribuição de água (Boulos *et al.*, 2005). Entretanto, eventos transitórios podem ser severos e causar perdas consideráveis e irreparáveis. Tendo isso em mente, para que as situações que viabilizam a ocorrência do evento sejam identificadas e isoladas, é necessário conhecer as consequências geradas pelo fenômeno.

Picos de pressão positiva durante o regime transitório podem gerar rachaduras internas nas tubulações, danificar conexões, válvulas, destruir ou deformar outros equipamentos componentes do sistema. Quando o dano não é percebido a tempo e aparecem vazamentos, corrosões, além de outras situações indesejadas, após um certo período de tempo com ocorrências repetidas de regimes transitórios, a espessura da parede da tubulação pode afinar

e o colapso da estrutura suceder, provocando importantes perdas econômicas e, mais grave, perdas de vidas (Boulos *et al.*, 2005).

Pressões negativas também são objeto de preocupação, pois podem viabilizar o contato entre o fluido e o meio externo, caso haja algum defeito como rachaduras ou fissuras no conduto. Assim, organismos patogênicos e contaminantes podem ser introduzidos e transportados até o usuário, possibilitando que problemas graves de saúde pública possam ocorrer. Em baixas pressões, oxigênio dissolvido pode ser liberado da água na forma de gás e isso pode promover a corrosão de unidades feitas de metal como aço e ferro. Mesmo com a instalação de dispositivos de proteção, como válvulas de alívio, ventosas, chaminés de equilíbrio, reservatórios hidropneumáticos, se estes não forem bem projetados e sofrerem manutenção inadequada, contaminantes podem entrar em contato com a água potável. Isso enfatiza ainda mais a necessidade da manutenção de níveis adequados de desinfetante residual ao longo da rede de distribuição (Boulos *et al.*, 2005).

Porto (2006) conceitua o fenômeno da cavitação dizendo que, quando um líquido em escoamento a uma determinada temperatura passa por uma região de baixa pressão (menor ou igual à pressão de vapor), bolhas de vapor são formadas. À medida que são transportadas e atingem uma região de pressão maior que a da região em que elas foram formadas, as bolhas começam a sofrer colapso por implosão. O processo de criação e colapso das bolhas é conhecido como cavitação e ocorre em um período de tempo muito curto. Como consequência do desaparecimento das bolhas junto a uma fronteira sólida, como paredes das tubulações e partes das bombas, ocorre um processo destrutivo de erosão do material, desgaste excessivo do rotor da bomba e queda de seu rendimento, além de ruídos e vibrações. Tudo isso faz com que seja necessária uma manutenção periódica e dispendiosa.

### **3.5. CAUSAS DOS TRANSIENTES**

De acordo com Boulos *et al.* (2005), transiente hidráulico é uma variação das condições do fluxo que ocorre durante a mudança de regime de escoamento, geralmente de um estado permanente e em equilíbrio para outro com essas mesmas características. A principal característica do fenômeno é a oscilação dos picos de pressão, que vai gerar a propagação de ondas de pressão através do sistema. Estas viajam com a velocidade do som, que depende da compressibilidade do fluido e da elasticidade e espessura do material do conduto. À medida que as ondas se propagam, elas vão sendo dissipadas pela ação da força de atrito e o sistema retorna à estabilidade.

Em geral, qualquer perturbação causada no fluido, sendo ela planejada ou acidental, é motivo para início de uma sequência de ondas (variação da pressão) se propagando ao longo do sistema.

Boulos et. al. (2005) e Chaudhry (2014) apresentam alguns eventos que provocam a ocorrência de transientes hidráulicos em sistemas de distribuição de água: acionamento ou desligamento de bombas, abertura e fechamento de válvulas (variação da área de escoamento do fluido), mudança do nível de reservatórios, variação rápida da vazão de demanda, acionamento de turbinas hidráulicas, abertura e fechamento de comportas de um canal.

Para mitigação das condições de fluxo transitório, é possível projetar e implementar uma série de medidas, como alteração das características da tubulação (aumentar o diâmetro), aperfeiçoamento do controle dos processos de abertura e fechamento de válvulas e acionamento e desligamento de bombas, instalação de dispositivos de proteção, como volantes de inércia, ventosas, reservatórios unidirecionais, by-pass, chaminés de equilíbrio, reservatórios hidropneumáticos, válvulas de alívio e de retenção.

### **3.6. MODELAGEM MATEMÁTICA**

Modelos matemáticos são ferramentas primordiais para análises de sistemas hidráulicos quanto à verificação da segurança e eficiência operacional.

Muitos modelos matemáticos foram propostos para simulação do comportamento do fluxo unidimensional de fluido ligeiramente compressível através de um sistema de tubulação pressurizado. Esses modelos são classificados como modelos dinâmicos (taxa de fluxo e pressão dependentes do tempo) e modelos estáticos (taxa de fluxo e pressão independentes do tempo). Modelos dinâmicos também podem ser classificados como inerciais e não inerciais. Os dois tipos de modelos inerciais são conhecidos como modelo de coluna elástica (modelo distribuído), usado para estudos de golpe de aríete, e modelo de coluna rígida (modelo concentrado), usado para variações lentas de fluxo. Modelos não inerciais são chamados de quasi-estáticos (Abreu *et al.* 1999).

Abreu *et al.* (1999) classificam quatro tipos de modelos disponíveis para análise de fluxos em sistemas de tubulações, com o interesse de selecionar qual deles é mais conveniente para a composição de tubos em série. A aplicabilidade de cada modelo é governada pelas características da interação fluido/tubulação (o parâmetro de Allievi  $\rho$  e atrito caracterizam

esse comportamento) e pelas taxas de variação  $\partial H/\partial t$  e  $\partial V/\partial t$  nas fronteiras. A Figura 3.5 mostra um diagrama que resume os tipos de modelos existentes para simulação hidráulica em condutos forçados.

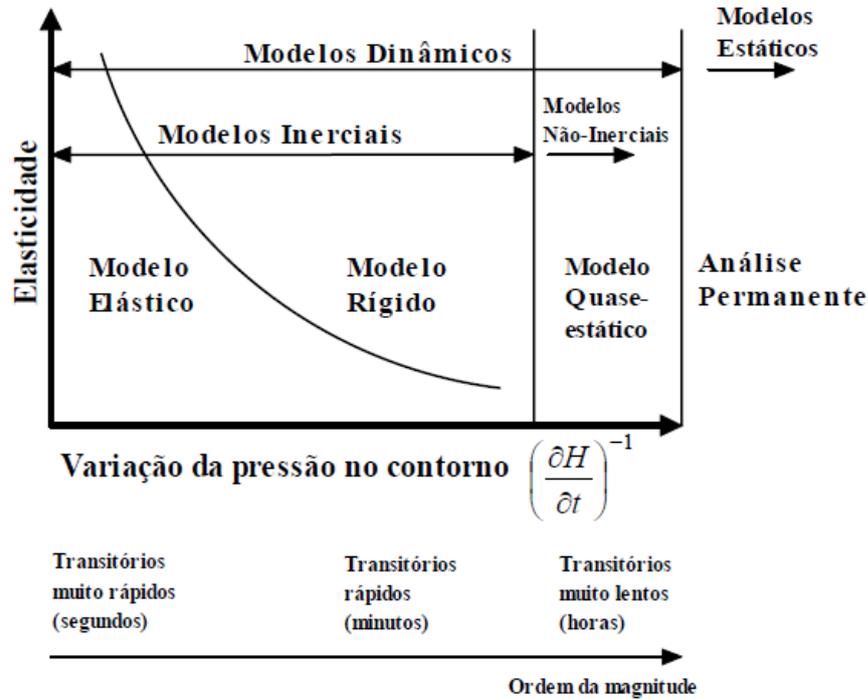


Figura 3.8 – Diagrama dos modelos hidráulicos para tubos em série (Adaptado de Abreu et al., 1999 por Soares, 2007)

Sam Ani e Khayatzadeh (2002) desenvolveram um programa computacional capaz de analisar sistemas de tubulações que podem incluir diversos dispositivos (bombas, válvulas e outros). O programa é baseado em técnica de interpolação (ou diferenças finitas) acoplada ao método das características. O objetivo foi aplicar uma discretização fixa de malha de cálculo do método das características para um fluxo transitório que ocorre em um sistema composto por várias tubulações, obedecendo a condição de Courant ( $C_N \leq 1$ ). Métodos numéricos de interpolação linear e não-linear e esquemas de diferenças finitas implícito também foram investigados e chegou-se ao resultado de que, para tratar a desproporcionalidade da tubulação com comprimento diferente (com condição de Courant sendo obedecida), o acoplamento dos métodos citados é o mais indicado, por ter sido mais preciso que os outros.

Kwon e Lee (2008) estudaram o fluxo transitório comparando resultados de três modelos numéricos diferentes, o método das características, modelo axisimétrico e modelo de esquema implícito. Além disso, também os compararam com dados observados experimentalmente. Um conduto simples com uma válvula de redução de pressão instalada na extremidade à montante da tubulação foi construída em laboratório. Resultados mostraram que o coeficiente de perda de carga para modelos unidimensionais (método das características e esquema implícito) deveria ser muito maior do que o coeficiente de atrito de Darcy-Weisbach ( $f$ ), caso somente  $f$  fosse usado nos modelos computacionais, o decaimento das ondas de pressão seria significativamente subestimado nos cálculos. Assim, um coeficiente de perda de carga foi determinado experimentalmente e usado para o método das características e para o modelo de esquema implícito. Da mesma forma, um coeficiente de amortecimento foi determinado experimentalmente e utilizado no modelo axisimétrico. Dentre os três modelos numéricos, modelo axisimétrico trouxe melhores resultados em precisão numérica e o modelo de esquema implícito mostrou ser estável nos cálculos. O método das diferenças finitas tem a menor demanda computacional, sendo muito conveniente para aplicação. Os resultados computacionais e experimentais mostraram que dispositivos de segurança contra golpe de aríete reduzem seus impactos negativos.

## 4. METODOLOGIA

Soares *et al.* (2013) analisaram o fluxo transitório em um sistema de bombeamento de água causado pelo desligamento de uma das bombas da estação elevatória de Prado – Instituto Politécnico da Guarda (IPG), localizada em Guarda, Portugal. Em seus estudos, foram realizadas saídas de campo para coleta de dados referentes à pressão interna da tubulação no momento em que ocorria o transiente hidráulico e de dados da taxa de fluxo em estado permanente. No trabalho dos autores citados, os valores de pressão observados foram comparados a resultados numéricos em que o efeito de atrito variável foi levado em consideração.

Assim como na etapa de projeto, a análise de transiente hidráulico é igualmente importante no estágio de operação do sistema para diagnóstico de problemas de mal funcionamento ou de causas de ruptura de condutos. Para esse caso, é extremamente importante o uso de modelos que incorporam efeitos adicionais que geralmente não estão disponíveis em softwares comerciais, como por exemplo atrito variável, cavitação, efeitos da interação fluido-estrutura, comportamento visco elástico do material que é feita a tubulação, vazamentos e outros (Soares *et al.*, 2013). Porém, em geral pacotes de software comerciais como o ALLIEVI (Universidad Politécnica de Valencia, 2014) são baseados na teoria clássica do golpe de aríete, em que estes mecanismos são negligenciados, mas mesmo assim são satisfatórios para estimativa de pressões extremas e permitem o projeto de dispositivos de proteção. Entretanto, esses modelos comerciais são frequentemente imprecisos para análise e realização de diagnósticos de sistemas reais (Soares *et al.*, 2013).

Sendo assim, este trabalho pretende realizar a modelagem do sistema hidráulico no estudo de caso apresentado em Soares *et al.* (2013) e a comparação dos dados adquiridos em campo pelos autores com os resultados numéricos do software ALLIEVI.

### 4.1. SISTEMA DE ADUÇÃO

A Figura 4.1 mostra um esquema simplificado do sistema de adução que liga o reservatório do Prado ao do IPG, que é gerido pela entidade Águas do Zêzere e Côa, da cidade de Guarda, Portugal. A Figura 4.2 mostra o seu perfil topográfico.

A estação elevatória de Prado é composta por três bombas submersíveis e duas bombas centrífugas instaladas em paralelo. Imediatamente após cada bomba sai uma tubulação de

ferro fundido dúctil de 200 mm, que liga à tubulação de compressão de 300 mm de diâmetro e também feita de ferro fundido dúctil. Entre a bomba e a tubulação de compressão existe uma válvula de retenção instalada, usada para prevenir reversão de fluxo, em seguida há uma válvula de regulação de fluxo (ou de controle) e depois uma válvula de gaveta. O dispositivo de proteção instalado é uma válvula de alívio de pressão com 200 mm de diâmetro nominal. A tubulação de compressão se prolonga até o interior de uma caixa de visita, de onde a tubulação principal se inicia e termina na entrada do reservatório IPG. A principal é feita de ferro fundido dúctil, com diâmetro nominal de 500 mm e comprimento de 2225 metros. Na Figura 4.2, que mostra o perfil da adutora, o ponto C representa o ponto onde há uma ventosa instalada.

Próximo ao final da tubulação, existe um medidor de vazão eletromagnético instalado, seguido por uma redução de diâmetro para 400 mm de um tubo de PVC, que conecta a três ramos de PVC de 200 mm de diâmetro. Esses três condutos de PVC estão na posição vertical e possuem descarga livre para o tanque IPG. O comprimento total a partir da estação elevatória de Prado até o reservatório IPG é aproximadamente 2241 metros.

Na Figura 4.1, P1 e P2 indicam a localização dos transdutores de pressão (frequência de aquisição de 50Hz) e Q1 e Q2 apontam a localização dos medidores de vazão, ultrassônico e eletromagnético, respectivamente. Nesta figura também é mostrado um detalhe da tubulação de entrada no reservatório IPG (descarga livre para a atmosfera).

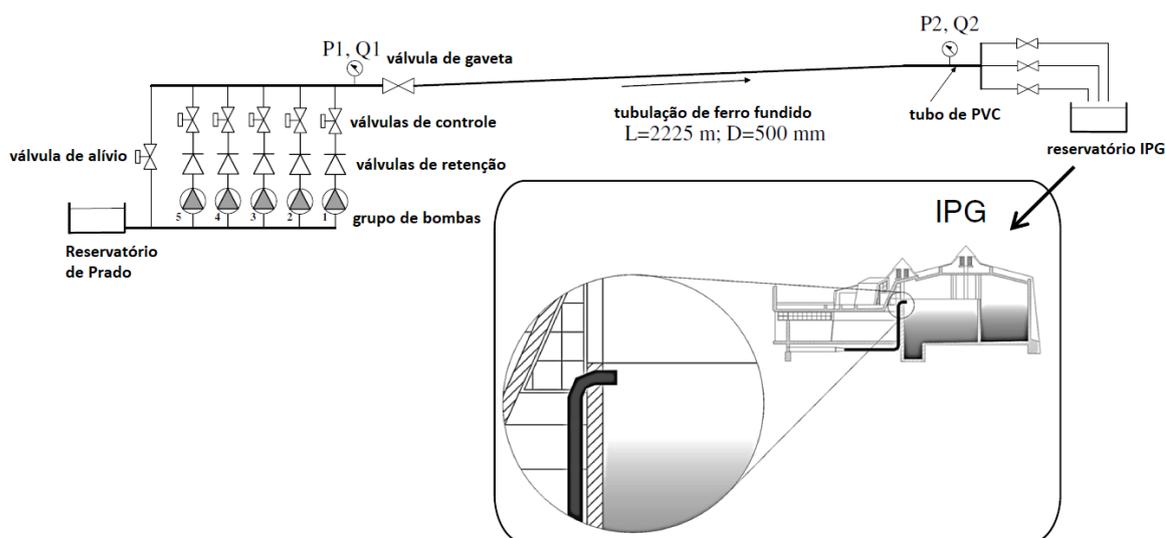


Figura 4.1 – Esquema simplificado do sistema de adução de água de Guarda (Adaptado de: Soares *et al.*, 2013)

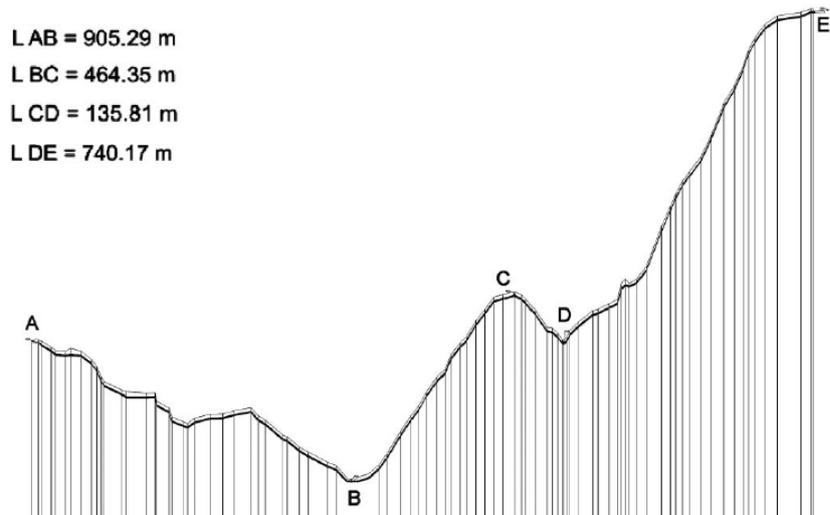
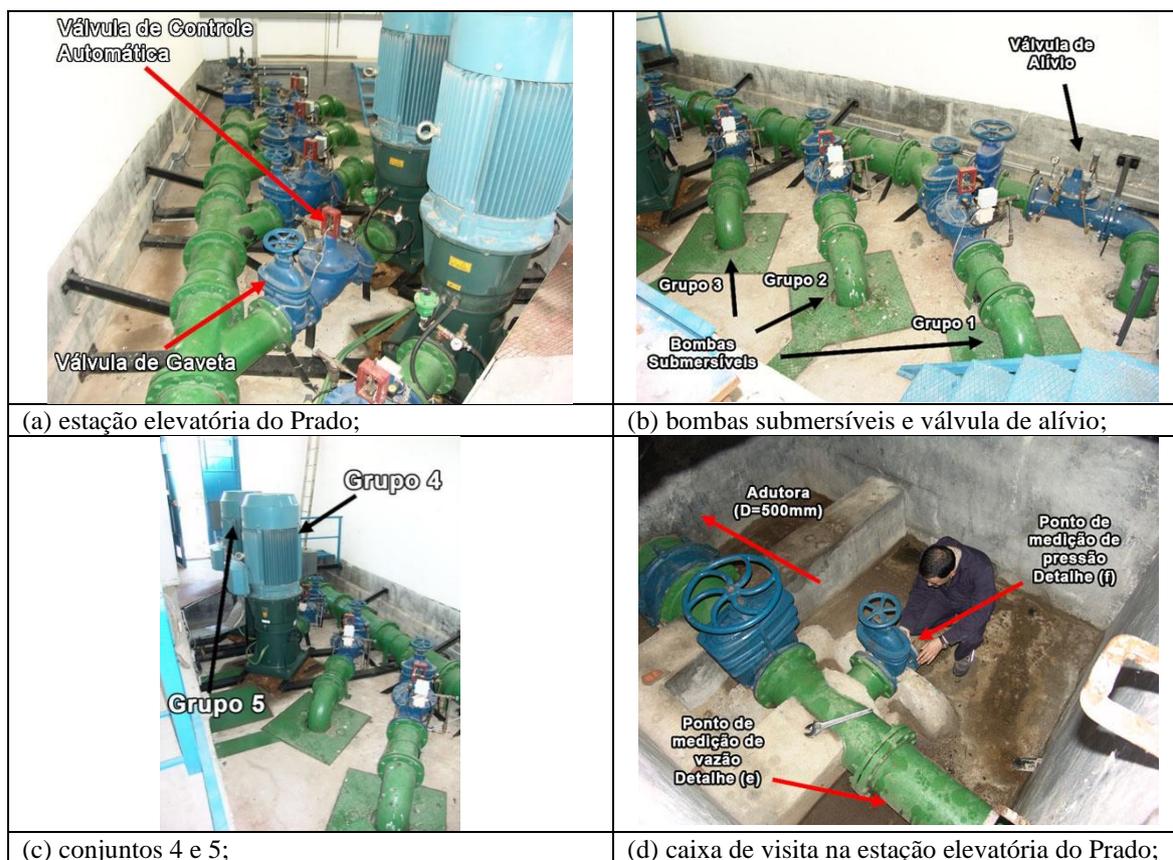


Figura 4.2 – Perfil do sistema de adução de Guarda. (Soares *et al.*, 2013)

As cotas dos pontos A, B, C, D e E (Figura 4.2) são 874,0 m, 836,6 m, 889,4 m, 875,7 m, e 977,5 m, respectivamente.

A Figura 4.3 mostra detalhes do sistema de adução.



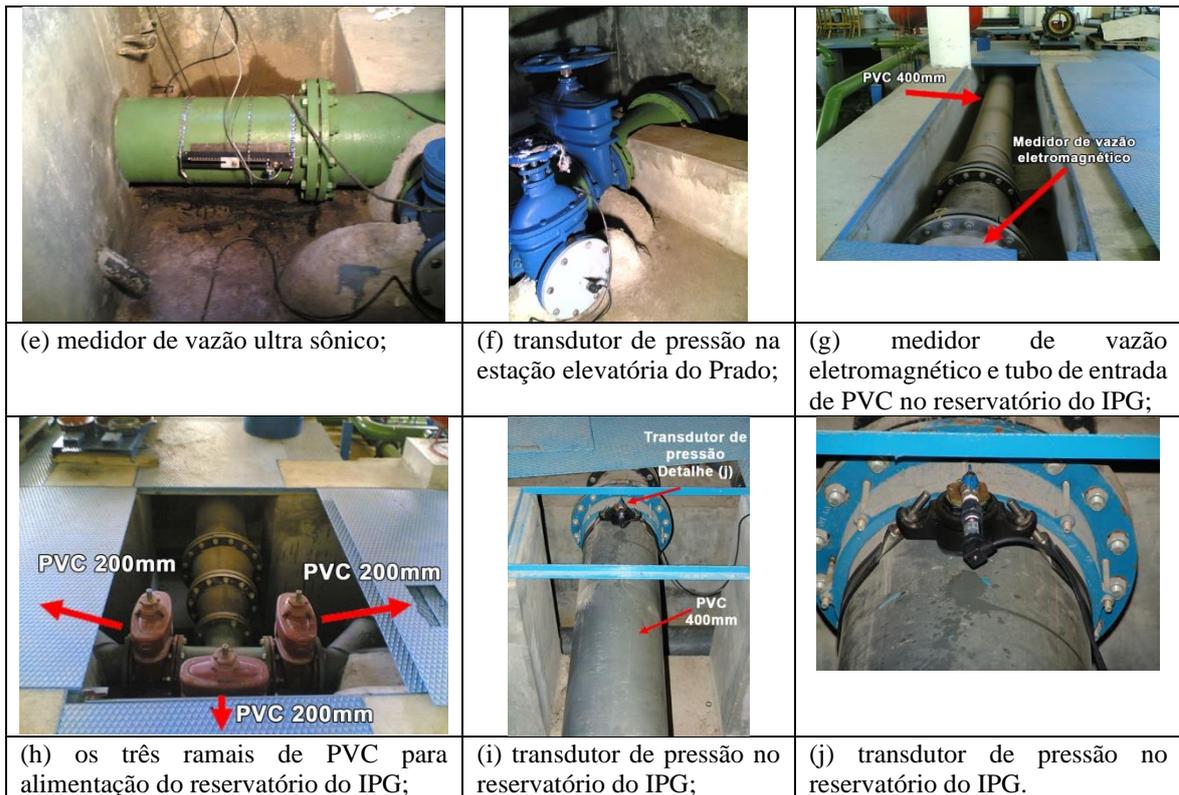


Figura 4.3 – Detalhes do sistema de adução. (Soares *et al.*, 2008)

## 4.2. O PROGRAMA ALLIEVI

O programa ALLIEVI (Universidad Politécnica de Valencia, 2014) é um software que tem como principal função a simulação e/ou análise dos efeitos gerados por transientes hidráulicos em sistemas pressurizados. O programa reconhece que o fluido é transportado no interior da tubulação através da aceleração da gravidade, por impulsão de uma série de tanques elevados. Também reconhece que o transporte possa ocorrer pela condução feita por estações elevatórias ou até mesmo pela combinação de tanques e estações. Redes ramificadas, redes malhadas ou arranjos que misturam as duas configurações podem ser construídos no programa para simulação de sistemas pressurizados.

Em sistemas pressurizados, como já visto, o transiente hidráulico é governado por duas equações diferenciais parciais não-lineares: equação da conservação de massa (3.2) e equação da quantidade de movimento (3.3), com altura piezométrica ( $H$ ) e velocidade ( $V$ ) variando em relação à posição longitudinal e ao tempo. Como este sistema de equações não possui uma solução analítica exata, o processo de integração é feito para intervalos de tempo  $\Delta t$  específicos e em pontos definidos da tubulação, separados pelo comprimento  $\Delta x$ , satisfazendo as condições (3.15) e (3.17). Considerando essas condições, as equações

governantes são transformadas em um sistema de equações lineares algébricas (3.14) e (3.16), assim, fica possível o cálculo das duas variáveis desconhecidas,  $H$  e  $V$ . A solução das equações governantes é obtida pelo Método das Características, que é a base de cálculo do programa ALLIEVI.

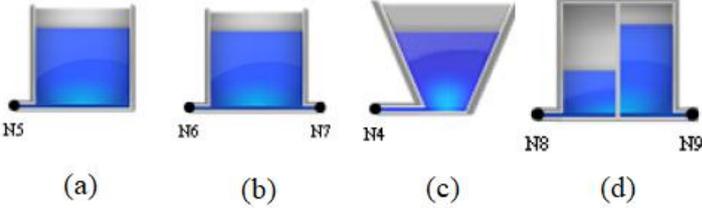
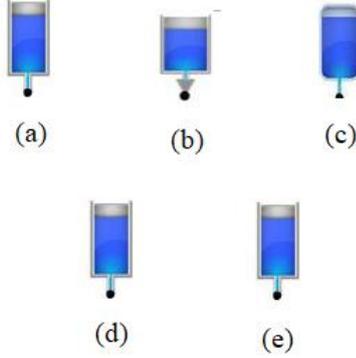
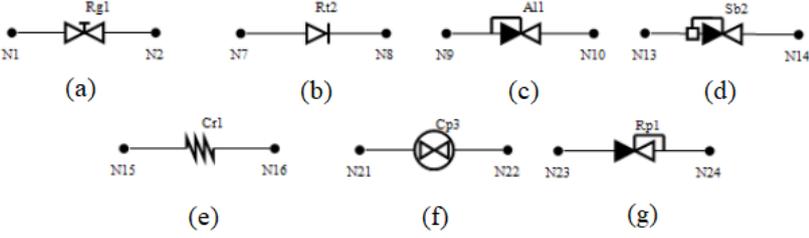
O sistema de equações lineares algébricas pode ser aplicado para qualquer ponto da tubulação, exceto em suas extremidades, onde uma das equações do sistema não é aplicável, ou seja, nestes pontos existem duas incógnitas e somente uma equação admissível. Nessas extremidades, onde supostamente a tubulação está conectada a algum dispositivo do sistema, uma das equações ausentes pode ser substituída por outra equação ou sistema de equações que representa a condição de contorno, determinante do comportamento do dispositivo.

Como já mencionado na seção 3.2, que fala sobre as equações governantes, uma das hipóteses consideradas nas equações da continuidade e da quantidade de movimento para uma análise convencional de transiente hidráulico é que as perdas de carga são calculadas a partir de formulações para o escoamento permanente. Por exemplo, é incorporada a perda de carga devida ao atrito pela *fórmula universal de perda de carga*, também conhecida como *equação de Darcy-Weisbach* (Guidaoui, 2005). Essa é uma consideração feita para simplificação de cálculos para que dessa maneira não seja incorporado o fator de atrito variável, presente no fluxo transitório. Softwares comerciais como o Allievi utilizam essa consideração para simplificação do cálculo e para majoração da pressão e da vazão, o que pode ser considerado como uma limitação do software, já que, segundo Soares (2007), investigações de campo e de laboratório demonstram que as pressões geradas pelo fechamento rápido de uma válvula sofrem maior atenuação dos pulsos no evento transitório do que previstas nas simulações hidráulico-computacionais, sendo esse fato decorrente da utilização de um fator de atrito para o escoamento permanente nas simulações dos transitórios hidráulicos. Caso fosse considerado o fator de atrito variável no software Allievi, seria necessário o desenvolvimento do seu equacionamento, além do desenvolvimento do modelo da coluna elástica.

O sistema hidráulico a ser simulado pelo programa é constituído por elementos que são conectados uns aos outros através de nós (inicial e final). A direção positiva do fluxo em cada elemento é estabelecida do nó inicial ao final. Na Tabela 4.1 encontra-se a representação gráfica da variedade de componentes que podem ser utilizados para representar sistemas de adução com diferentes condições de contorno.

Os elementos são classificados em cinco categorias: (i) elementos básicos (bombas, condutos, nós e canais); (ii) tanques; (iii) válvulas; (iv) dispositivos de proteção e (v) outros, que contém leis de vazão e carga. Todos eles podem ser facilmente incluídos no desenho representativo do sistema graças à interface gráfica simples do software. Na Figura 4.4, vem destacado em vermelho o local onde se encontram as cinco categorias de classificação.

Tabela 4.1 Elementos modelados no programa ALLIEVI.

Elementos	Representação gráfica no ALLIEVI
Nós	
Reservatórios (tanques): a) Grandes dimensões (ou nível constante); b) Pequenas dimensões (ou nível variável); c) Seção variável; d) Com divisão e vertedor.	
Trecho com condutos forçados	
Bombas	
Dispositivos de proteção: a) Chaminé de equilíbrio; b) Tanque de alimentação unidirecional (TAU); c) Reservatório hidropneumático (RHO); d) Chaminé de equilíbrio com seções diferenciais; e) Chaminé de equilíbrio com seção variável.	
Dispositivos de controle de fluxo: a) Válvulas de regulação; b) Válvulas de retenção; c) Válvulas de alívio; d) Válvulas de excesso de fluxo; e) Perdas de carga localizada; f) Válvulas compostas; e g) Válvulas automáticas.	
Leis de vazão (Q) ou de carga (H)	
Canais (condutos livres)	

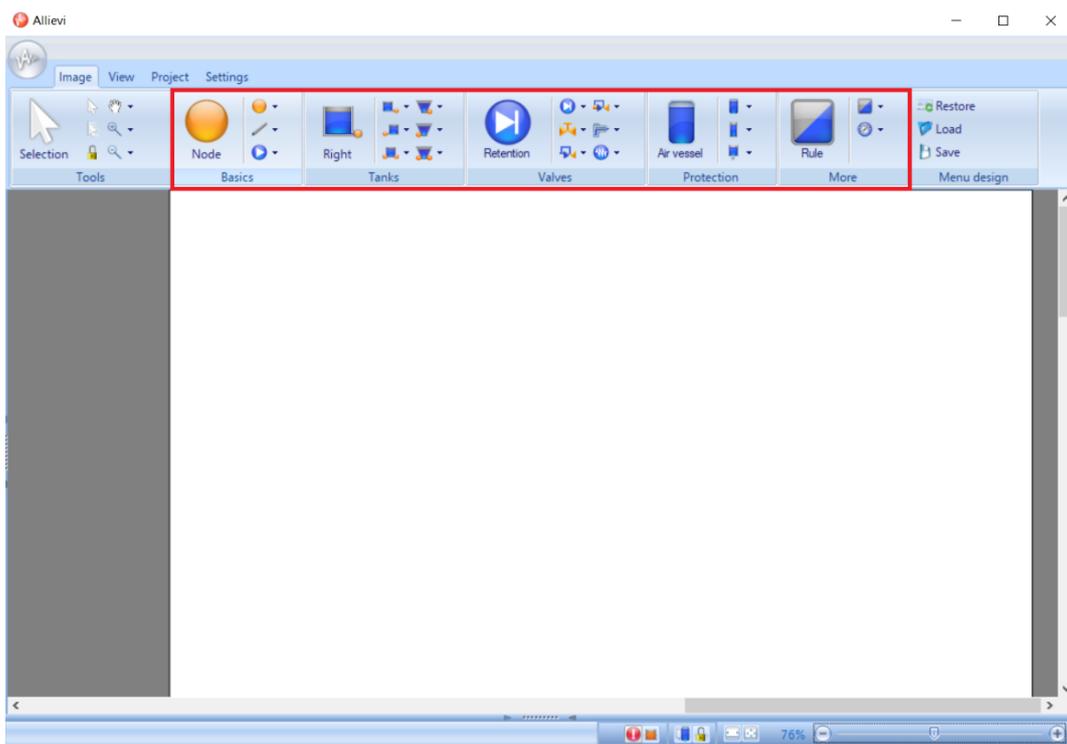


Figura 4.4 – Interface gráfica do software ALLIEVI.

Os tanques são elementos que armazenam água à pressão atmosférica. O programa consegue modelar tanques de grandes dimensões (nível constante), pequenas dimensões (nível variado), tanques com corte transversal variável e tanque com barreira. Este último possui uma parede fina com vertedor separando a zona de entrada da zona de saída.

Os dispositivos de proteção são utilizados para reduzir a variação da pressão interna que ocorre dentro do sistema de tubulação, uma vez que o transiente hidráulico tenha sido gerado. De forma geral, esses dispositivos são projetados para armazenar uma certa quantidade de volume de água e liberá-la à tubulação principal à medida que o fluxo que circula por ela é reduzido. Os tipos de estrutura de proteção incluídas no Allievi são: chaminés de equilíbrio simples, de seção variável e diferencial, atuando quando há eventos de depressão e sobrepessão; tanque de escoamento unidirecional, utilizados para atenuar as pressões negativas, enchendo de água as zonas de baixa pressão causadas pelo transiente hidráulico; e reservatório hidropneumático.

Válvulas de ar (ou ventosas) são instaladas nos condutos com o intuito de se evitar pressões negativas no interior da tubulação. O software tem uma base de dados interna de curvas características para ventosas, mas também permite que o usuário introduza uma nova curva característica.

Para modelagem do grupo de bombas em estações elevatórias, é possível escolher quantas unidades serão colocadas em paralelo, definir a forma da curva característica da bomba (universal ou ajustada por pontos), definir o tipo de válvula na saída de cada bomba (válvula de retenção e de regulação), assim como se terá by-pass ou não entre a zona de entrada e saída da estação.

Para controle do fluxo que atravessa os condutos, deve haver no sistema diferentes tipos de válvulas instaladas, sendo que algumas delas também podem agir como dispositivos de proteção contra transientes. Assim, os dispositivos de controle de fluxo são basicamente: válvulas de controle (regulação), estas manipulam a vazão do fluido pela alteração de sua abertura, e abrangem diferentes tipos como, borboleta, esférica, de gaveta, diafragma e reguladoras de pressão; válvulas de retenção, ela permite o escoamento em um único sentido e bloqueia o fluxo quando este passa a escoar no sentido contrário, ou seja, evita que ocorra o refluxo na tubulação, protegendo as instalações hidráulicas; válvulas de alívio, que tem como função evitar que a pressão ultrapasse níveis considerados muito altos; válvulas de excesso de fluxo, dispositivos que se fecham quando é detectada uma grande variação na vazão, principalmente em casos de ruptura.

### 4.3. CENÁRIOS

Foram construídos sete cenários com condições de contorno diferentes para a tentativa de modelagem de um sistema de adução real. O intuito é comparar as pressões logo após a estação elevatória e fazer uma análise do fechamento da válvula de retenção através da resposta obtida nos valores de pressão e da influência de descarga livre ou não.

A combinação dos cenários construídos é apresentada na Tabela 4.2:

Tabela 4.2 Cenários.

			TIPO DE FECHAMENTO DA VÁLVULA	
			1	2
CONDIÇÃO DE CONTO RNO À JUSANTE	1.	Reservatório de nível constante ligado à tubulação	Válvula de retenção com fechamento instantâneo (ligada ao conjunto moto-bomba)	Válvula de retenção simulada como válvula de regulação (em linha com o conjunto moto-bomba)
	2.	Reservatório de nível variável com descarga livre		
	3.	Lei de altura		
	4.	Lei de vazão	-	

As Figuras 4.5 a 4.11 ilustram a disposição dos elementos de cada cenário na interface gráfica do programa ALLIEVI.

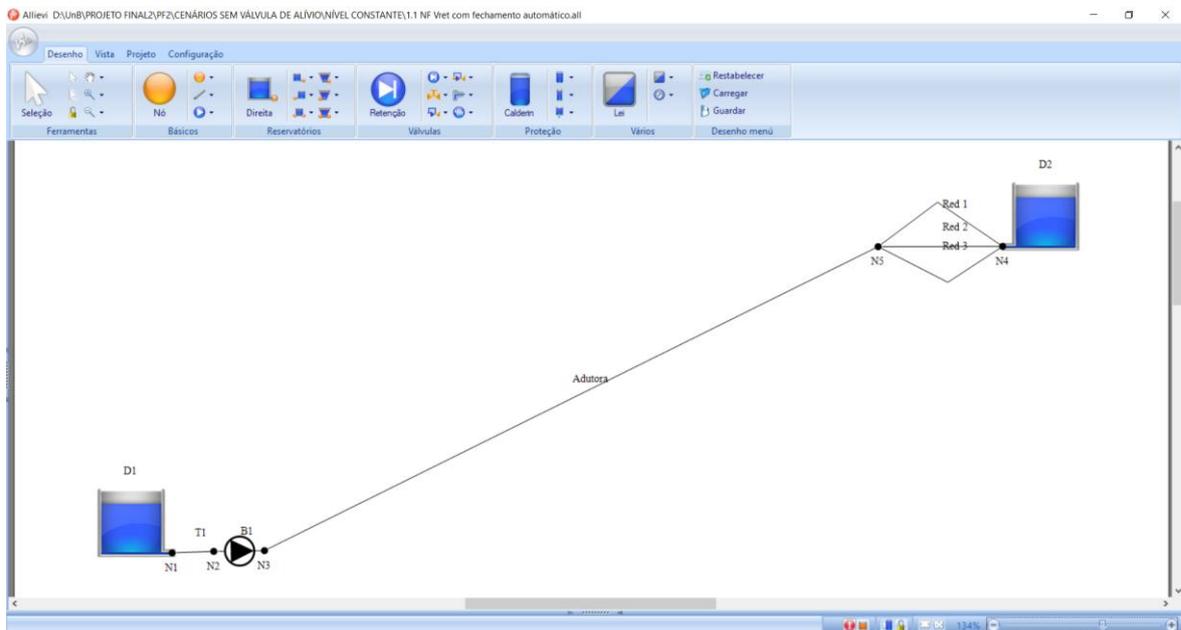


Figura 4.5 – Cenário 1.1 – Sistema com válvula de retenção com fechamento instantâneo e reservatório de nível constante à jusante.

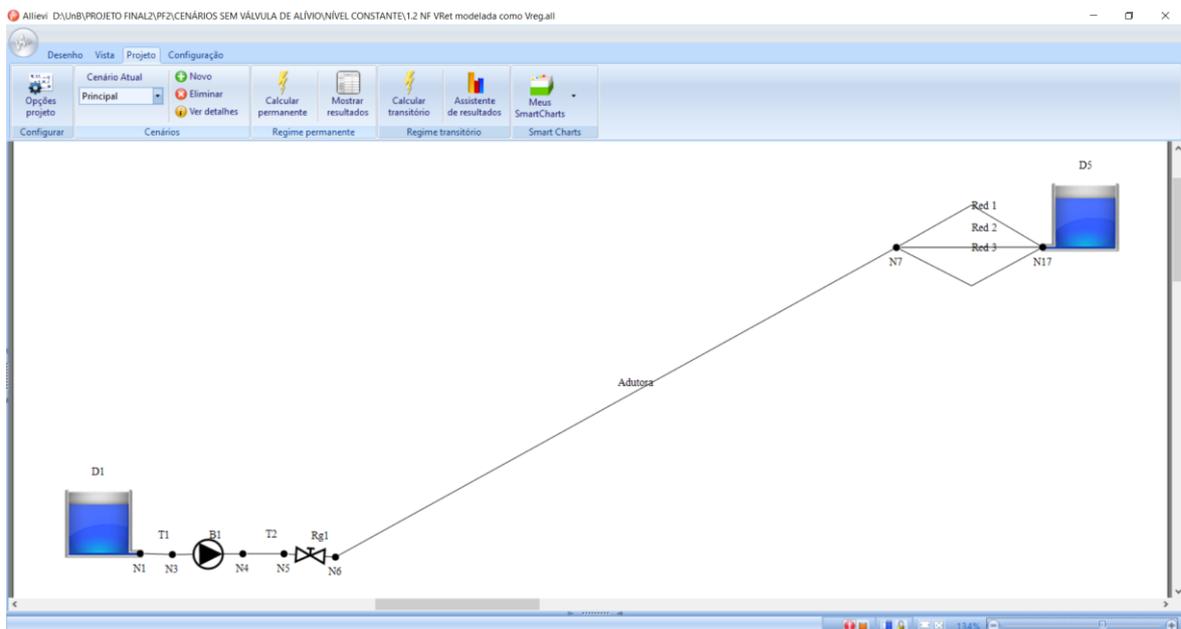


Figura 4.6 – Cenário 1.2 – Sistema com válvula de retenção simulada como válvula de regulação e reservatório de nível constante à jusante.

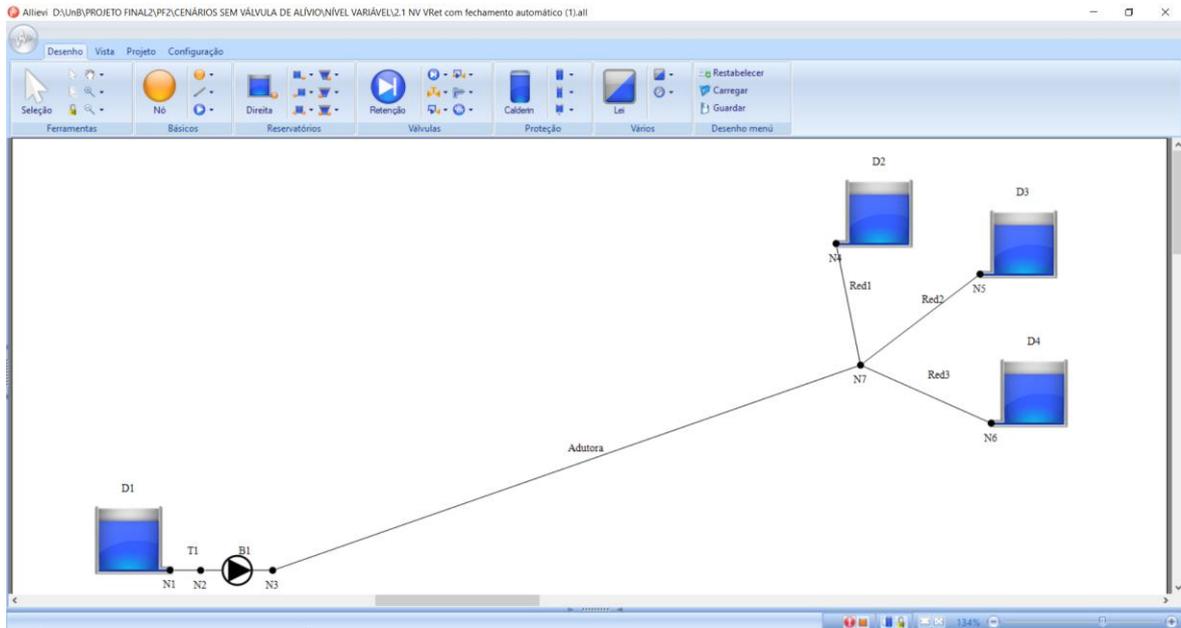


Figura 4.7 – Cenário 2.1 – Sistema com válvula de retenção com fechamento instantâneo e reservatório de nível variável à jusante.

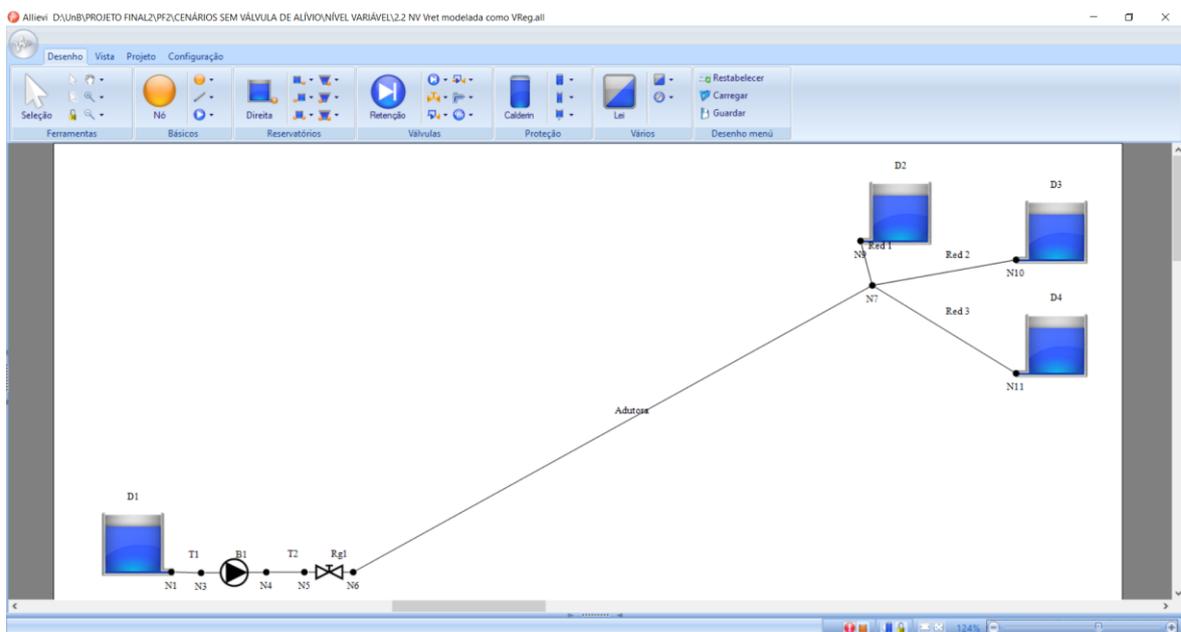


Figura 4.8 – Cenário 2.2 – Sistema com válvula de retenção simulada como válvula de regulação e reservatório de nível variável à jusante.

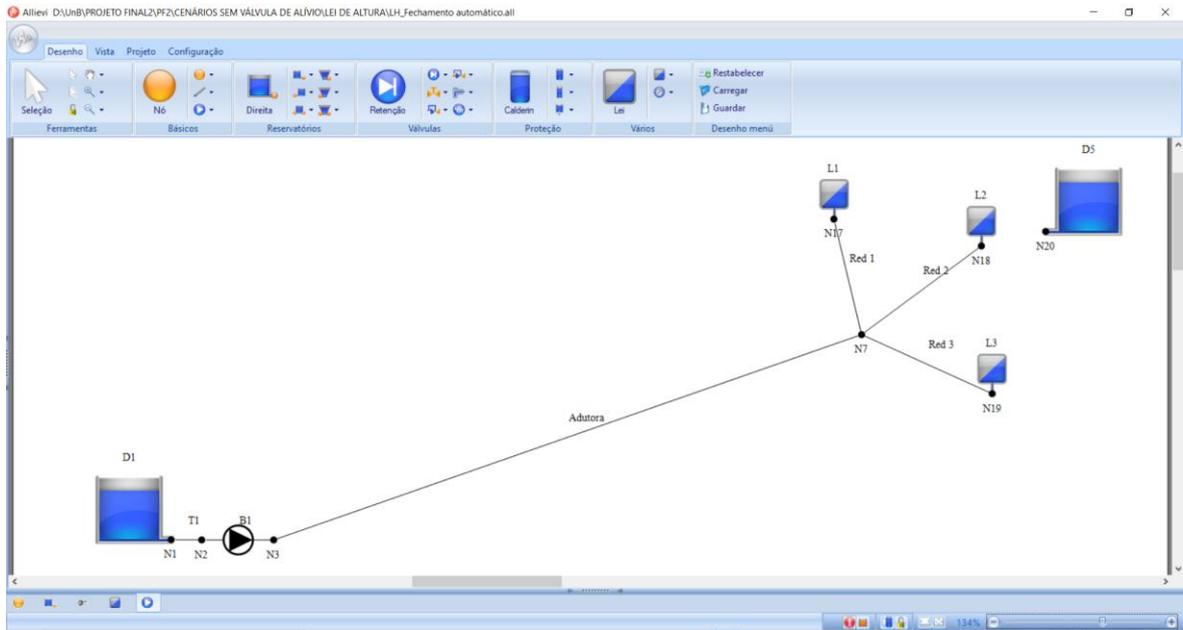


Figura 4.9 – Cenário 3.1 – Sistema com válvula de retenção com fechamento instantâneo e lei de altura.

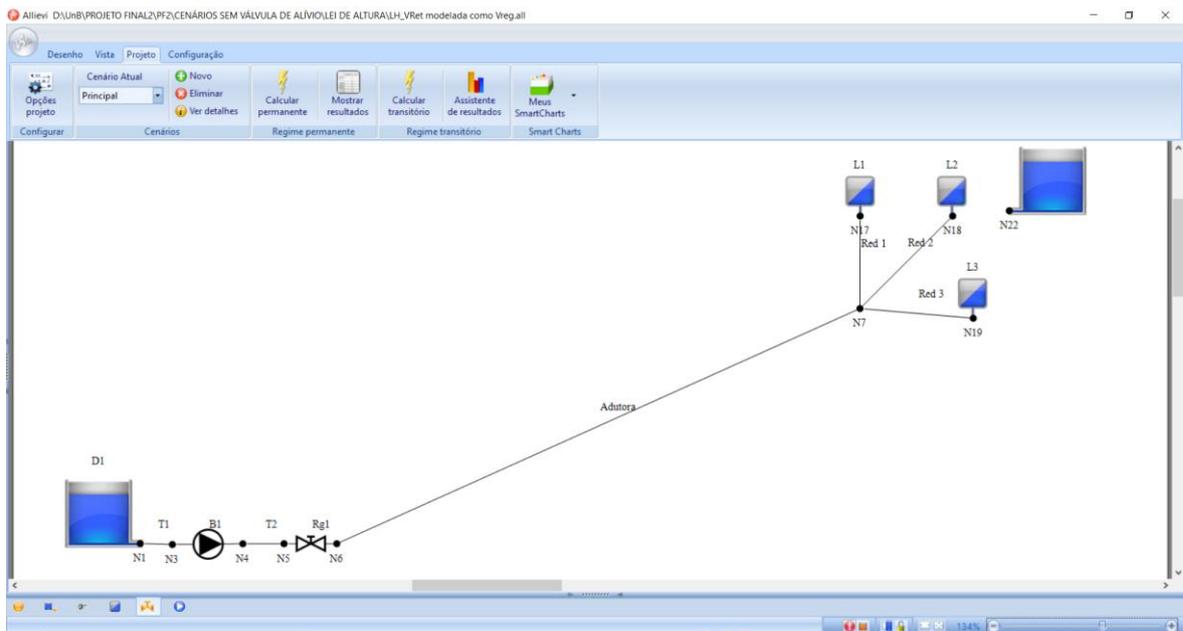


Figura 4.10 – Cenário 3.2 – Sistema com válvula de retenção modelada como válvula de regulação e lei de altura.

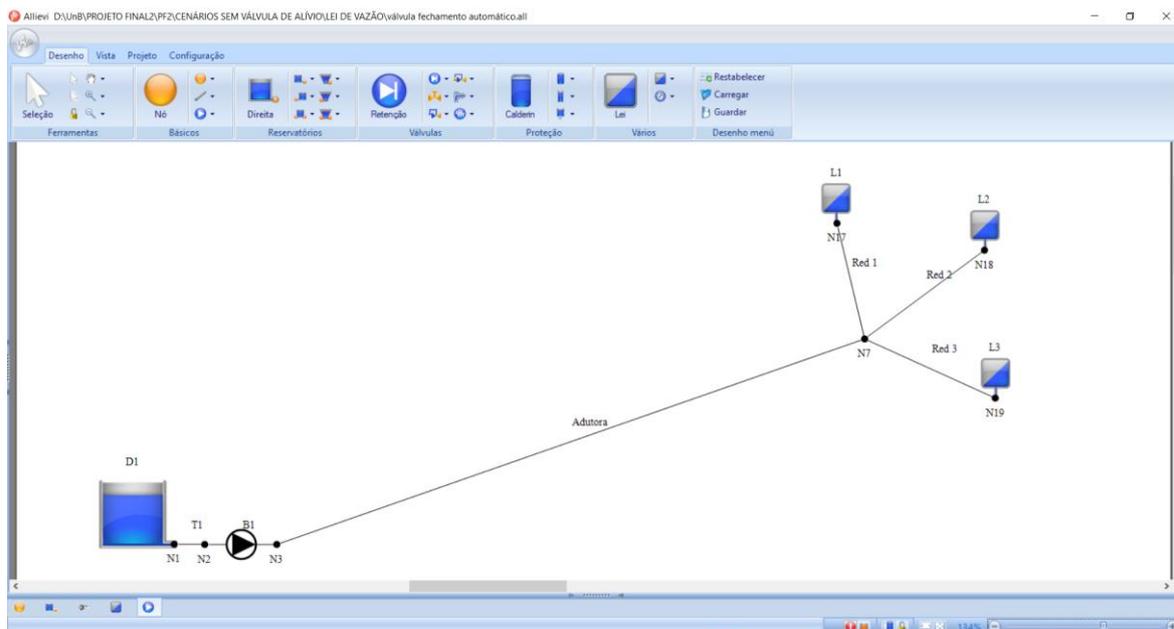


Figura 4.11 – Cenário 4.1 – Sistema com válvula de retenção com fechamento instantâneo e lei de vazão.

Quanto aos valores dos parâmetros que caracterizam os elementos que compõem o sistema de adução, tem-se para a tubulação principal de ferro fundido de classe K9 o diâmetro nominal de 500mm, diâmetro interno e externo de 505 e 532mm, respectivamente; a espessura da parede de ferro é de 9mm e a espessura da camada de cimento de 4,5mm; seu comprimento é de 2225 metros; possui módulo de elasticidade de 170GPa; coeficiente de Poisson de 0,25; e rugosidade de 2mm. O módulo de elasticidade de Bulk para água igual a 2,19GPa, densidade da água igual a 999 kg/m<sup>3</sup>. Os parâmetros listados foram considerados para a estimativa da celeridade da onda, 1130m/s, realizada por Soares *et al.* (2013) através da Equação 3.5.

A estimativa da velocidade da onda para as tubulações de PVC foi de 428m/s considerando os seguintes parâmetros: diâmetro nominal igual a 200mm, diâmetro interno de 204,2mm, diâmetro externo de 222mm, espessura igual a 8,9mm, módulo de elasticidade da tubulação de PVC de 3,6GPa e coeficiente de Poisson igual a 0,46.

A estação elevatória real é composta por cinco bombas instaladas em paralelo, porém, nos testes realizados em campo foi utilizada somente uma delas, identificada como bomba 1 (Figura 4.1), que possui os seguintes parâmetros nominais: descarga da bomba  $Q_R = 83,31/s$ , altura manométrica  $H_R = 105m$ , potência  $P_R = 110kW$ , velocidade rotacional  $N_R = 3000rpm$ , eficiência  $\eta_R = 0,78$  e momento de inércia total  $I = 1,034 \text{ kg} \cdot m^2$ . A vazão inicial trabalhada nos cenários foi de 72 l/s.

### 4.3.1. FECHAMENTO DA VÁLVULA DE RETENÇÃO

A válvula de retenção tem a função de permitir o escoamento do fluido em somente um único sentido. Então, no momento em que há o desligamento da bomba, para que não haja um contrafluxo atingindo a bomba, a válvula de retenção se fecha completamente de forma automática. O fluxo é então interrompido com um respectivo aumento de pressão na válvula.

A curva apresentada na Figura 4.12 foi utilizada para descrever o fechamento da válvula de regulação nos cenários construídos no software Allievi. Esses dados foram adquiridos a partir do monitoramento em campo e da calibração do fechamento da válvula de retenção realizada no estudo de caso apresentado em Soares *et al.*, 2013.

Foi feita a tentativa de modelar o sistema real utilizando o dispositivo válvula de regulação do software Allievi. Assim, os dados da válvula de retenção foram utilizados para descrever o fechamento da válvula de regulação instalada em linha com o conjunto motor-bomba. Dessa forma, foi feita a modelagem da válvula de retenção como válvula de regulação. É importante ressaltar que a função do dispositivo válvula de regulação é gerar uma variação de pressão e vazão que passa por ela.

Após o desligamento da bomba, a válvula se fecha completamente em 1,77 segundos.

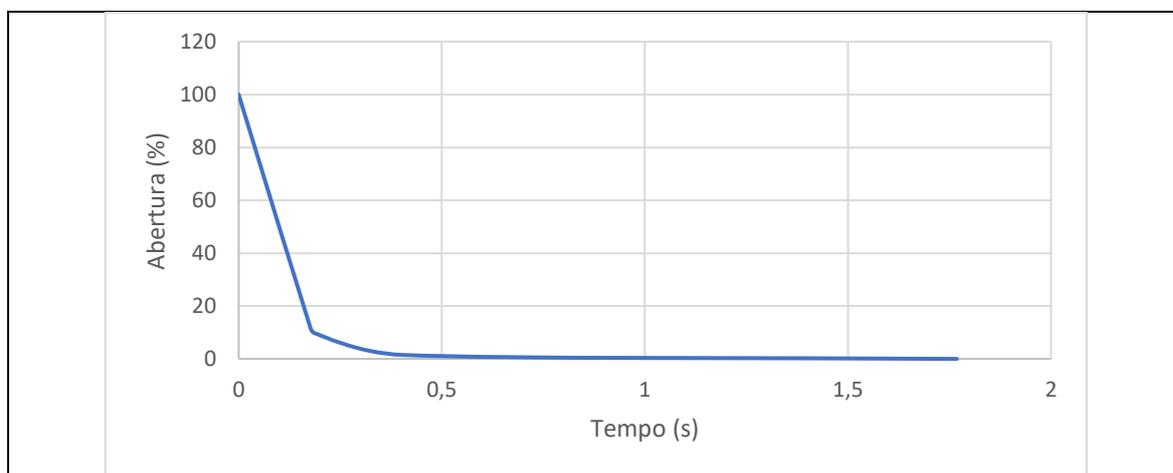


Figura 4.12 – Fechamento da válvula de retenção (Soares *et al.*, 2013).

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados da modelagem hidráulica do sistema de adução por bombeamento de Guarda, Portugal. Aqui foram feitas comparações entre os resultados observados em campo por Soares *et al.*, (2013) e os resultados obtidos na simulação do fenômeno, para a qual foi usado o software Allievi, que faz a descrição utilizando o modelo da coluna elástica clássico. É feita a avaliação das condições de contorno para diferentes cenários. Gráficos comparativos entre os dados observados e os resultados obtidos na simulação são apresentados nas Figuras 5.1 a 5.7.

### 5.1. RESERVATÓRIO DE NÍVEL CONSTANTE COMO CONDIÇÃO DE CONTORNO À JUSANTE

Nos cenários 1.1 e 1.2 (Figuras 4.5 e 4.6) foi assumido um reservatório de grandes dimensões, com nível constante, como condição de contorno à jusante. No primeiro caso (1.1), a válvula de retenção está acoplada ao conjunto motor-bomba e tem fechamento instantâneo. Já no segundo caso (1.2), considerou-se uma válvula de regulação instalada em linha com o conjunto motor-bomba, trabalhando conforme a curva de fechamento da válvula de retenção (Figura 4.12).

Quando se compara os resultados obtidos na simulação e os observados em campo, o pico de pressão mínima inicial é descrito de forma satisfatória no cenário 1.1, como mostra a Figura 5.1, porém a atenuação dos picos de pressão não acompanha os valores obtidos em campo. Também não foi possível que a forma do sinal de pressão transitório fosse descrita, pois, como pode ser visto nos dados observados, ocorre um pulso negativo da pressão e logo em seguida há a elevação da pressão. Na sequência não há um patamar horizontal como o que é mostrado na curva que caracteriza os dados obtidos na simulação, o que há é uma descida, que é explicada pelo alívio de pressão devido à descarga livre para a atmosfera.

Quanto à influência do tipo de fechamento da válvula, percebe-se na Figura 5.2 (resultados relativos ao cenário 1.2) que apareceram erros numéricos referentes a isso, pois a válvula de regulação do Allievi não é feita para ter um fechamento total, mas apenas para gerar uma variação da pressão e da vazão que passa por ela. Ou seja, modelar esta válvula a partir de dados obtidos da válvula de retenção gerou erros numéricos na simulação que foram refletidos ao longo do tempo, como pode ser visto no gráfico comparativo.

A escolha de reservatório de nível constante como condição de contorno não trouxe resultados satisfatórios para a modelagem do sistema real.

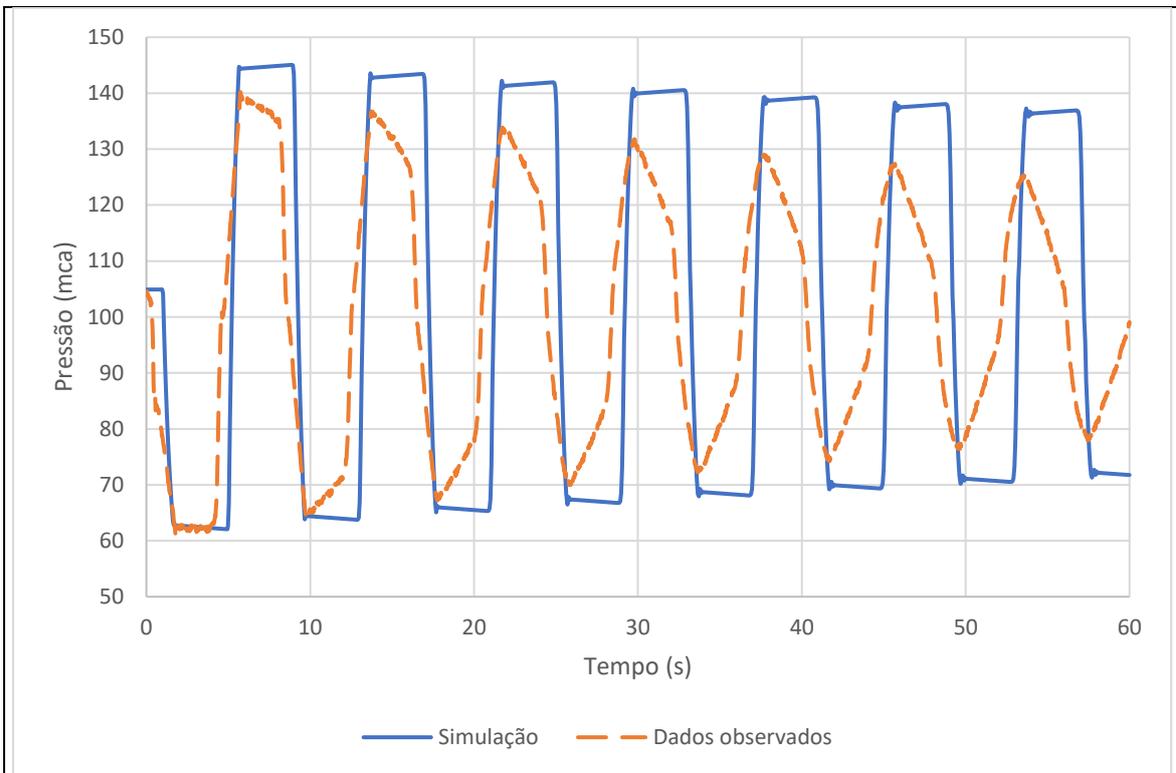


Figura 5.1 – Valores de pressão observados no ponto P1 e resultados obtidos por simulação considerando válvula de retenção com fechamento instantâneo e reservatório de nível constante como condição de contorno à jusante.

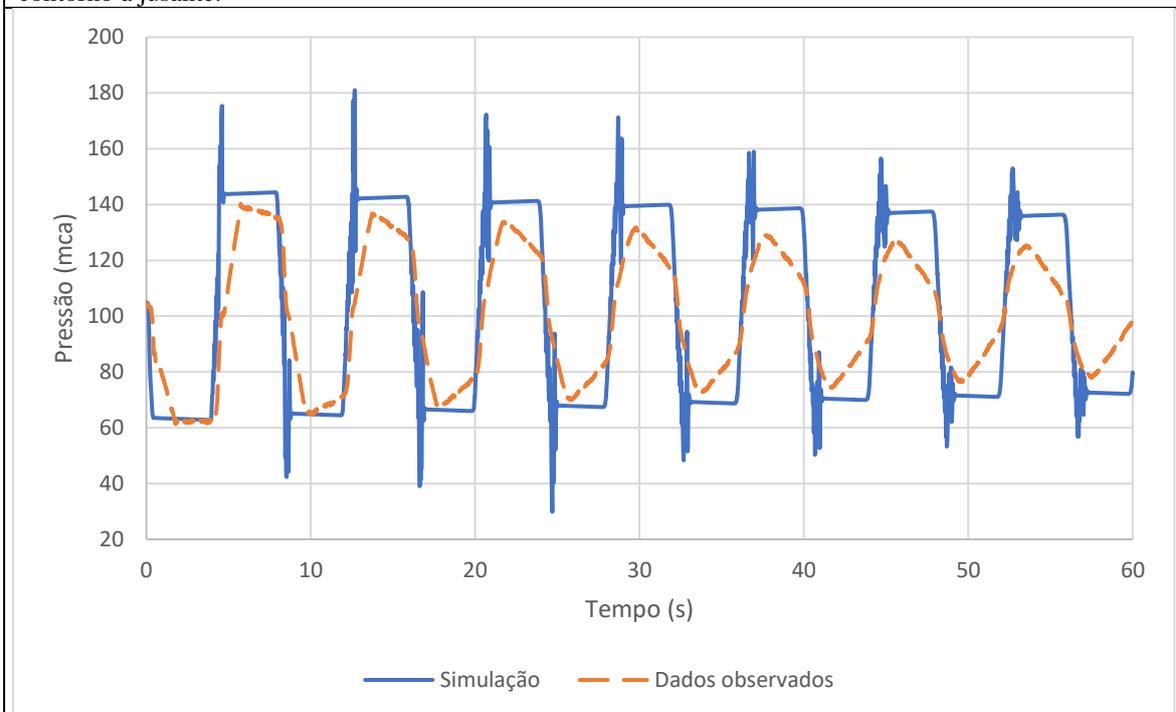


Figura 5.2 – Valores de pressão observados no ponto P1 e resultados obtidos por simulação considerando válvula de retenção modelada como válvula de regulação e reservatório de nível constante como condição de contorno à jusante.

## 5.2. RESERVATÓRIOS DE NÍVEL VARIÁVEL COM DESCARGA LIVRE COMO CONDIÇÃO DE CONTORNO À JUSANTE

Nos cenários 2.1 (Figura 4.7) e 2.2 (Figura 4.8), foram considerados três ramais ligados cada um a um reservatório de nível variável com descarga livre para a atmosfera como condição de contorno à jusante. A simulação com essa condição trouxe resultados (Figuras 5.3 e 5.4) para a forma do sinal de pressão transiente que mostra o alívio de pressão devido à descarga livre, mesmo que não condizentes com os dados observados, pois observa-se valores majorados e a não ocorrência da atenuação do fenômeno durante o processo de simulação, mas uma ampliação ao longo do tempo.

A Figura 5.4 caracteriza o cenário 2.2, em que é considerado o funcionamento da válvula conforme a curva de fechamento (Figura 4.12) e com descarga livre para a atmosfera. Esta simulação trouxe resultados mais próximos aos obtidos por monitoramento em campo. Novamente erros numéricos devido ao fechamento total da válvula de regulação, que foi modelada com dados obtidos da válvula de retenção, apareceram. Percebe-se também a ampliação desses erros. Assim, não foi possível a redução desses erros, nem a reprodução da dissipação das ondas de pressão.

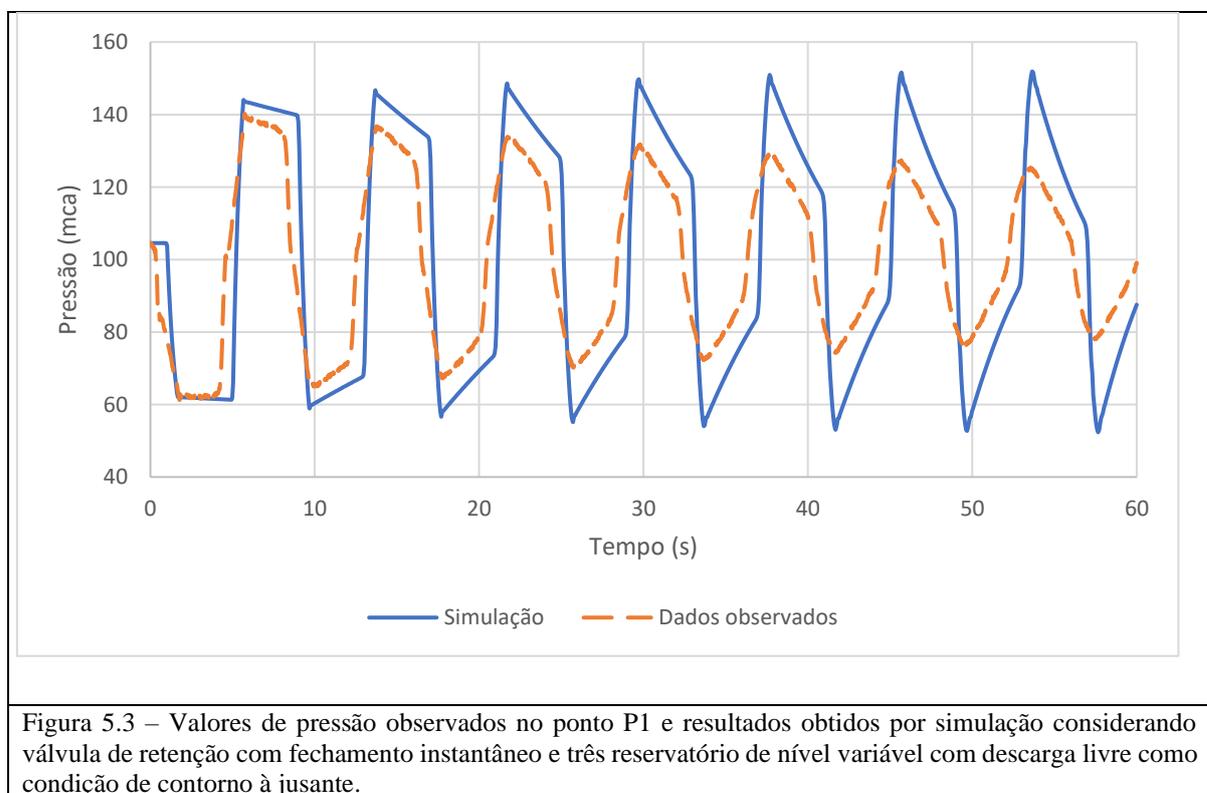
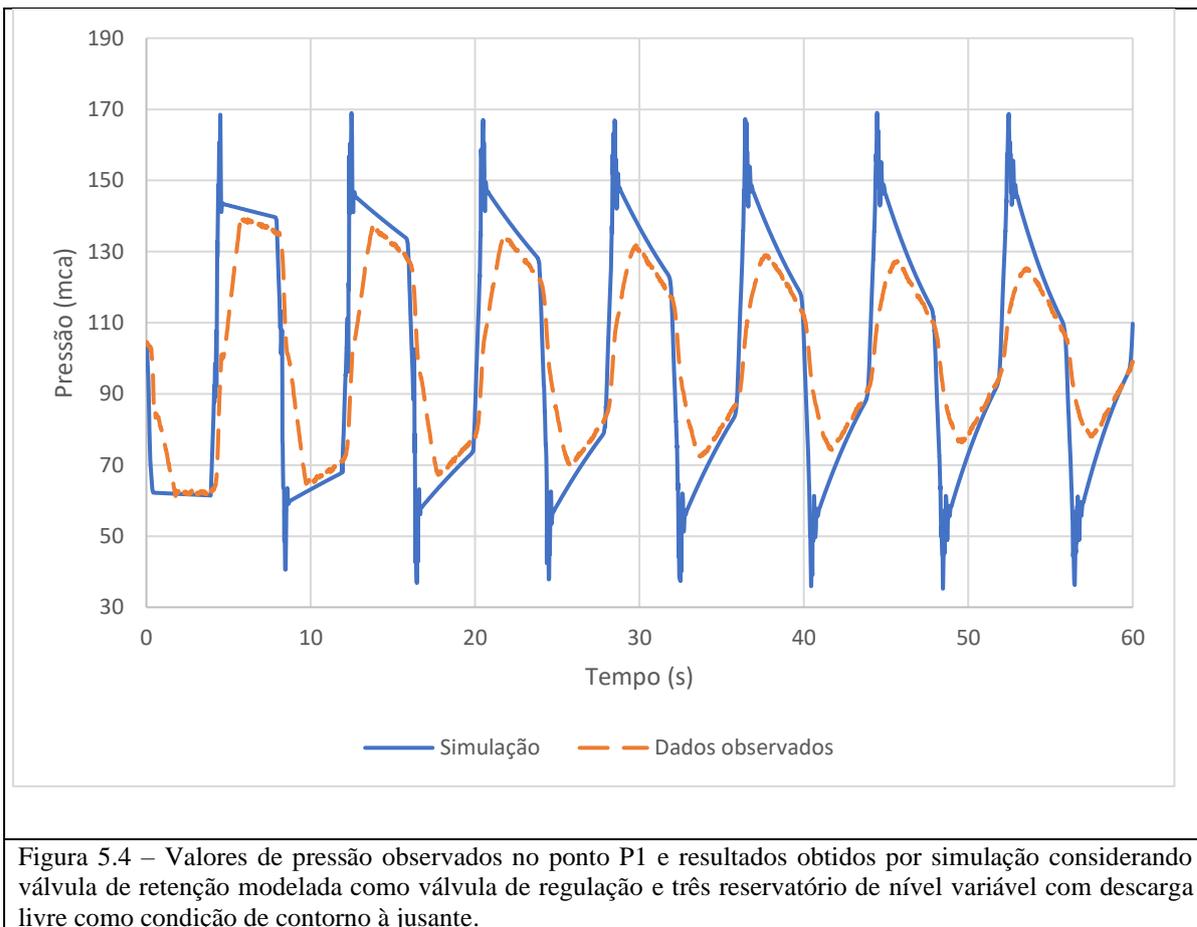


Figura 5.3 – Valores de pressão observados no ponto P1 e resultados obtidos por simulação considerando válvula de retenção com fechamento instantâneo e três reservatório de nível variável com descarga livre como condição de contorno à jusante.



### 5.3. LEI DE ALTURA COM RESERVATÓRIO ASSOCIADO E LEI DE VAZÃO POR PRESSÃO

A lei de altura e a lei de vazão correspondem à imposição de uma lei de comportamento. Estes elementos foram utilizados nos cenários 3.1 e 3.2, ilustrados nas Figuras 4.9 e 4.10, respectivamente, para lei de altura; e no cenário 4.1, Figura 4.11, para lei de vazão. Os resultados numéricos obtidos na simulação estão representados nas Figuras 5.5 e 5.6 (lei de altura) e 5.7 (lei de vazão).

Foi utilizada a opção de lei de altura com reservatório associado e submetido à pressão atmosférica, no qual a vazão transportada pela tubulação é vertida. O software Allievi calcula a vazão de saída mantendo a altura piezométrica do nó igual a sua cota geométrica e considera a vazão entrando no reservatório pelo bordo superior. De acordo com o que é descrito no manual técnico de utilização do Allievi, se durante a simulação do transitório a vazão por lei de altura resulta negativa, significa que a vazão retrocede e entra na tubulação que está conectada com a lei.

A escolha da lei de altura condição de contorno também não trouxe resultados satisfatórios para a modelagem do sistema real. O fechamento da válvula de acordo com a curva de fechamento (Figura 5.6) também não trouxe uma atenuação significativa do fenômeno.

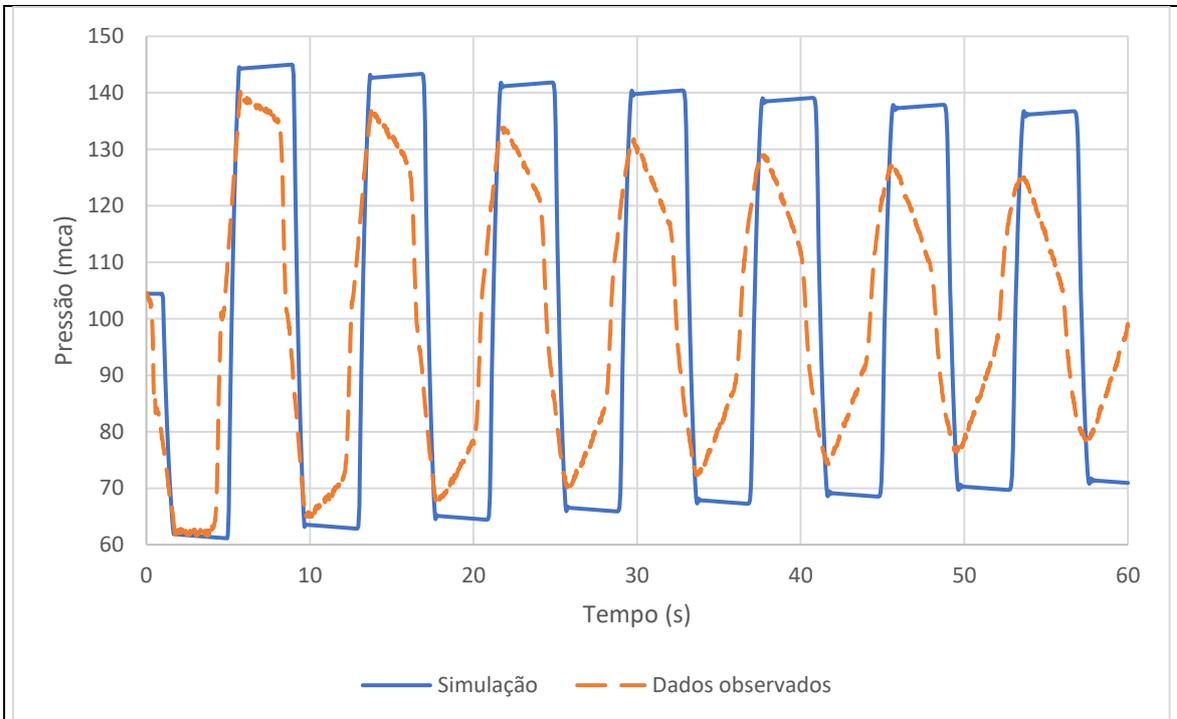


Figura 5.5 – Valores de pressão observados no ponto P1 e resultados obtidos por simulação considerando válvula de retenção com fechamento instantâneo e lei de altura com descarga para reservatório de nível constante como condição de contorno à jusante.

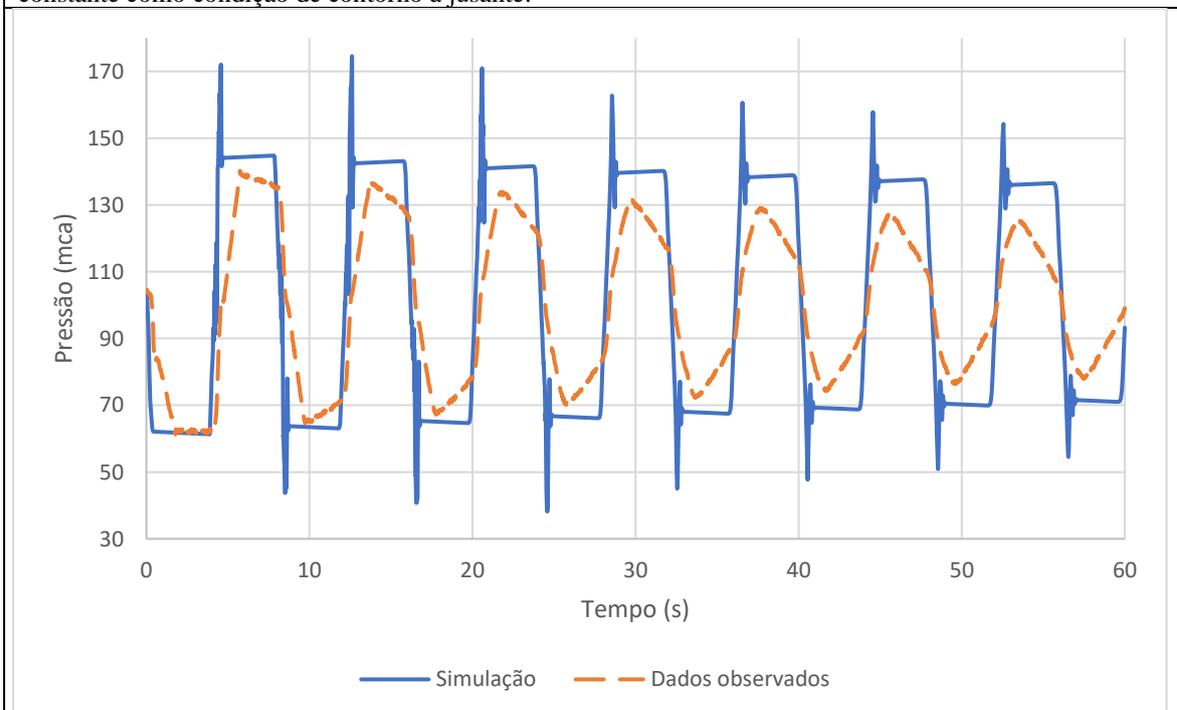


Figura 5.6 – Valores de pressão observados no ponto P1 e resultados obtidos por simulação considerando válvula de retenção modelada como válvula de regulação e lei de altura com descarga para reservatório de nível constante como condição de contorno à jusante.

No caso da lei de vazão por pressão, no cálculo feito pelo software é admitido que exista um elemento que cause perdas de carga, de maneira que haja descarga livre para a atmosfera obedecendo uma lei que descreve o comportamento da pressão no nó em função do coeficiente de perdas de carga (constante) no elemento que controla a vazão e a vazão no nó.

A Figura 5.7 mostra que o pico de pressão positivo após o primeiro pulso negativo condiz com o valor monitorado, mas a forma da curva simulada não se aproxima dos dados observados. Além disso, a simulação trouxe resultados minorados ao longo do tempo.

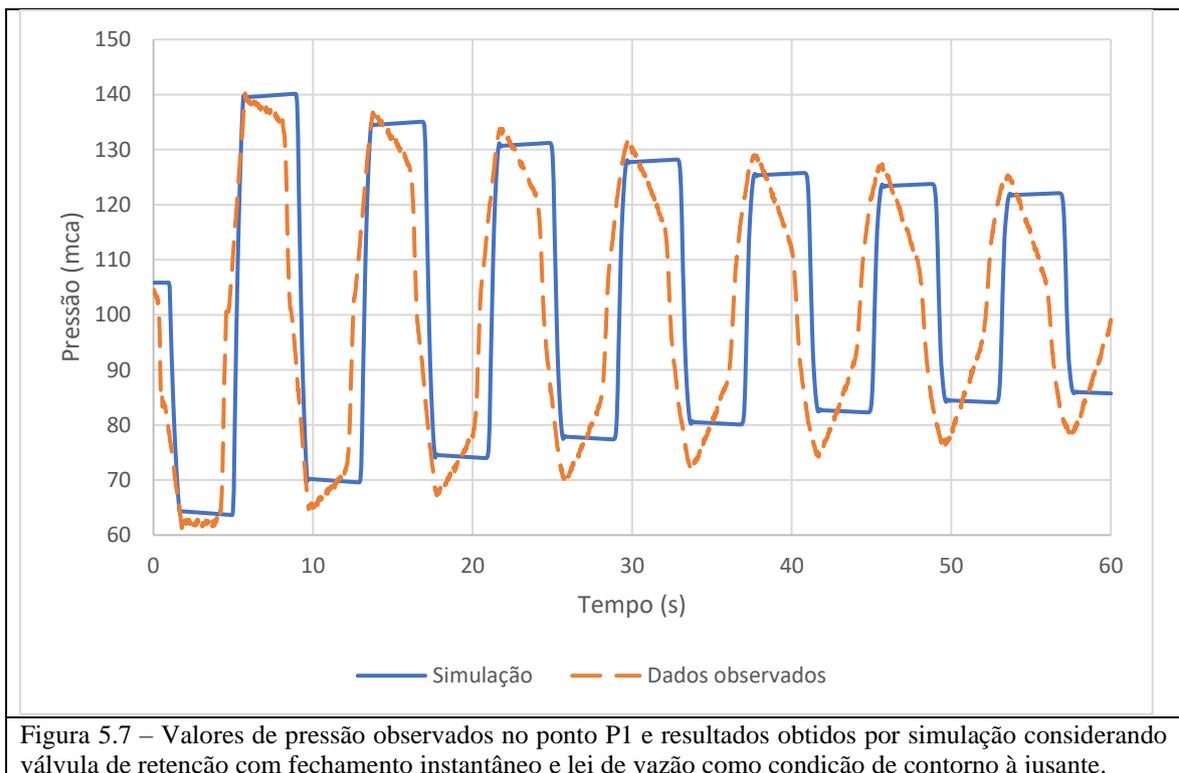


Figura 5.7 – Valores de pressão observados no ponto P1 e resultados obtidos por simulação considerando válvula de retenção com fechamento instantâneo e lei de vazão como condição de contorno à jusante.

## 6. CONCLUSÃO

O presente trabalho apresentou diferentes tentativas de modelar um sistema real de adução de água para o estudo do fenômeno de transiente hidráulico conhecido como golpe de aríete. As simulações foram realizadas e os dados numéricos obtidos foram comparados com os dados observados no monitoramento em campo realizado por Soares *et al.*, 2013.

Foram construídos sete cenários diferentes com o intuito de avaliar suas condições de contorno em relação às respostas de pressão em um ponto logo após a bomba de sucção; a

influência do tipo de fechamento da válvula de retenção, seja instantâneo ou conforme a curva de fechamento apresentada; e a influência da descarga livre para a atmosfera.

A comparação entre os dados gerados nas simulações e os dados obtidos em campo mostrou que a teoria clássica do golpe de aríete é imprecisa para a descrição do comportamento das variações de pressão no interior do sistema hidráulico. Assim, pelos dados obtidos através das simulações e pela literatura consultada, observa-se que o uso de softwares comerciais como o Allievi é possível para análises de sistemas na fase de projeto, pois os resultados gerados são majorados, o que é significativo para a segurança do sistema. Mas esse tipo de software não é recomendável para o estudo de um sistema hidráulico já existente. Soares *et al.*, 2013 pontua que isso se deve ao fato de que os tubos de descarga são normalmente separados do tanque receptor. Além disso, nos cálculos realizados pelo software não se considera o efeito dinâmico relativo ao fator de atrito variável.

Em geral, os primeiros valores de pico de pressão, máximo e mínimo, são os que são melhores descritos nas simulações. Os cenários em que foram assumidos reservatório de nível constante como condição de contorno à jusante trouxeram resultados não satisfatórios. Já os resultados mostrados na Figura 5.4, que caracteriza o cenário 2.2, em que são considerados o funcionamento da válvula conforme a curva de fechamento (Figura 4.12) e uma trifurcação ligada a três reservatórios de nível variável com descarga livre para a atmosfera, mostram uma aproximação maior dos resultados obtidos por monitoramento em campo, apesar de também não serem considerados satisfatórios.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abreu, J., Cabrera, E., Izquierdo, J., & García-Serra, J. (1999). "Flow modeling in pressurized systems revisited." *Journal of Hydraulic Engineering*, **125**(11), 1154-1169.
- Alarcon, David (2020). "Análisis de Transitorios Hidráulicos com Allievi." Youtube, 12 dez. 2020. Disponível em [https://www.youtube.com/watch?v=NCVZi\\_rcMZU&t=2439s](https://www.youtube.com/watch?v=NCVZi_rcMZU&t=2439s). Acesso em 12 de dezembro de 2020.
- Boulos, P. F., Karney, B. W., Wood, D. J., & Lingireddy, S. (2005). "Hydraulic transient guidelines for protecting water distribution systems." *Journal-American Water Works Association*, **97**(5), 111-124.
- Chaudhry, M. H. (2014). "Applied hydraulic transients".
- De Martino, G., & Fontana, N. (2012). "Simplified approach for the optimal sizing of throttled air chambers." *Journal of Hydraulic Engineering*, **138**(12), 1101-1109.
- Ghidaoui, M. S., Zhao, M., McInnis, D. A., & Axworthy, D. H. (2005). "A review of water hammer theory and practice." *Applied Mechanics Reviews*, **58**(1), 49-76.
- Karney, B. W., & McInnis, D. (1992). "Efficient calculation of transient flow in simple pipe networks." *Journal of Hydraulic Engineering*, **118**(7), 1014-1030.
- Kwon, H. J., & Lee, J. J. (2008). "Computer and experimental models of transient flow in a pipe involving backflow preventers." *Journal of Hydraulic Engineering*, **134**(4), 426-434.
- Munson, B. R., Young, D. F., Okiishi, T. H. (2004). "Fundamentos da mecânica dos fluidos". Editora Blucher.
- Porto, R. D. M. (2006). "Hidráulica Básica". rev. EESC-USP São Carlos-SP.
- Sam Ani, H. M., & Khayatzadeh, A. (2002). "Transient flow in pipe networks." *Journal of Hydraulic Research*, **40**(5), 637-644.
- Soares, A. K. (2007). "Calibração e detecção de vazamentos em modelos de sistemas hidráulicos no escoamento transitório". Tese de doutorado, Universidade de São Paulo.
- Soares, A. K., Covas, D. I., & Ramos, H. M. (2013). "Damping analysis of hydraulic transients in pump-rising main systems." *Journal of Hydraulic Engineering*, **139**(2), 233-243.

- Tassinari, L. C. D. S. (2017). “Transientes hidráulicos em sistemas de bombeamento: influência do material do conduto e dispositivo de proteção”. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS.
- Universidad Politécnica de Valencia (2014). “ALLIEVI Users Manual.” Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- Wood, D. J., Lingireddy, S., Boulos, P. F., Karney, B. W., & McPherson, D. L. (2005). “Numerical methods for modeling transient flow in distribution systems.” *Journal-American Water Works Association*, **97**(7), 104-115.