UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

WELLINGTON LUAN DE OLIVEIRA SILVA

ANÁLISE DOS TRANSIENTES HIDRÁULICOS EM UM ADUTORA LOCALIZADA NA CIDADE DE UAUÁ-BA UTILIZANDO O SOFTWARE ALLIEVI

RECIFE
2024

WELLINGTON LUAN DE OLIVEIRA SILVA

ANÁLISE DOS TRANSIENTES HIDRÁULICOS EM UMA ADUTORA LOCALIZADA NA CIDADE DE UAUÁ-BA UTILIZANDO O SOFTWARE ALLIEVI

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Fabrício Motteran
Coorientador: MSc Nathália Felix Bomfim

RECIFE
2024

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Silva, Wellington Luan de Oliveira da.
Análise dos transientes hidráulicos em uma adutora localizada na cidade de Uauá-BA utilizando o software ALLIEV / Wellington Luan de Oliveira da Silva. - Recife, 2024.
65 p. : il., tab.

Orientador(a): Fabrício Motteran
Cooorientador(a): Nathália Felix Bonfim
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Civil - Bacharelado, 2024.
Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. Transientes hidráulicos. 3. Golpe de aríete. 4. ALLIEV. I. Motteran, Fabrício. (Orientação). II. Bonfim, Nathália Felix. (Coorientação). IV. Título.

620 CDD (22.ed.)

WELLINGTON LUAN DE OLIVEIRA SILVA

ANÁLISE DOS TRANSIENTES HIDRÁULICOS EM UMA ADUTORA LOCALIZADA NA CIDADE DE UAUÁ-BA UTILIZANDO O SOFTWARE ALLIEVI

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em: 11/11/2024

BANCA EXAMINADORA

_____

Profº. Dr. Fabrício Motteran
Universidade Federal de Pernambuco

_____

Profº. Dr. Anderson Luiz Ribeiro de Paiva
(Examinador Interno)

_____

Profº. Dr. Antonio Gustavo Santos Neto
(Examinador Externo)

Dedico aos meus pais Adriana e Edson
meus maiores incentivadores.

AGRADECIMENTOS

Minha maior gratidão é aos meus pais, Adriana e Edson, que sempre apoiaram minhas escolhas, proporcionando o suporte necessário para que eu tivesse a liberdade de escolher o que eu queria fazer, sempre com muito apoio e confiança.

Agradeço aos meus amigos Stefano, Kaio, Damerson, Alison, Marinho, Joicy, Geovana, Nathaly, Bruna, Jéssica, Herica, que foram pessoas que estiveram comigo em diferentes etapas da minha graduação, sempre me incentivando a continuar de alguma forma.

Aos meus colegas de curso pelos trabalhos em grupos, ajudas e trocas de conhecimento e materiais, principalmente a Ana Deyse e Gabriele Ferreira.

Ao meu orientador, professor Dr. Fabrício Motteran por aceitar esse desafio, estando sempre presente para me auxiliar durante o processo de construção desse estudo.

À DFO (Departamento de Fiscalização de Obras) da UFPE e a todos os funcionários e estagiários de lá, que foi onde me foi dada a oportunidade de estagiar e aprender ainda mais sobre as funções de um profissional de engenharia.

À Adson Regis, um colega de trabalho que disponibilizou um tempo pra me ajudar quando eu estava desesperado em determinada etapa deste trabalho, foi muito importante pra mim.

À Francyelle, uma pessoa que eu conheci no final da graduação e por quem eu tenho uma admiração e um carinho muito grande, e que tenho certeza de que não tem ideia do quanto me ajudou tanto dentro da universidade, como fora, é um imenso prazer pra mim, dividir um planeta e uma época com você.

E por último, gostaria de fazer um agradecimento especial a Nathália Felix Bomfim, agradecer pelos ensinamentos, pelas brincadeiras, pelos conselhos, pelas conversas e pelas risadas, além de professora, co orientadora e amiga, foi uma das principais responsáveis por eu ter chegado até aqui, você me ofereceu uma oportunidade de crescimento e aprendizado, num momento delicado e que me deu forças pra continuar, obrigado!

Vocês todos foram essenciais de alguma forma para essa conquista. Obrigado.

RESUMO

O abastecimento de água à população é um processo complexo que exige planejamento cuidadoso para garantir eficiência. Danos na rede de distribuição têm consequências graves, afetando tanto a população quanto as empresas de saneamento, com altos custos financeiros e impacto negativo no bem-estar da comunidade. Um dos principais fatores que contribuem para esses danos é o fenômeno dos transientes hidráulicos ou golpe de aríete, caracterizado por variações bruscas de pressão - positiva ou negativa - dentro dos tubos, que transforma a energia cinética no interior do tubo em energia sonora e de deformação, comprometendo sua integridade das tubulações.

Existem, entretanto, algumas formas de mitigação dessas pressões, seja por equipamentos de proteção, atraso do fechamento de uma válvula ou troca do material da adutora.

Com o auxílio do software ALLIEV, o presente trabalho faz a análise dos transitórios hidráulicos em uma adutora por gravidade de Ferro Fundido com DN 250 mm, que abastece a cidade de Uauá na Bahia, oriundos dos fechamentos das válvulas de montante, jusante e simultâneo e propõe formas de mitigar sobrepressões e subpressões geradas seja com equipamento de proteção como com tempos de fechamento de válvulas

Palavras-chave: engenharia civil, transientes hidráulicos, golpe de aríete, alliev.

ABSTRACT

Supplying water to the population is a complex process that requires careful planning to ensure efficiency. Damage to the distribution network has serious consequences, affecting both the population and sanitation companies, with high financial costs and a negative impact on the community's well-being. One of the main factors contributing to this damage is the phenomenon of hydraulic transients or water hammer, characterized by sudden variations in pressure - positive or negative - inside the pipes, which transforms the kinetic energy inside the pipe into sound and deformation energy, compromising the integrity of the pipes.

There are, however, some ways of mitigating these pressures, whether through protective equipment, delaying the closure of a valve or changing the material of the pipeline.

Using ALLIEV software, this paper analyzes the hydraulic transients in a DN 250 mm DEFoFo cast iron gravity pipeline supplying the city of Uauá in Bahia, arising from the closing of upstream, downstream and simultaneous valves, and proposes ways of mitigating the overpressures and underpressures generated, both with protective equipment and with valve closing times.

Keywords: civil engineering**,** hydraulic transients, water hammer, alliev.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Efeito da cavitação sobre o rotor de uma bomba 18
Figura 2 - Separação de colunas.....19
Figura 3 - Aríete utilizado na Idade Média.....20
Figura 4 - Dispositivos de proteção contra o golpe de aríete em uma estação de bombeamento.....21
Figura 5 - Tipos de válvula de retenção 22
Figura 6 - Componentes de uma válvula reguladora de pressão 23
Figura 7 - Válvula reguladora de pressão de grande porte modelo VA-601.....24
Figura 8 - Tipos de válvula de ar.....25
Figura 9 - Volante de inércia entre o gerador e a turbina 25
Figura 10 - Chaminé de equilíbrio – equipamento das obras do Departamento Municipal de Águas e Esgotos (DMAE), Porto Alegre, RS.....26
Figura 11 - Esquema do Tanque Alimentador Unidirecional (TAU).....27
Figura 12 - Princípio de funcionamento do reservatório hidropneumático.....28
Figura 13 - Sistema adutor principal.....34
Figura 14 - Localização da cidade de Uauá.....35
Figura 15 - Esquema de gravidade entre o RED 100 m³ e RAD 400m³ 39
Figura 16 - Perfil longitudinal do terreno 43
Figura 17 – Esquema da adutora no ALLIEV 44
Figura 18 - Dados dos nós 44
Figura 19 - Dados dos reservatórios.....44
Figura 20 - Dados do tubo de Ferro Fundido.....45
Figura 21 - Dados das válvulas de gaveta.....45
Figura 22 - Envoltória de pressão com ambas as válvulas abertas 46
Figura 23 - Envoltória de pressões para um fechamento de 30s a jusante.....47
Figura 24 - Envoltória de pressões para um fechamento de 90s a jusante.....48
Figura 25 - Envoltória de pressões para um fechamento de 120s a jusante.....49
Figura 26 - Envoltória de pressões para um fechamento de 180s a jusante.....49
Figura 27 - Envoltória de pressões para um fechamento de 60s a montante.....50

Figura 28 - Envoltória de pressões para um fechamento de 3600s a montante.....51
Figura 29 - Envoltória de pressões para um fechamento de 3600s a montante com proteção.....52
Figura 30 - Envoltória de pressões para um fechamento de 900s a montante com proteção.....53
Figura 31 - Envoltória de pressões para um fechamento de 300s a montante com proteção.....54
Figura 32 - Envoltória de pressões para um fechamento de 240s a montante com proteção.....55
Figura 33 - Envoltória de pressões para um fechamento de 7200s simultâneo de válvulas.....56
Figura 34 - Envoltória de pressões para um fechamento de 3600s simultâneo de válvulas com proteção 57
Figura 35 - Envoltória de pressões para um fechamento de 900s simultâneo de válvulas com proteção 58
Figura 36 - Envoltória de pressões para um fechamento de 1200s simultâneo de válvulas com proteção 59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Consumo per capita de referência.....36
Tabela 2 - Valores sugeridos para o coeficiente C de diferentes materiais.....40
Tabela 3 - Detalhe das ventosas para fechamento a montante.....52
Tabela 4 - Detalhe das ventosas para fechamento simultâneo 57

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

NBR – Norma Brasileira

RHO – Reservatório Hidropneumático

TAU – Tanque Alimentador Unidirecional

FF – Ferro Fundido Dúctil ou Nodular

PVC - Policloreto de Vinila

PVC-O – Policloreto de Vinila Orientado

MPVC - Policloreto de Vinila Modificado

DEFoFo – Diâmetro Externo de Ferro Fundido

PEAD – Polietileno de Alta Densidade

RED – Reservatório Elevado de Distribuição

RAD – Reservatório Apoiado de Distribuição

MRS – Resistência Mínima Requerida

PVC-U - Policloreto de Vinila não Plastificado

PE – Polietileno

UPV – Universidade Politécnica de Valencia

EE – Estação Elevatória

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento

ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico

DN – Diâmetro Nominal

PSA – Pressão de Serviço Admissível

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 13

1.1 Justificativa e motivação 14

2 OBJETIVOS 14

2.1 Objetivo geral 14

2.2 Objetivos específicos 14

3 REFERÊNCIAL TEÓRICO 15

3.1 Transiente hidráulico 15

3.2 Efeitos dos transientes hidráulicos 16

3.2.1 Pressão máxima no sistema 16

3.2.2 Vibrações 17

3.2.3 Condições de vácuo 17

3.2.4 Implicações quanto à qualidade da água 17

3.2.5 Cavitação 17

3.2.6 Separação da coluna líquida 18

3.3 O Golpe de Aríete 19

3.4 Métodos de controle de transitórios hidráulicos 21

3.4.1 Válvula de retenção junto à bomba 22

3.4.2 Válvula reguladora de pressão 22

3.4.3 Válvula de admissão e saída de ar 24

3.4.4 Volante de inércia 25

3.4.5 Chaminé de equilíbrio 26

3.4.6 Tanque Alimentador Unidirecional 27

3.4.7 Tanques hidropneumáticos ou de gás ou de ar comprimido 27

3.5 Materiais de tubulações 28

3.5.1 Tubos de ferro fundido dúctil ou nodular - FF 29

3.5.2 Policloreto de vinila - PVC DEFoFo 29
3.5.3 Policloreto de vinila orientado - PVC-O.....30
3.5.4 Polietileno de alta densidade - PEAD 31
3.6 O Software ALLIEV 32
4 MATERIAIS E MÉTODOS 33
4.1 Trecho por gravidade, situado no Morro da Cascavel, ao reservatório RAD 400 m³ de Uauá 34
4.1.1 Características da área de estudo 34
4.2 Dimensionamento da adutora 35
4.2.1 Taxa de ocupação 36
4.2.2 Coeficiente de variação de consumo 36
4.2.3 Consumo per capita de água.....36
4.2.4 Cálculo das vazões de projeto.....37
4.3 Informações sobre a adutora analisada 38
4.3.1 Perdas de carga localizada e distribuídas 38
4.3.2 Perda de carga unitária (J).....39
4.3.3 Diâmetro da adutora de gravidade 40
4.3.4 Nova vazão.....41
4.3.5 Verificação da velocidade 42
4.4 A simulação.....42
4.4.1 Dados utilizados nas simulações.....43
4.5 Cenários analisados 45
5 RESULTADOS.....45
5.1 Cenário principal – Válvulas abertas 45
5.2 Cenário 01 – Fechamento de válvula a jusante.....46
5.2.1 Fechamento de 30s a jusante.....47
5.2.2 Fechamento de 90s a jusante.....47

5.2.3 Fechamento de 120s a jusante ..48
5.2.4 Fechamento de 180s a jusante ..49
5.3 Cenário 02 – Fechamento de válvula a montante ..50
5.3.1 Fechamento de 60s a montante ..50
5.3.2 Fechamento de 3600s a montante ..50
5.3.3 Fechamento de 3600s a montante com proteção ..51
5.3.4 Fechamento de 900s a montante com proteção ..53
5.3.5 Fechamento de 300s a montante com proteção ..53
5.3.6 Fechamento de 240s a montante com proteção ..54
5.4 Cenário 03 – Fechamento de válvula simultâneo ..55
5.4.1 Fechamento de 7200s simultâneo de válvulas ..55
5.4.2 Fechamento de 3600s simultâneo de válvulas com proteção ..56
5.4.3 Fechamento de 900s simultâneo de válvulas com proteção ..57
5.4.4 Fechamento de 1200s simultâneo de válvulas com proteção ..58
6 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS ..59
7 CONCLUSÃO ..61
8 REFERÊNCIAS ..62

1 INTRODUÇÃO

As variações de pressões nas tubulações de abastecimento de água geradas por operação ou manutenção, tais como: fechamento ou abertura rápida de válvulas, paradas ou partidas abruptas de bombas, ou até mesmo fenômenos naturais como terremotos, podem causar o efeito de transientes hidráulicos ou comumente conhecido por golpe de aríete, esse efeito pode ter efeitos danosos na tubulação como contaminação da rede, ruptura de tubulação, vazamentos, cavitação, danificação de bombas e motores, entre vários outros problemas que afetam na qualidade da água entregada.

Variações de pressão de grande magnitude podem causar diversos problemas. Quando eventos transitórios geram sobrepressões, elevadas tensões nas paredes da tubulação podem levar ao rompimento ou fragilização das mesmas devido à repetição desses fenômenos. Já a ocorrência de subpressões pode reduzir os níveis de pressão a valores tão baixos que fiquem abaixo da pressão atmosférica, resultando no achatamento das canalizações, mesmo aquelas feitas com materiais muito resistentes. (MASIERO JUNIOR, 2008)

Esses problemas, exigem a mobilização de grandes equipes de técnicos e canteiros de obras, para reparo das tubulações afetadas pelo fenômeno citado, causando diversos inconvenientes e onerando significativamente as companhias de abastecimento de água.

Entretanto, existem formas simples de mitigar os efeitos do golpe, como: a diminuição da velocidade do fluido, utilização de válvulas redutoras de pressão, acionamento lento de válvulas de bloqueio, aplicação de sistema de partidas de bombas de forma gradual, implementação de sistemas de monitoramento nos pontos mais críticos, assim como sistemas de proteção na rede como um todo.

A identificação de pontos críticos no sistema, pode e deve ser feito na fase de concepção do projeto, existem técnicas computacionais que simulam o efeito dos transientes na tubulação, permitindo a identificação dos pontos mais sensíveis, o que torna muito mais fácil para encontrar formas de mitigar os efeitos. Alocando dispositivos anti-golpe nesses pontos e operando de forma correta os acessórios, faz com que minimizem bastante as chances de acidentes ocasionados pelo fenômeno.

O presente trabalho visa analisar com o auxílio do software do ALLIEVI os transientes hidráulicos de uma adutora localizada na cidade de Uauá na Bahia em alguns cenários diferentes, e formas de mitigar possíveis golpes de aríete na rede ou buscar alternativas de proteção da rede para o fenômeno descrito.

1.1 Justificativa e motivação

O abastecimento de água é essencial para a população como um todo, e a implantação de uma rede de abastecimento é um serviço de alto custo tanto de tempo quanto de capital. O rompimento de uma tubulação ou até mesmo a contaminação de uma rede de distribuição de água é algo que devemos fazer o máximo para evitar, pois além do custo financeiro, temos um impacto ambiental atrelado como também a falta de atendimento de água para população durante o tempo necessário para a manutenção da mesma. E é nisso que se dá a importância de estudo de transientes hidráulicos e das simulações de cenários diferentes, afim de procurar evitar ou proteger a tubulação desse fenômeno, levando a maior economia a médio e longo prazo.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Utilização do software ALLIEVI para analisar transientes hidráulicos da adutora de abastecimento de água do município de Uauá no estado da Bahia, modelando cenários a fim de mitigar ou se possível, cessar os efeitos do golpe de aríete na mesma.

2.2 Objetivos específicos

a. Gerar diferentes cenários de fechamento de válvulas;
b. Analisar o comportamento das sobpressões e subpressões geradas pelos fechamentos;
c. Estimar soluções ou formas de proteção para mitigar ou cessar os efeitos dos transientes hidráulicos na adutora.

3 REFERÊNCIAL TEÓRICO

A análise do golpe de aríete ou transiente hidráulico, é de suma importância em qualquer tipo de tubulação. Entender seus efeitos e comportamentos nos diferentes tipos de materiais que são comumente utilizados nas tubulações, ter conhecimento das medidas mitigadoras e equipamentos de proteção, em casos em que as medidas mitigadoras não se façam suficientes, são essenciais para garantir a integridade e a segurança das tubulações.

3.1 Transiente hidráulico

Em sistemas de distribuição de água, o controle de vazão é parte integrante de sua operação, incluindo a abertura e fechamento de válvulas e a partida e parada de bombas. Quando essas operações são realizadas muito rapidamente, podem causar fenômenos transitórios hidráulicos no sistema de distribuição, o que pode resultar em danos ou falhas se os transientes não forem minimizados. (AMOAH e ELBASHIR, 2007)

É amplamente reconhecido que mudanças abruptas de pressão podem causar danos significativos às tubulações e equipamentos conectados, resultando em custos elevados de reparo e representando até mesmo riscos à segurança. Portanto, o controle do golpe de aríete é um tema relevante em diversos campos técnicos, incluindo sistemas de abastecimento de água, circuitos de usinas nucleares e unidades hidrelétricas (KUBRAK, 2024)

Quando o estado de fluxo em adutoras é alterado, os valores de velocidade e pressão ao longo da tubulação variam com o tempo. O fechamento rápido da válvula transforma a energia cinética do fluido em movimento em energia de deformação, gerando pulsos de pressão que se propagam pelo sistema. As ondas de pressão que surgem durante essa mudança no regime de fluxo se deslocam praticamente à velocidade do som, dependendo das propriedades elásticas da água e da tubulação, incluindo material e espessura da parede, essas ondas de pressão se deslocam para trás até encontrarem o próximo obstáculo sólido, depois se deslocam para frente e pra trás novamente, portanto há uma espécie de “explosão” à medida que esse deslocamento para frente e para trás acontece até se dissipar pela tubulação.

Pessoas que residem em casas antigas, talvez estejam familiarizadas com essa “explosão” que nada mais seria que o som causado pelo impacto dessas ondas, que ecoam pela tubulação quando uma torneira é fechada repentinamente, esse é então, o efeito do golpe de aríete. (LAHLOU, 2009)

3.2 Efeitos dos transientes hidráulicos

Os transientes hidráulicos são desafios a serem enfrentados em projetos hidráulicos, e para isso é importante entender o que esses fenômenos causam nas tubulações, afim de procurar as soluções mais eficientes para a solução do problema, descrições de forma mais detalhadas os efeitos dos transientes hidráulicos nas tubulações são abordados neste tópico.

3.2.1 Pressão máxima no sistema

Segundo Faria (2020), se os efeitos transitórios não forem devidamente calculados na fase de projeto, as linhas de recalque podem ficar sujeitas a condições de sobrepressão e subpressão, o que reduz a vida útil das peças, conexões e tubulação. Dependendo da intensidade dessas condições, pode até ocorrer o rompimento da tubulação.

As pressões máximas durante regimes transitórios podem comprometer tubulações, túneis, válvulas e outros componentes, resultando em danos significativos e, em alguns casos, até em perda de vidas. Mesmo que menos drásticos, picos de pressão elevados podem causar fissuras no revestimento interno, danificar conexões e flanges entre seções de tubulação, ou deformar e danificar equipamentos como válvulas de tubulação e dispositivos de proteção contra golpes de aríete. Muitas vezes, os danos não são imediatamente visíveis, mas podem levar a vazamentos e corrosão acelerada, o que, ao longo do tempo, pode reduzir consideravelmente a espessura da parede e, quando associado a transientes recorrentes, resultar no colapso da tubulação. (BOULOS, 2005)

Por outro lado, pressões muito baixas (pressões negativas) podem causar flambagem, implosão e vazamento nas juntas da tubulação durante as fases subatmosféricas. Os transientes de baixa pressão são geralmente percebidos no lado a jusante de uma válvula de fechamento. (ELBASHIR e AMOAH, 2007)

3.2.2 Vibrações

As vibrações provocadas pelos transientes hidráulicos ocorrem por diversos motivos, como parte da dissipação de energia cinética do líquido, e dependendo da amplitude podem chegar a danificar tubulações, equipamentos e blocos de ancoragem (MARTIN,1999, apud SANTANA, 2018, p. 18)

3.2.3 Condições de vácuo

As condições de vácuo devem ser evitadas sempre que possível, mesmo que isso implique custos elevados, pois podem gerar tensões e deformações significativamente superiores às observadas em operações normais. Pressões de vácuo podem levar ao colapso de tubos com paredes finas ou de seções de concreto reforçado, especialmente se essas partes não forem projetadas para suportar tais tensões. (BOULOS, 2005)

3.2.4 Implicações quanto à qualidade da água

Os eventos transitórios têm impacto significativo na qualidade da água. Esses eventos podem gerar altas tensões cisalhantes, que podem ressuspender partículas já sedimentadas e remover a camada de biofilme. Além disso, situações de baixa pressão, como a resultante de uma falha de energia ou de uma ruptura de tubulação, pode permitir a intrusão de águas subterrâneas contaminadas em um tubo por meio de juntas ou furos. (BOULOS, 2005)

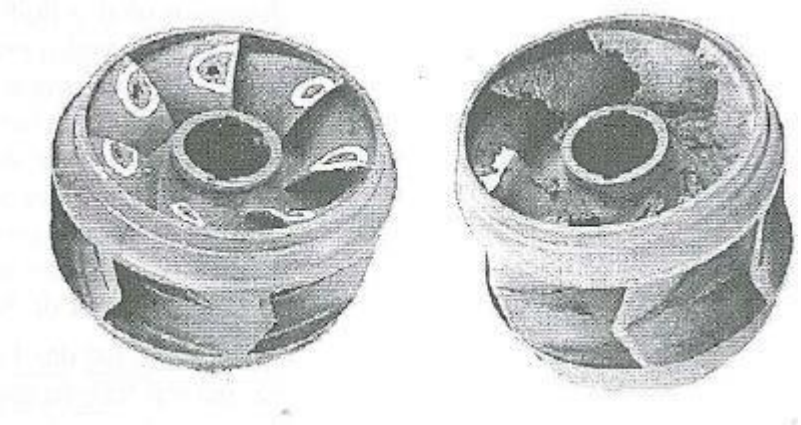
3.2.5 Cavitação

Segundo Amoah e Elbashir (2007), existem 2 tipos de cavitação: a cavitação por gás e a cavitação por vapor. A cavitação gasosa envolve a formação de bolhas de ar dissolvido e seu colapso.

Quando um líquido em escoamento passa por uma região de baixa pressão, em uma determinada temperatura, chegando ao nível correspondente de sua pressão

de vapor, formam-se bolhas de vapor, resultando imediatamente em uma diminuição da massa específica do líquido. Essas bolhas, arrastadas pelo fluxo, alcançam áreas onde a pressão é maior do que na região de formação. Essa rápida mudança de pressão causa o colapso das bolhas por meio de implosão. O fenômeno, conhecido como cavitação, ocorre em frações de segundo, conforme demonstrado por fotografias estroboscópicas. Quando uma bolha colapsa em contato com uma superfície sólida, uma pequena área dessa superfície é temporariamente exposta a tensões de tração extremamente altas. Esse efeito, repetido incessantemente por muitas bolhas, faz com que a superfície metálica seja impactada como se estivesse sendo bombardeada por minúsculas esferas, resultando em um processo erosivo semelhante a martelagem, conforme pode ser visualizada como exemplo na Figura 1. (PORTO, 2006)

Figura 1 - Efeito da cavitação sobre o rotor de uma bomba



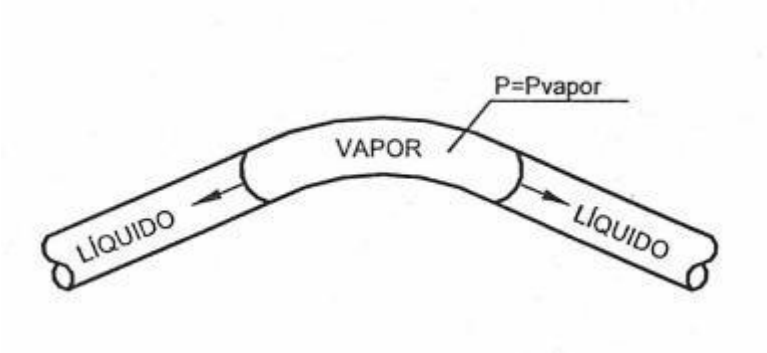
Fonte: Porto (2006)

A cavitação, uma vez instaurada em uma instalação de recalque, resulta na redução do rendimento da bomba, além de provocar ruídos, vibrações e erosão, podendo até levar ao colapso do equipamento. Esse fenômeno causa desgaste excessivo no rotor da bomba, exigindo manutenções periódicas e onerosas. Em alguns casos, o problema é difícil de resolver, pois pode exigir alterações significativas na instalação, como o rebaixamento da cota da bomba, o que diminui a altura estática de sucção. (PORTO, 2006)

3.2.6 Separação da coluna líquida

Quando há subpressão que atinge a pressão de vapor, forma-se uma cavidade de vapor na tubulação. Dependendo da intensidade, essa cavidade pode crescer a ponto de ocupar toda a seção da tubulação, resultando na chamada "separação de colunas". Mostrada esquematicamente na Figura 2. (SOBRINHO; TSUTIYA, 2000)

Figura 2 - Separação de colunas



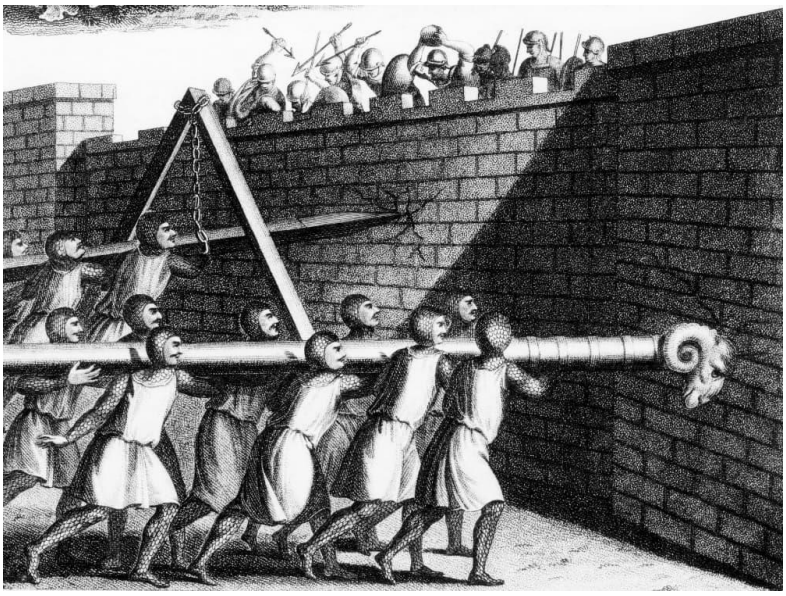
Fonte: Sobrinho; Tsutiya (2000)

A separação de colunas acontece em pontos elevados ou convexos no perfil da tubulação, durante a passagem de ondas de pressão negativa, que podem ser causadas, por exemplo, pelo desligamento de uma bomba ou pela abertura de válvulas nas extremidades. (SOBRINHO; TSUTIYA, 2000)

3.3 O Golpe de Aríete

Segundo os blogs Dulong e Bermo (2024), numa tradução literal, aríete significa carneiro e pode ter também como entrada a tradução “vaivém”. O nome aríete vem de um dispositivo ou arma de guerra utilizada nas Idades Média e Antiga, o aríete era composto por um grande tronco de árvore com uma das extremidades revestida por peça metálica (Figura 3), geralmente de bronze, muitas vezes no formato de uma cabeça de um carneiro. Essa arma era utilizada pelos soldados que, sincronizados em grupo, chocavam a extremidade metálica desse tronco contra portões repetidas vezes, até que a estrutura viesse a romper.

Figura 3 - Aríete utilizado na Idade Média



Fonte: Bermo (2024)

No jargão técnico prático, o termo "golpe de aríete" ou "martelo hidráulico" é utilizado para descrever qualquer variação súbita de pressão em uma tubulação (conduto forçado). Esse fenômeno é normalmente associado a uma mudança brusca na velocidade do fluxo (aceleração ou desaceleração da massa de água), resultando em um impacto que faz parecer que a tubulação recebeu uma "martelada". (NETTO, 2015)

Durante o transitório hidráulico, as variações de pressão ao longo da canalização ocorrem de forma abrupta, gerando ruídos que lembram pancadas. Por isso, esse fenômeno é conhecido como golpe de aríete. As sobrepressões e subpressões que acontecem durante o transitório hidráulico podem causar danos significativos à tubulação e aos seus equipamentos, se não forem projetados para suportar essas sobrecargas, comprometendo a segurança e o funcionamento do sistema. Assim, a quantificação das pressões máximas e mínimas é essencial para o projetista, permitindo dimensionar a tubulação corretamente e incluir equipamentos de proteção que atenuem as variações de carga, preservando a durabilidade da instalação. (CASTRO; SANTOS, 2001)

Ainda segundo Netto (2015), as principais causas do “golpe de aríete” são: (i) o fechamento ou abertura de válvulas (ou rompimento); (ii) a partida ou parada de bombas ou turbinas (ou rompimento de um eixo, por exemplo); (iii) o rompimento ou a obstrução súbita de uma secção de tubo (por exemplo, por colapso estrutural em

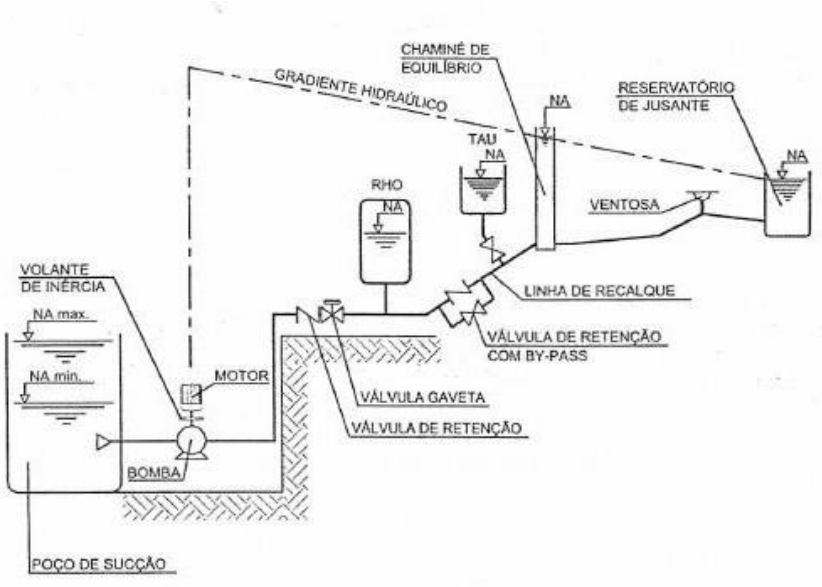
determinado ponto); (iv) a presença de bolsões de ar ou vapor, quando as duas frentes de líquido voltam a se encontrar; e (v) colisão da superfície da água dentro de um tubo com a ventosa quando termina o escape do ar, se for muito rápido.

3.4 Métodos de controle de transitórios hidráulicos

Para controlar os transitórios hidráulicos, é necessário, em primeiro lugar, realizar a análise para diagnosticar os efeitos dos transitórios em todos os equipamentos projetados, considerando diversos tipos de eventos, inclusive acidentais, como paradas não programadas de bombas devido a quedas de energia elétrica ou manobras acidentais em válvulas. Na seleção dos equipamentos de proteção, várias alternativas devem ser estudadas, e a escolhida deve proporcionar a proteção adequada ao menor custo. A possibilidade de utilizar dois ou mais dispositivos não deve ser ignorada, pois muitas vezes os arranjos mais econômicos envolvem a combinação de vários dispositivos de proteção. (SOBRINHO; TSUTIYA, 2000)

Na Figura 4 é mostrado o exemplo de uma estação de bombeamento com a combinação de vários dispositivos de proteção contra o golpe de aríete.

Figura 4 - Dispositivos de proteção contra o golpe de aríete em uma estação de bombeamento



Fonte: Sobrinho; Tsutiya (2000)

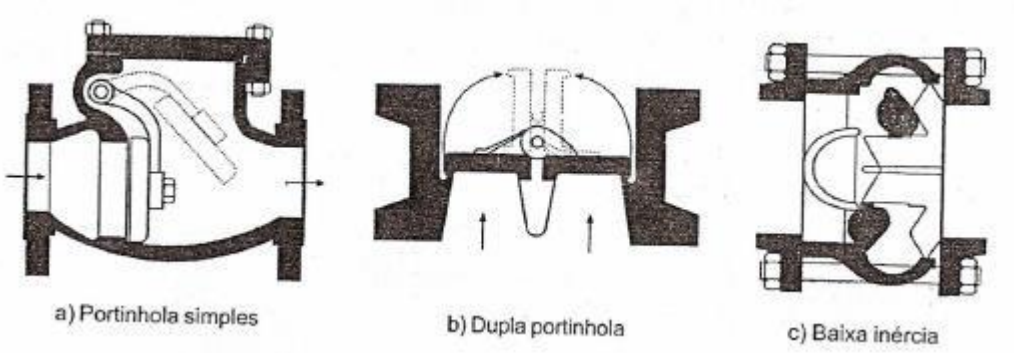
Os principais meios e equipamentos de controle de transitórios hidráulicos utilizados, são descritos a seguir.

3.4.1 Válvula de retenção junto à bomba

A válvula de retenção tem a função de impedir o fluxo reverso da água na bomba durante quedas de energia, evitando que a bomba gire no sentido contrário e sofra danos. Além disso, a válvula de retenção isola a bomba de um circuito paralelo em caso de falha em uma das bombas.

Existem vários tipos de válvulas de retenção, e a escolha deve ser feita com base em sua finalidade específica. Por exemplo, em instalação com reservatório hidropneumático (RHO), a válvula deve fechar rapidamente para evitar a perda de água do reservatório e prevenir choque violento da portinhola contra seu anteparo. Esses tipos de válvulas são equipados com molas para fechamento rápido e têm um conjunto móvel de baixa inércia. Outros tipos incluem válvulas de portinhola articulada, dupla portinhola, entre outros, que podem ser vistos na Figura 5. (SOBRINHO; TSUTIYA, 2000)

Figura 5 - Tipos de válvula de retenção



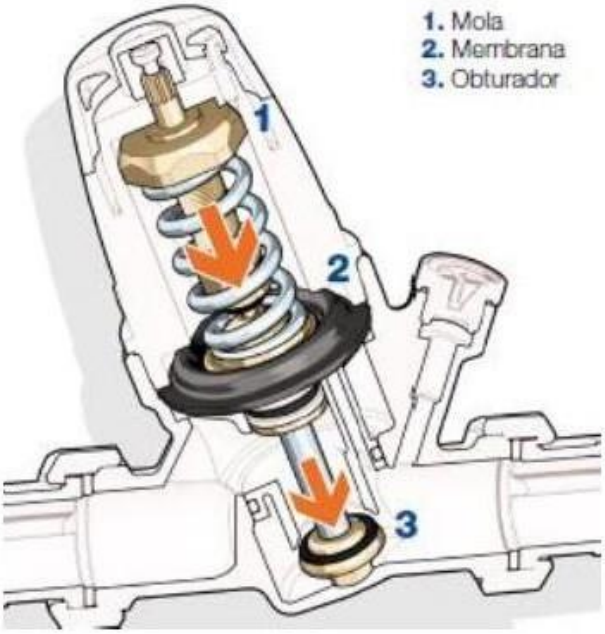
Fonte: Sobrinho; Tsutiya (2000)

3.4.2 Válvula reguladora de pressão

São válvulas operadas automaticamente quando certos valores de pressão são atingidos, podendo o controle das mesmas ser mecânico ou eletrônico. Fazem parte desse tipo de válvula, as de alívio ou anti-golpe, que se mantem fechadas

através de uma mola e são abertas quando a pressão interna ultrapassa a pressão exercida pela mola, como mostrado na Figura 6. O ideal é que essas válvulas de alívio devem de forma rápida e fechar de forma lenta. (SOBRINHO; TSUTIYA, 2000)

Figura 6 - Componentes de uma válvula reguladora de pressão



Fonte: Catálogo BERMAD

Essas válvulas também podem ser operadas de forma eletrônica, por meio de sensores que que ditam a abertura da válvula assim que a pressão atinge certo valor podendo, até mesmo, serem programadas para obedecer a aberturas e fechamentos determinados. Comumente utilizadas em grandes instalações em decorrência dos custos elevados, a Figura 7 mostra um exemplo de válvula reguladora de pressão de grande porte. (SOBRINHO; TSUTIYA, 2000)

Figura 7 - Válvula reguladora de pressão de grande porte modelo VA-601

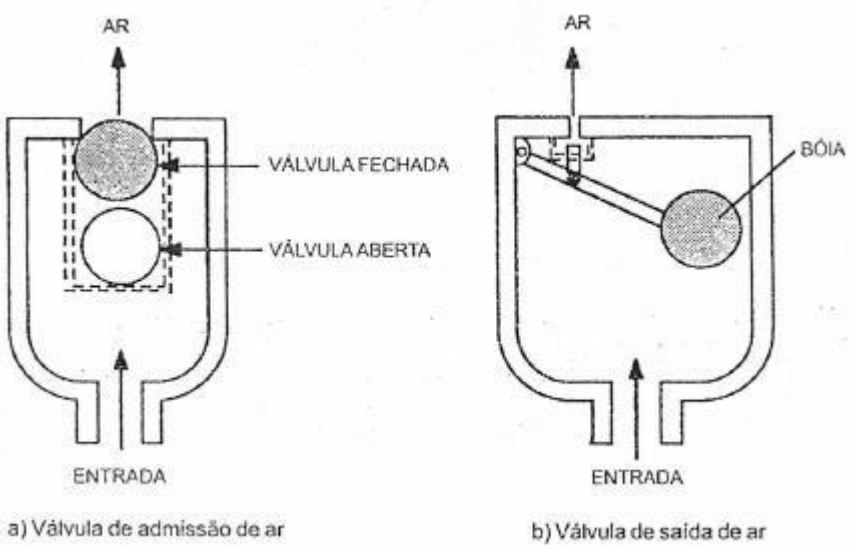
Fonte: Catálogo BERMAD

3.4.3 Válvula de admissão e saída de ar

Essas válvulas são instaladas em pontos elevados para evitar baixas pressões e cavitação. Seu mecanismo permite a entrada de ar na tubulação quando a pressão atinge valores abaixo das condições atmosféricas, ou quando a tubulação está sendo esvaziada para manutenção, prevenindo assim a ocorrência de pressões negativas. Quando a pressão do sistema aumenta novamente acima da pressão atmosférica, o ar é expelido de forma controlada, evitando que o fluxo de água retorne com velocidades superiores ao suportado pela tubulação, o que poderia causar choques entre colunas de água nos bolsões de ar. (MASIERO JUNIOR, 2008)

As válvulas de saída de ar, vistas na Figura 8, são projetadas para expelir bolsões de ar que se formam em pontos altos da tubulação. Para proteger contra os efeitos de baixas pressões, recomenda-se a instalação de uma válvula de admissão de ar para permitir a entrada de ar durante baixas pressões e uma válvula de saída de ar, devidamente dimensionada, para permitir a saída controlada de ar. Isso garante que a velocidade das colunas durante o rejuntamento não cause uma sobrepressão excessiva. (SOBRINHO; TSUTIYA, 2000)

Figura 8 - Tipos de válvula de ar

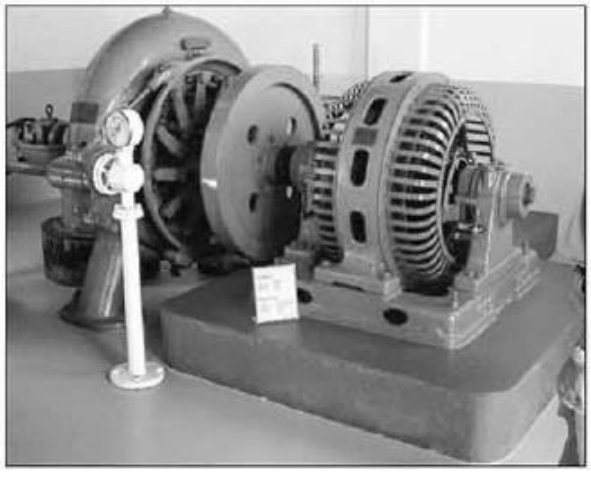


Fonte: Sobrinho; Tsutiya (2000)

3.4.4 Volante de inércia

São rodas (discos) com uma determinada massa e momento, acopladas diretamente ao eixo do motor-bomba, projetadas para aumentar de forma adequada o momento de inércia das partes rotativas das máquinas. Isso prolonga o tempo de parada de rotação do conjunto motor-bomba. A intenção é que o "volante de inércia" tenha massa e momento suficientes para transformar uma manobra rápida em uma manobra lenta. Pode ser visto na Figura 9. (NETTO, 2015)

Figura 9 - Volante de inércia entre o gerador e a turbina



Fonte: Netto (2015)

Uma desvantagem desse método é o aumento do peso da bomba, exigindo maior potência do motor para seu acionamento e, consequentemente, maior corrente elétrica. Esse dispositivo de proteção está, atualmente, em desuso. (CARVALHO, 2018)

3.4.5 Chaminé de equilíbrio

A chaminé de equilíbrio é um reservatório de pequenas dimensões colocado em pontos intermediários da tubulação, cuja finalidade é absorver as oscilações de pressão. Em uma tubulação de recalque, a chaminé entra em ação quando as bombas são ligadas, absorvendo a onda de pressão causada pelo aumento rápido das cargas. Ela intercepta a frente de onda, impedindo que esta se propague para jusante. A chaminé absorve parte da água, aliviando a pressão na tubulação e a jusante, fazendo com que o escoamento se comporte como se estivesse entre dois reservatórios.

Quando as bombas são desligadas, ocorre uma rápida queda de pressão a jusante, fazendo com que a onda de pressão se desloque para jusante. Ao alcançar a chaminé, esta continua a alimentar a tubulação a jusante, evitando a propagação da onda de pressão. Além disso, como a chaminé funciona como um reservatório, ocorre uma reflexão da onda de pressão no local, fazendo com que a frente da onda retorne às bombas em um tempo menor do que se tivesse de percorrer toda a tubulação, resultando em uma sensação de queda de pressão mais gradual (SOBRINHO; TSUTIYA, 2000). Um exemplo de chaminé de equilíbrio pode ser visualizada na Figura 10.

Figura 10 - Chaminé de equilíbrio – equipamento das obras do Departamento Municipal de Águas e Esgotos (DMAE), Porto Alegre, RS

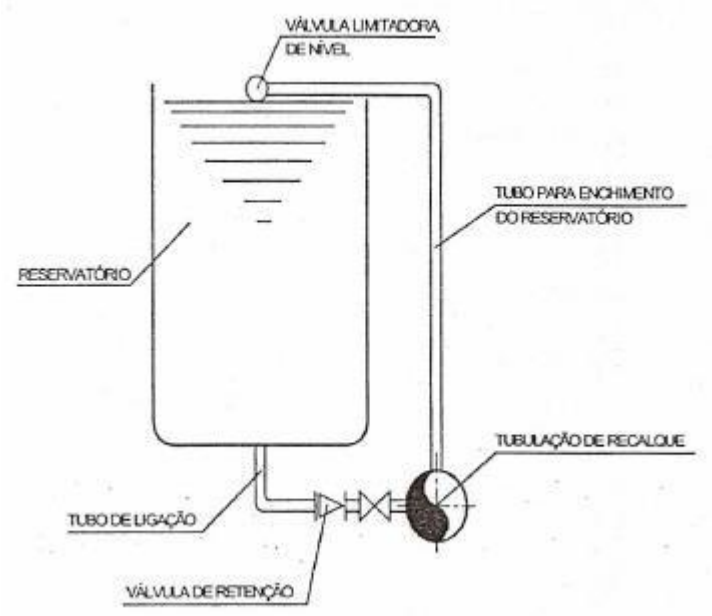
Fonte: (Netto, 2015)

3.4.6 Tanque Alimentador Unidirecional

Destinados a impedir que a pressão (chamada "subpressão") caia abaixo de determinados valores mínimos, esses dispositivos funcionam por meio da injeção de volumes específicos (massas) de fluido no tubo em tempos determinados (o mais rápido possível) e em locais específicos da tubulação. Eles são projetados para abertura instantânea e geralmente são divididos em dois tipos: o que utiliza pressão atmosférica, e o que utiliza ar comprimido. (NETTO, 2015)

O TAU (Figura 11) é empregado para prevenir baixas pressões e a separação da coluna d'água, admitindo água na tubulação quando a pressão cai abaixo da cota piezométrica. É especialmente usado em pontos elevados convexos das linhas de recalque e é normalmente isolado da tubulação principal por dutos laterais equipados com válvulas de retenção. Essas válvulas garantem que o fluxo ocorra apenas para dentro da adutora ou conduto semelhante, evitando o refluxo e mantendo a estabilidade do sistema. (MASIERO JUNIOR, 2008)

Figura 11 - Esquema do Tanque Alimentador Unidirecional (TAU)



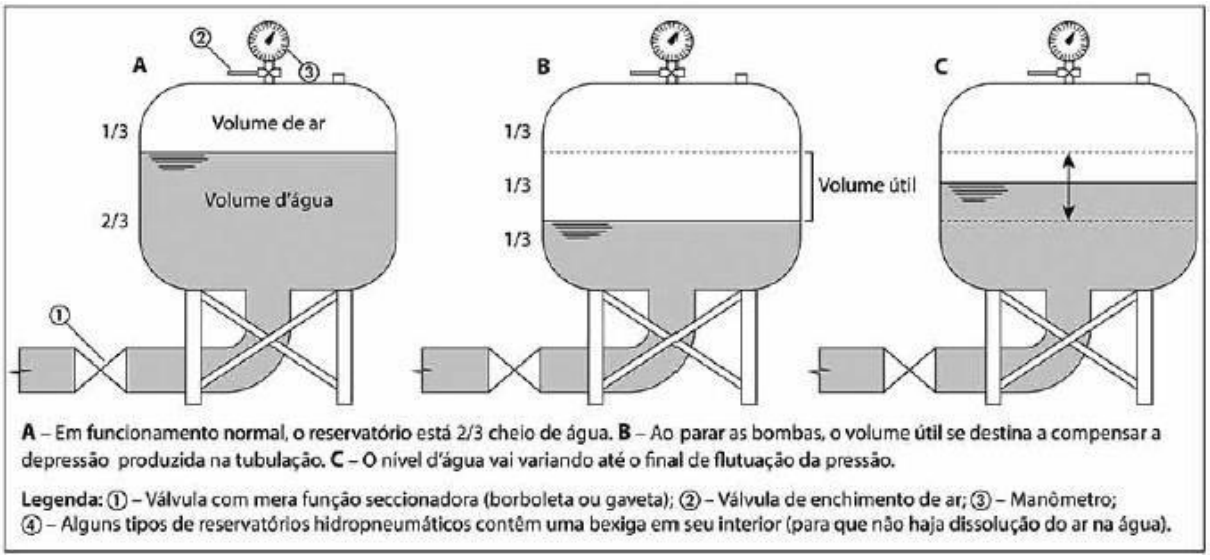
Fonte: Sobrinho; Tsutiya (2000)

3.4.7 Tanques hidropneumáticos ou de gás ou de ar comprimido

As câmaras de ar comprimido são reservatórios fechados contendo ar e água, geralmente localizados no início das tubulações de recalque, logo após as bombas. Durante a primeira fase de um golpe de aríete (onde a primeira onda é de subpressão), a câmara libera uma certa quantidade de água para a tubulação, atenuando o golpe negativo enquanto o ar se expande. Na segunda fase (sobrepressão), a câmara recebe água da tubulação, comprimindo o ar e reduzindo a onda de sobrepressão.

As câmaras de ar comprimido são mais adequadas para situações com pressões e vazões não muito elevadas. Elas requerem vigilância constante para evitar a falta ou perda de ar por dissolução na água. É necessário instalar um compressor para repor o ar que se dissolve na água ao longo do tempo. O funcionamento do reservatório hidropneumático pode ser acompanhado na Figura 12. (NETTO, 2015)

Figura 12 - Princípio de funcionamento do reservatório hidropneumático



Fonte: Netto (2015)

3.5 Materiais de tubulações

Além do custo, os fatores mais importantes na escolha do material para a construção da adutora são a facilidade de execução, a segurança operacional e a viabilidade financeira do projeto.

O tipo de material utilizado na tubulação de uma adutora também influencia sua pressão de serviço e a rapidez do deslocamento de um transiente. Esses parâmetros afetam o custo, considerando a maior ou menor necessidade de

dispositivos de proteção contra transientes a serem instalados nessas linhas (SILVA; DE MORAES; FRANÇA, 2017).

Neste tópico são apresentados alguns materiais de tubulação que são comumente utilizados em adutoras, sendo eles metálicos como (Ferro Fundido) e poliméricos como (PVC DEFoFo, PVC-O e PEAD).

3.5.1 Tubos de ferro fundido dúctil ou nodular - FF

Segundo a Norma Brasileira NBR 7675/1988, ferro fundido dúctil ou nodular é o ferro fundido que, depois de ter sido tratado, ainda no estado líquido, com magnésio, cério, suas ligas ou outras substâncias chamadas nodularizantes, apresenta, após solidificação, grafita primária em forma de esferas ou nódulos (grafita esferoidal ou nodular).

Os tubos de ferro fundido dúctil têm sido usados no saneamento e na hidráulica no Brasil desde 1910. Desde então, passaram por diversas evoluções, especialmente na modularização e nos revestimentos internos e externos. Já os tubos de PVC começaram a ser utilizados no Brasil em 1975, surgindo como uma nova opção quando o ferro fundido já tinha 65 anos de uso no país. Em 41 anos, houve grandes avanços nas resinas e nas resistências mecânicas e hidráulicas dos tubos de PVC (MAGALHÃES, 2016).

Em termos gerais, os ferros fundidos formam uma classe de ligas ferrosas com teores de carbono acima de 2,11%. Na prática, a maioria dos ferros fundidos contém entre 3,0% e 4,5% de carbono, além de outros elementos de liga. Alguns tipos de ferros fundidos são muito frágeis, e a fundição é a técnica de fabricação mais adequada. Na maioria dos ferros fundidos, o carbono está presente na forma de grafita, e tanto a microestrutura quanto o comportamento mecânico dependem da composição e do tratamento térmico. Os tipos mais comuns de ferros fundidos são o cinzento, o nodular, o branco e o maleável. Atualmente, os tubos de ferro fundido utilizados no saneamento são do tipo nodular. (MAGALHÃES, 2016)

3.5.2 Policloreto de vinila - PVC DEFoFo

São tubos e conexões hidráulicas fabricados em Material Plástico de PVC Modificado - MPVC, com diâmetro equivalente aos tubos de ferro fundido (DEFoFo),

suportando pressão de até 1,0 Mpa à temperatura de 25ºC, incluindo eventuais sobrepressões dinâmicas previstas e calculadas para tubulação em carga. Os tubos possuem diâmetros nominais de DN 100 a DN 500, conforme a Norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas ABNT NBR 7665/2007.

As vantagens incluem: (i) intercambialidade: compatíveis com tubos de ferro fundido em toda sua extensão; (ii) desempenho hidráulico: excelente devido à superfície interna lisa; (iii) facilidade de corte: podem ser facilmente cortados; (iv) leveza: facilita o transporte e manuseio, reduzindo substancialmente o custo de instalação e facilitando a manutenção (AMANCO et al., 2017).

3.5.3 Policloreto de vinila orientado - PVC-O

Segundo Magalhães (2016), o processo de orientação dos tubos PVC-O resulta em tubos de alto desempenho, com as seguintes características destacadas:

- Resistência: O material dos tubos PVC-O apresenta resistência muito superior aos demais materiais termoplásticos disponíveis no mercado. A resistência mínima requerida (MRS) ou Minimum Required Strength garante durabilidade de 50 anos à temperatura de 20°C.
- Robustez: Excelente resistência a impactos durante o transporte, manuseio e assentamento, além de maior resistência à pressão interna comparado a materiais similares, como PVC-U e PE.
- Leveza: Devido à maior resistência e, consequentemente, à menor espessura da parede, os tubos são mais leves, facilitando o transporte, manuseio e instalação, sem necessidade de equipamentos pesados. A simples conexão ponta e bolsa com junta elástica melhora o custo, desempenho e velocidade de instalação em comparação com tubulações de ferro dúctil e polietileno.
- Grande ductilidade: Capacidade de deformação plástica, elevada tenacidade (resistência à propagação de fissuras) e alta resistência à tração, proporcionadas pela estrutura em camadas moleculares da parede, conferindo excelente robustez ao tubo.

- Resistência à fadiga: A estrutura em camadas do PVC-O dificulta a propagação de trincas radiais devido a cargas cíclicas, resultando em alta resistência à fadiga.
- Flexibilidade longitudinal: O processo de orientação bi-axial confere ótima resistência no sentido axial, permitindo ao tubo suportar movimentos de acomodação do solo e reduzindo a necessidade de curvas em curvaturas de raio longo.
- Capacidade de vazão: A alta resistência do PVC-O permite menor espessura de parede, resultando em maior área de vazão em comparação com tubos de PVC, PE e diversas bitolas de tubos de ferro fundido. A superfície interna extremamente lisa proporciona excelente desempenho hidráulico.

3.5.4 Polietileno de alta densidade - PEAD

Segundo Vlase (2020), o material plástico mais adequado e atual para produzir os tubos necessários para o transporte de água nas modernas redes de abastecimento é comprovadamente o PEAD (Polietileno de Alta Densidade). Os tubos e conexões feitos com este material se destacam por sua longa vida útil, baixos custos de manutenção, notável resistência e baixo peso.

Os tubos de PEAD têm muitas vantagens em comparação com os tubos clássicos utilizados anteriormente. Algumas dessas vantagens são:

- Longa vida útil: Os tubos de PEAD duram muito tempo.
- Ausência de necessidade de proteção catódica: Eles não precisam de sistemas de proteção catódica.
- Sem necessidade de revestimento adicional: Não requerem revestimento interno ou externo para proteção anticorrosiva.
- Baixos custos de manutenção: A manutenção é econômica.
- Superfície interna lisa: Proporciona propriedades hidráulicas especiais que são mantidas durante o uso.
- Facilidade de montagem: A instalação é rápida e fácil, economizando tempo.

- Vedação segura: Assegura alta pressão sem vazamentos.
- Flexibilidade nas juntas: Permitem desvios angulares, possibilitando mudanças de direção sem acessórios especiais.
- Leveza: São mais leves em comparação com tubos de concreto ou metal, facilitando o transporte.
- Redução de custos: Garante transporte rápido e barato.
- Comprimentos maiores: É possível obter grandes comprimentos de tubulação, necessitando de menos conexões.
- Estabilidade térmica: Mantêm suas propriedades mesmo com mudanças de temperatura.
- Inodoros e insípidos: São não tóxicos e estáveis sob a ação de agentes químicos ou fatores meteorológicos.
- Lento envelhecimento: O processo de envelhecimento é muito lento.
- Longa durabilidade em serviço: Podem ser usados por até 50 anos se as pressões e temperaturas recomendadas pelo fabricante forem observadas.

3.6 O Software ALLIEV

As informações a seguir, foram retiradas do Manual Técnico do ALLIEV, versão 3.0.0 UPV – *Universidade Politécnica de Valencia, 2018*. (ITA, 2018; del Teso et al. 2024).

O programa ALLIEVI é um pacote de *software* destinado a simular e analisar os efeitos gerados por transientes em um sistema hidráulico pressurizado. O programa reconhece que, dentro do sistema, o fluido circula devido à gravidade, impulsionado por uma série de tanques elevados, acionado por estações de bombeamento, ou por meio de uma combinação de tanques e estações de bombeamento. Esse fluido pressurizado flui pelos tubos do sistema, que podem formar uma rede ramificada, em malha ou mista.

Para regular o fluxo de circulação pelos conduítes, o sistema pode ter diferentes tipos de válvulas instaladas em linha com esses tubos ou com uma descarga externa. Além disso, algumas dessas válvulas podem atuar como sistemas de proteção contra transientes hidráulicos.

Em um sistema hidráulico operando em estado estável, transientes podem ser gerados durante a operação dos elementos ativos do sistema. Esse regime transitório implica uma mudança no espaço e no tempo das condições de operação do sistema, à medida que ele passa do estado estável inicial para o final, após as manobras dos elementos ativos. Sob essa perspectiva, as manobras que originam os transientes são principalmente as partidas e paradas de bombas, bem como a abertura e o fechamento de válvulas.

Nos sistemas hidráulicos, outras ações também podem provocar transientes, como a mudança de nível de um tanque, alterações na demanda de uma rede de abastecimento de água e o rompimento de um conduto em determinado momento. Dessas três ações, as duas primeiras são geralmente consideradas manobras lentas ou muito lentas, resultando em transientes menores. No entanto, o rompimento de um conduto pode gerar um transiente rápido, atingindo seu máximo quando o rompimento é significativo e ocorre em um período de tempo relativamente curto.

Considerando os efeitos prejudiciais que podem surgir durante o desenvolvimento de um transiente hidráulico, a solução é fornecer ao sistema resistência mecânica suficiente para suportar as oscilações de pressão ou proteger a instalação para diminuir a amplitude dessas flutuações, mantendo-as dentro de limites aceitáveis. Para implementar essas medidas, é necessário utilizar um programa de computador capaz de simular transientes e fornecer, entre outros resultados, as oscilações de pressão originadas após uma determinada manobra. Esse é, como já mencionado, o principal objetivo do programa ALLIEVI.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente estudo visa buscar dados referentes a uma adutora situada no município de Uauá no estado da Bahia, tais como: localização e caracterização da área em questão, estudos populacionais e de demandas, taxas de ocupação, consumo de água per capita, coeficientes de consumo (k1 e k2), determinação da população média, vazões de projeto, cálculo do diâmetro necessários de gravidade, perdas de cargas, nova vazão, verificação da velocidade e, de transientes hidráulicos que é o foco desse trabalho, com esses dados em mãos analisar os valores obtidos para alguns cenários de transientes hidráulicos gerados com o auxílio do software do ALLIEVI, bem como, possíveis soluções para os respectivos cenários, mostrando

também a melhor opção de cenário obtido de acordo com os resultados gerados pelo software, trazendo também a explicação das características e diferenças de cada cenário, como também gráficos com os resultados e comentários pertinentes a cada cenário.

4.1 Trecho por gravidade, situado no Morro da Cascavel, ao reservatório RAD 400 m³ de Uauá.

O sistema adutor principal (Figura 13) conta com um trecho por recalque e outro por gravidade, com extensão total da ordem de 32,113 km.

Figura 13 - Sistema adutor principal

Fonte: Google Earth (2024)

O trecho por recalque interliga a Estação Elevatória (EE) da Caraíba Metais, que é uma empresa de mineração da região, a uma caixa de passagem situada no Morro da Cascavel, com extensão de 11.600 metros.

Já o trecho por gravidade interliga a caixa de passagem supracitada, a um reservatório 400 m³ em Uauá, com extensão de 20.513 metros em tubulação única de DN150 TK7 JE FOFO.

Para este estudo, irá ser considerado apenas o trecho por gravidade.

4.1.1 Características da área de estudo

A cidade de Uauá passou à condição de Município em 1866, por meio da Lei Vigente, nº 628, e pertencia anteriormente a Monte Santo. De acordo com o último

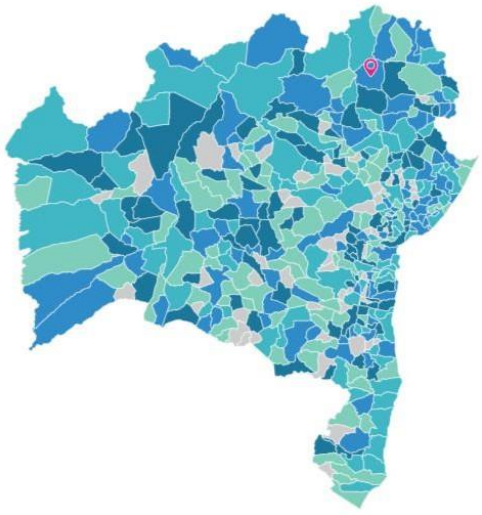
censo realizado pelo IBGE (2022), conta com uma população de aproximadamente 24.665 pessoas.

Situa-se no Nordeste do estado da Bahia, na Microrregião Homogênea nº 014, denominada Euclides da Cunha. Esta cidade dista 416 Km de Salvador e 220 Km de Cipó e é fronteiriça nos seguintes limites de municípios: ao Norte com Curaçá e Chorrochó; ao Sul, com Monte Santo; a Oeste com Jaguarari e Andorinha; e a Leste com Canudos.

Uauá possui área total de 3.128 Km2 e sua sede está na altitude de 439 metros, localizada nas coordenadas geográficas: 09°50’S e 39°29’W.

A Figura 14, apresentada o mapa do estado da Bahia, com indicação do município de Uauá.

Figura 14 - Localização da cidade de Uauá



Fonte: IBGE (2024)

O clima semiárido e árido é predominante na região, com precipitação anual na faixa de 495 mm e temperatura média variando em torno de 23,9°C.

O período chuvoso compreende os meses de fevereiro a abril, sendo alto os riscos de seca. A área do município está totalmente inserida do Polígono das Secas. (SUDENE, 1997)

4.2 Dimensionamento da adutora

A seguir, serão apresentados a memória de cálculo e os parâmetros utilizados para o dimensionamento do trecho de gravidade da adutora, que vai da caixa de passagem localizada no Morro da Cascavel até o reservatório 400m³ localizado no município de Uauá.

4.2.1 Taxa de ocupação

Segundo o censo do IBGE realizado em 2022, Uauá conta com densidade demográfica de 8,06 habitantes por km² e uma média de 2,82 moradores por residência.

4.2.2 Coeficiente de variação de consumo

Utilizando a recomendação da NBR 122218/2017 para os coeficientes k1 e k2, temos que:

- Coeficiente de variabilidade máxima diária do fluxo: $K_1 = 1,20$
- Coeficiente de variabilidade máxima horária do fluxo: $K_2 = 1,50$

4.2.3 Consumo per capita de água

O valor do consumo médio per capita é calculado dividindo-se o total de água consumida diariamente pelo número total de habitantes atendidos, utilizando os registros operacionais do sistema de abastecimento ou os dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS). A Tabela 1 apresenta os valores de referência estabelecidos pela Agência Nacional de Águas e Saneamento (ANA), que o sistema utiliza como limites.

Tabela 1 - Consumo per capita de referência

População atendida	**Consumo *per capita* de referência (L/hab.dia)**
< 100.000	90 a 140
De 100.000 a 500.000	100 a 220
> 500.000	150 a 300

Fonte: Adaptado de Von Sperling, Marcos. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgoto. 4 ed. - Belo Horizonte: Editora UFMG, 2014.

Utilizando os valores de referência da ANA, e as recomendações do livro Manual de Hidráulica de Azevedo Netto (1998), adotou-se 100 L/hab.dia para o projeto em questão. Esse valor se encontra dentro dos valores de referência supracitados para população menor que 100.000 habitantes e está também de acordo com as recomendações do livro de Netto para pequenas cidades do Nordeste.

4.2.4 Cálculo das vazões de projeto

Para o dimensionamento da adutora por gravidade, é necessária a vazão média ($Q_{méd}$) que é dada pela seguinte fórmula:

$$Q_{méd} = \frac{População \times Consumo}{86400} \quad (1)$$

$$Q_{méd} = \frac{24665 \times 100}{86400} \quad (2)$$

$$Q_{méd} = 28{,}54\ L/s \quad (3)$$

Já para as vazões máxima diária ($Q_{máxd}$) e máxima horária ($Q_{máxh}$), basta multiplicar a vazão média pelos seus respectivos coeficientes, sendo essas:

1) Vazão máxima diária:

$$Q_{máxd} = Q_{méd} \times K_1 \quad (4)$$

Onde:

- $Q_{méd}$ = vazão de projeto
- K_1 = coeficiente de variabilidade máxima diária do fluxo

$$Q_{máxd} = 28{,}54 \times 1{,}20 \quad (5)$$

$$Q_{máxd} = 34{,}24\ L/s \quad (6)$$

2) Vazão máxima horária:

$$Q_{máxh} = Q_{méd} \times K_2 \quad (7)$$

Onde:

- $Q_{méd}$ = vazão de projeto
- K_2 = coeficiente de variabilidade máxima diária do fluxo

$$Q_{máxh} = 28{,}54 \times 1{,}50 \quad (8)$$

$$Q_{máxh} = 42{,}81\ L/s \quad (9)$$

4.3 Informações sobre a adutora analisada

O trecho que será analisado é formado pelos seguintes elementos:

1) Caixa de passagem localizada no Morro do Cascavel, que para o presente trabalho será considerada como um RED 100 m³;
2) Adutora por gravidade DN 150 FOFO TK7 JE com extensão de 20.513 m que transportará a água até o reservatório RAD 400 m³;
3) Reservatório RAD 400 m³ apoiado, em concreto armado;
4) N.A. na chegada do RED 100m³ = 513,4 m;
5) N.A. na chegada RAD 400m³ = 454 m.

4.3.1 Perdas de carga localizada e distribuídas

- Localizada: como se tem uma adutora com um comprimento bastante elevado, será desconsiderada as perdas de carga localizadas

- Distribuída: é dada pela diferença de cota entre o RED 100m³ no Morro do Cascavel ao Reservatório RAD 400m³ (Figura 15), com isso tem-se que:

$$\Delta h = z_1 - z_2 \quad (10)$$

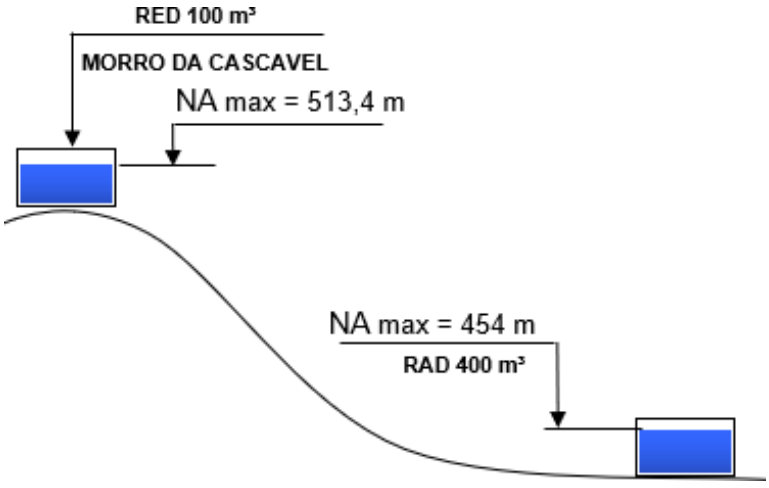
Onde:

- Δh = perda de carga distribuída
- z_1 = cota do reservatório de onde parte a tubulação
- z_2 = cota do reservatório onde chega a tubulação

$$\Delta h = 513{,}4 - 454 \quad (11)$$

$$\Delta h = 59{,}4\ m \quad (12)$$

Figura 15 - Esquema de gravidade entre o RED 100 m³ e RAD 400m³



Fonte: Autor (2024)

4.3.2 Perda de carga unitária (J)

Com isso, pode-se calcular a perda de carga unitária *(J)* dada pela seguinte fórmula:

$$J = \frac{\Delta h}{L} \tag{13}$$

Onde:

- Δh = perda de carga distribuída
- L = comprimento da tubulação

$$J = \frac{59{,}4}{20513} \tag{14}$$

$$J = 0{,}00289\ m/m \tag{15}$$

4.3.3 Diâmetro da adutora de gravidade

De acordo com Netto (2018) e Porto (2006), as equações de Hazen-Williams são apropriadas para escoamentos turbulentos e são amplamente aceitas pelos engenheiros devido à sua simplicidade e eficácia. A boa aceitação dessa fórmula possibilitou a determinação de valores do coeficiente C para diversos materiais, apresentados na tabela 2.

Tabela 2 - Valores sugeridos para o coeficiente C de diferentes materiais

Material	C ($m^{0,367}/s$)
Aço soldado novo	130
Aço soldado envelhecido	90
Concreto novo	130
Concreto envelhecido	110
Ferro fundido novo	130
Ferro fundido envelhecido	100
PVC novo	150
PVC envelhecido	130

Fonte: Adaptado de Porto (2006) e Netto (2018).

Utilizando-se das fórmulas de Hazen-Williams, e levando em consideração um ferro fundido novo (C=130), temos que o diâmetro é dado por:

$$D = \left(\frac{10{,}65 \cdot {Q_{máxd}}^{1{,}85} \cdot C^{-1{,}85}}{J}\right)^{1/4{,}87} \quad (16)$$

Onde:

- D = diâmetro da tubulação
- $Q_{máxd}$ = vazão máxima diária
- C = coeficiente devido ao tipo de material da tubulação
- J = perda de carga unitária

$$D = \left(\frac{10{,}65 \cdot 0{,}03424^{1{,}85} \cdot 130^{-1{,}85}}{0{,}00289}\right)^{1/4{,}87} \quad (17)$$

$$D = 0{,}235\ m \quad (18)$$

Com isso adotou-se o diâmetro comercial DN = 250 mm

4.3.4 Nova vazão

Ainda utilizando-se da fórmula de Hazen-Williams, dessa vez isolando a vazão e utilizando o novo diâmetro calculado, tem-se que:

$$Q = 0{,}279 \cdot C \cdot D^{2{,}63} \cdot J^{0{,}54} \quad (19)$$

Onde:

- Q = nova vazão da adutora
- C = coeficiente devido ao tipo de material da tubulação
- D = novo diâmetro calculado da tubulação
- J = perda de carga unitária

$$Q = 0{,}279 \cdot 130 \cdot 0{,}25^{2{,}63} \cdot 0{,}00289^{0{,}54} \quad (20)$$

$$Q = 0{,}0402\ \frac{m^3}{s}\ ou\ 40{,}2\ L/s \quad (21)$$

4.3.5 Verificação da velocidade

Pela equação da continuidade, diz que:

$$Q = A.V$$

Onde:

- A = área da seção transversal da adutora
- V = velocidade
- Q = vazão

Isolando a velocidade, tem-se que:

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{4Q}{\pi D^2} \quad (22)$$

$$V = \frac{4(0{,}0402)}{\pi(0{,}25)^2} \quad (23)$$

$$V = 0{,}82\ m/s \quad (24)$$

De acordo com a NBR 12218/2017 a velocidade mínima não deve ser inferior a 0,6 m/s e a máxima não superior a 3,5 m/s, com isso a velocidade calculada atende os parâmetros estabelecidos pela norma.

4.4 A simulação

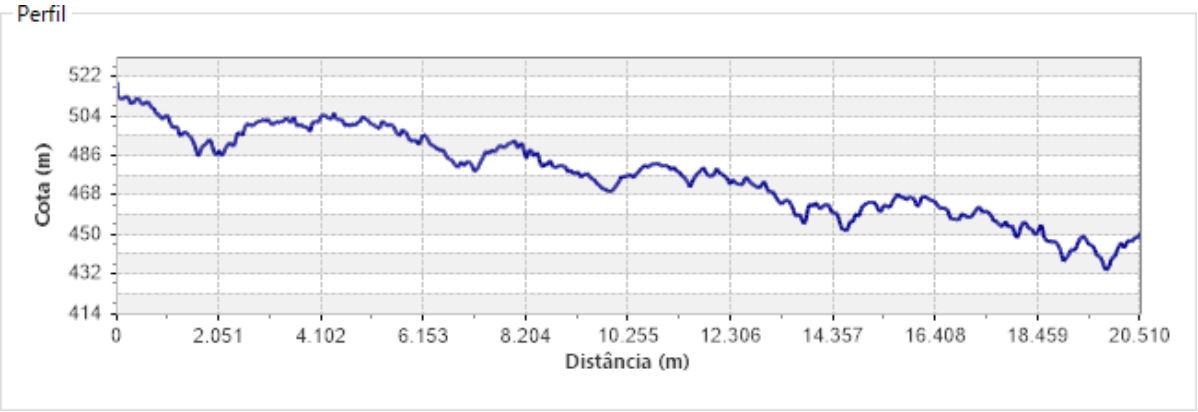
O fechamento ou abertura de uma válvula desencadeia fenômenos hidráulicos que precisam ser analisados, previstos e dimensionados adequadamente para evitar o rompimento ou danificação da tubulação e assegurar o abastecimento de água para as pessoas. (MAGALHÃES, 2017)

As simulações foram feitas com o auxilio do software ALLIEV, que comparou o comportamento da tubulação de Ferro Fundido com DN de 250mm em diferentes tempos de fechamento de válvulas, a montante, a jusante e simultâneo, focando nas variáveis de subpressão e sobrepressão, que segundo Magalhães (2017) são as mais importantes para fluídos em regimes transitórios.

4.4.1 Dados utilizados nas simulações

Com o auxilio do software Google Earth, foi possível obter o levantamento topográfico do terreno, com dados de cota e distâncias, o que tornou possível obter o perfil longitudinal do terreno, que pode ser observado na Figura 16.

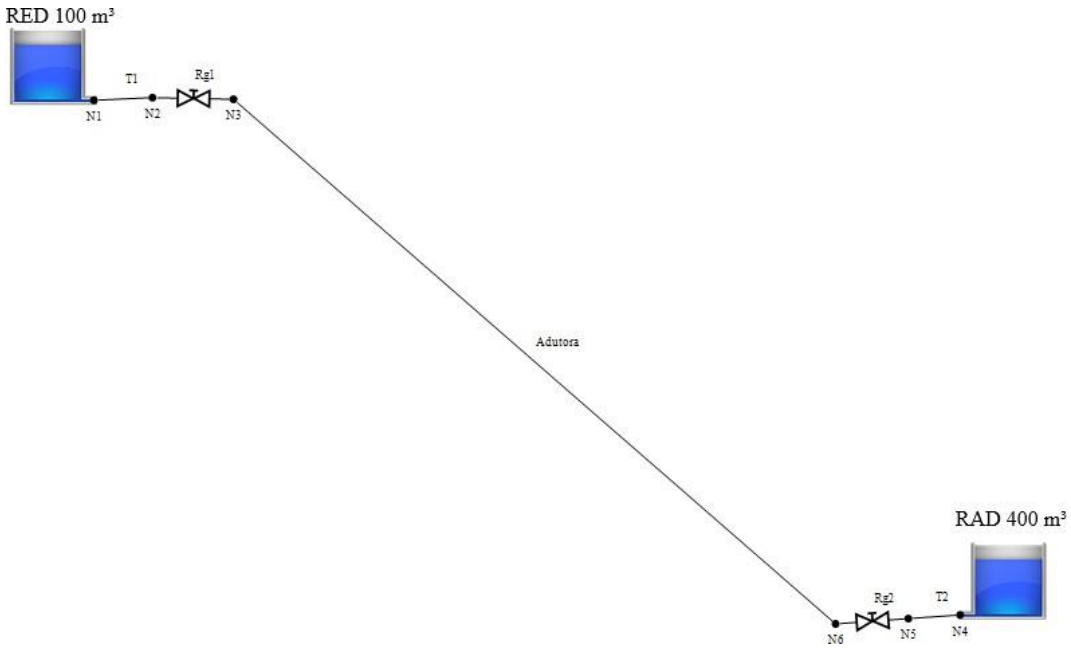
Figura 16 - Perfil longitudinal do terreno



Fonte: Autor (2024)

Além do perfil do terreno, os objetos utilizados para a simulação foram: os reservatórios, válvulas reguladores tipo gaveta, nós e tubulaç ão. Foram posicionadas válvulas tanto na saída do RED 100 m³ quanto na chegada do RAD 400 m³ que são utilizadas para a manutenção da adutora. O esquema da adutora no software pode ser visto na Figura 17.

Figura 17 – Esquema da adutora no ALLIEV



Fonte: Autor (2024)

Os dados dos nós, dos reservatórios, do tubo e das válvulas, são visualizados nas Figuras 18, 19, 20, 21.

Figura 18 - Dados dos nós

	Nós	
	Nome	Cota (m)
	N1	513,4
	N2	513,4
	N3	513,4
	N4	451
	N5	451
	N6	451

Fonte: Autor (2024)

Figura 19 - Dados dos reservatórios

Reserv. - Dados Básicos						
Nome	Ni	Nf	Zs (m)	Tipo	S (m^2)	Z0 (m)
RED 100m³	---	N1	513,4	GD		524
RAD 400m³	N4	---	451	GD		454

Fonte: Autor (2024)

Onde:

- Zs, a cota da soleira do reservatório;
- Z0, a cota do nível d'água do reservatório;
- GD, reservatório considerado de grandes dimensões.

Figura 20 - Dados do tubo de Ferro Fundido

Tubos - Dados Básicos										Perdas	
Nome	Ni	Zi (m)	Nf	Zf (m)	Dint (mm)	L (m)	e (mm)	a (m/s)	Perfil	Rug (mm)	k
T1	N1	513,4	N2	513,4	250	5	5,5	958,4545 Calc.	----	0,3	0
T2	N5	451	N4	451	250	5	5,5	958,4545 Calc.	----	0,3	0
Adutora	N3	513,4	N6	451	250	20513	5,5	958,4545 Calc.	-^/\--/	0,3	0

Fonte: Autor (2024)

Onde:

- Zi, a cota do nó inicial da tubulação;
- Zf, a cota do nó final da tubulação;
- a, a celeridade da onda na tubulação;
- e, a espessura do tubo
- L, a extensão da tubulação
- Dint, o diâmetro interno da tubulação

Figura 21 - Dados das válvulas de gaveta

Válvula regulação - Dados Básicos								Manobra
Nome	Ni	Nf	Z (m)	DN (mm)	k Ramal	Tipo	Modelo	Tipo
Rg1	N2	N3	513,4	250	0,1	Comporta		Tabelada
Rg2	N6	N5	451	250	0,1	Comporta		Tabelada

Fonte: Autor (2024)

4.5 Cenários analisados

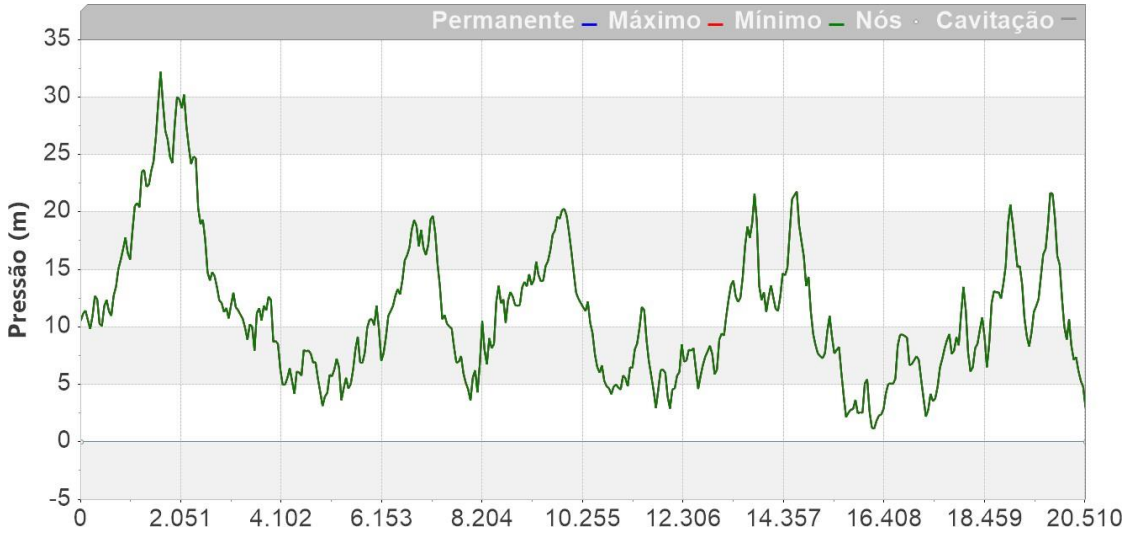
O foco do presente estudo será a análise do comportamento das subpressões e sobrepressões geradas na adutora com relação à velocidade de fechamento das válvulas a montante, a jusante e simultaneamente.

5 RESULTADOS

5.1 Cenário principal – Válvulas abertas

O primeiro cenário gerado foi a operação diária, com o fluxo fluindo normalmente, com ambas as válvulas abertas. Na Figura 22, é mostrado o gráfico do envolvente de pressões na tubulação gerado pelo *software*, sendo as pressões máximas e mínimas nos valores de 32,21 e 1.18 m.c.a.

Figura 22 - Envoltória de pressão com ambas as válvulas abertas



Fonte: Autor (2024)

O tubo de Ferro Fundido FoFo K7 tem uma Pressão de Serviço Admissível (PSA) de 5,2 Mpa equivalente a cerca de 530 m.c.a., que está muito abaixo do valor de máxima pressão gerada pelo software. Já segundo a recomendação da Norma Brasileira NBR 12215-1/2017 a pressão mínima, devido aos transientes hidráulicos atuantes em qualquer seção da tubulação é de no máximo -20kPa ou -2 m.c.a., para sistemas com água bruta. Ou seja, a adutora não apresenta problemas de sobrepressão ou subpressão em pleno funcionamento, com ambas as válvulas abertas.

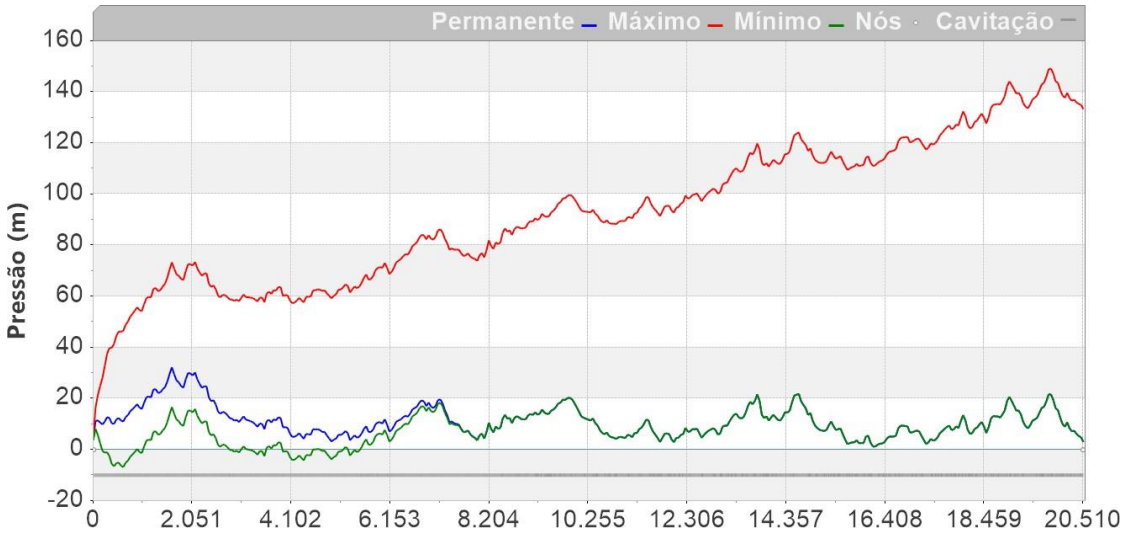
5.2 Cenário 01 – Fechamento de válvula a jusante

O primeiro cenário gerado foi a simulação de como se comporta a envoltória de pressões para um fechamento de válvula a jusante, junto ao RAD 400 m³.

5.2.1 Fechamento de 30s a jusante

A Figura 23, mostra a envoltória de pressões na tubulação causada por um fechamento de 30s na válvula a jusante da tubulação.

Figura 23 - Envoltória de pressões para um fechamento de 30s a jusante



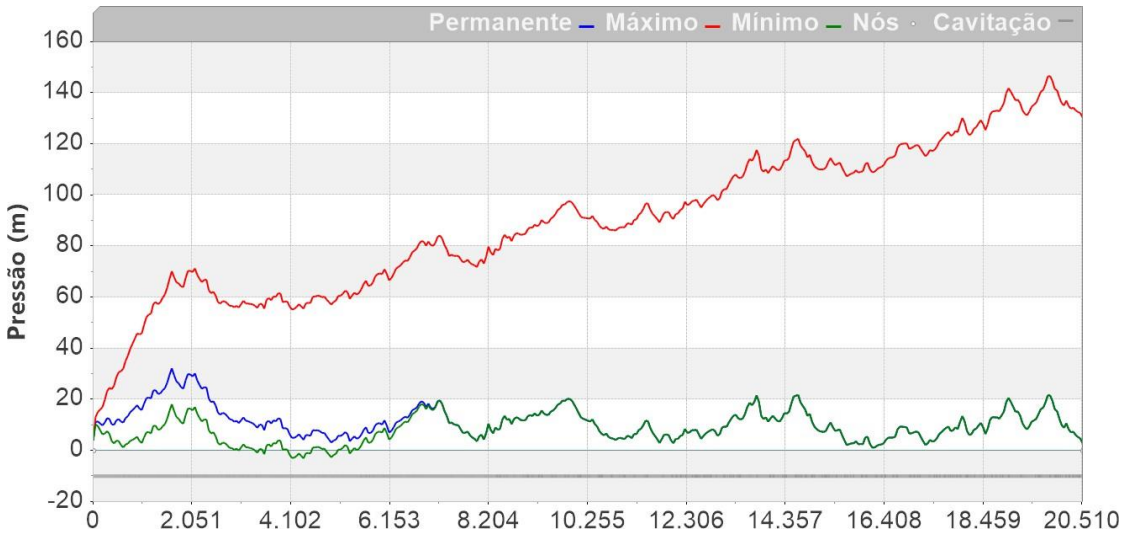
Fonte: Autor (2024)

Os valores de pressão máxima e mínima foram respectivamente 149,10 m.c.a e -6,8 m.c.a., para a pressão máxima não haveria problemas, pois, como visto anteriormente o tubo aguenta pressões máximas de até 530 m.c.a., entretanto para a pressão mínima, ficaria abaixo do valor recomendado pela norma. Com isso foi feito uma nova simulação apenas aumentando o tempo de fechamento da válvula para observar o comportamento.

5.2.2 Fechamento de 90s a jusante

A Figura 24, mostra a envoltória de pressões na tubulação causada por um fechamento de 90s na válvula a jusante da tubulação.

Figura 24 - Envoltória de pressões para um fechamento de 90s a jusante



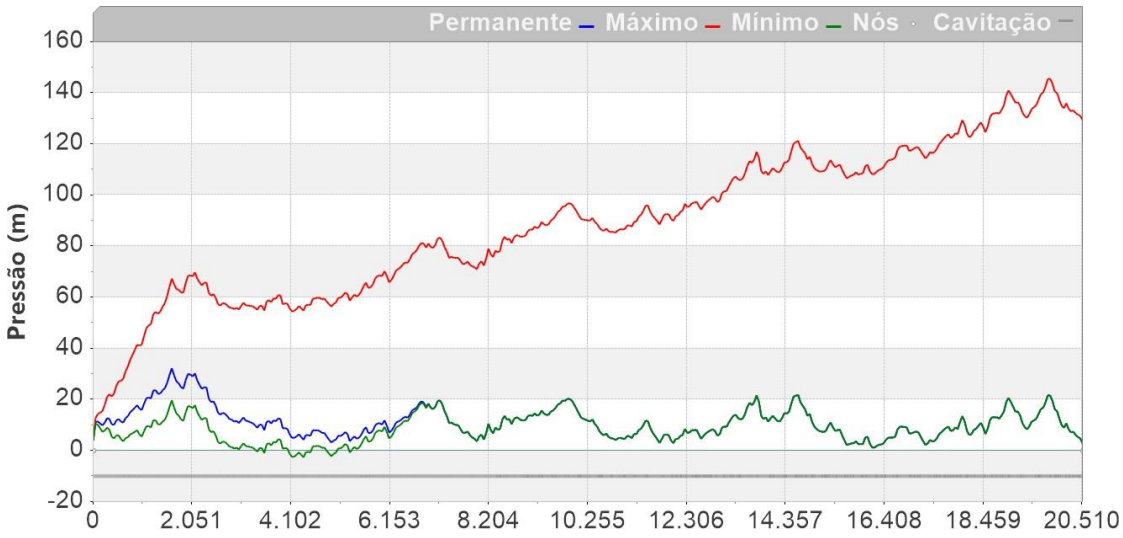
Fonte: Autor (2024)

Apesar de uma melhora significativa, a pressão mínima ainda foi de -3,03 m.c.a. que ainda está em desacordo com a recomendação da norma, já para pressão máxima o resultado foi de 146,61 m.c.a. Como houve uma melhora significativa apenas com o aumento do tempo de fechamento da válvula, foi simulado uma nova situação, agora com o fechamento de 120s.

5.2.3 Fechamento de 120s a jusante

A Figura 25, mostra a envoltória de pressões na tubulação causada por um fechamento de 120s na válvula a jusante da tubulação.

Figura 25 - Envoltória de pressões para um fechamento de 120s a jusante



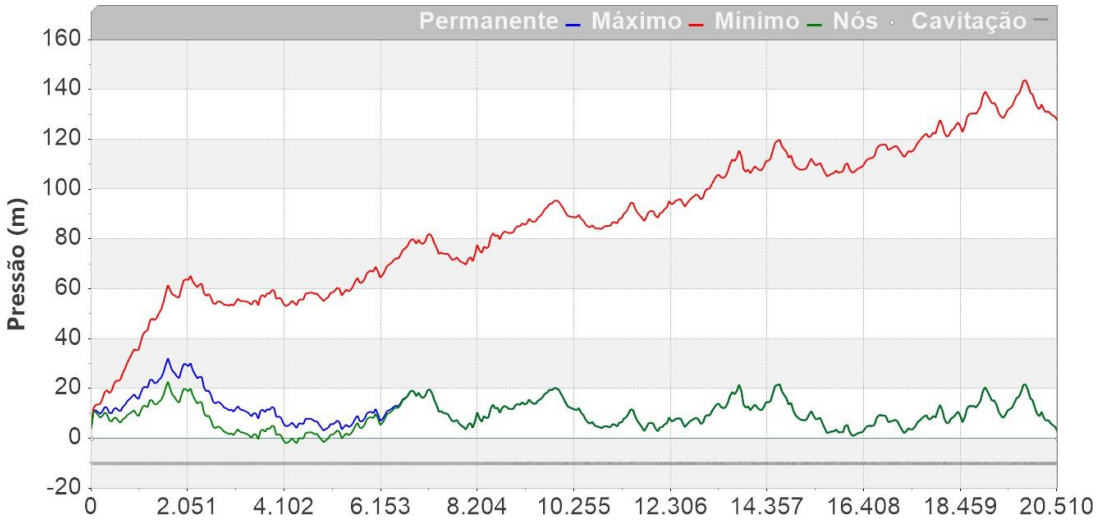
Fonte: Autor (2024)

Dessa vez a pressão mínima chegou muito próximo do recomendado, ficando em -2,60 m.c.a, com a pressão máxima de 145,59 m.c.a. Com isso foi simulado mais uma situação, dessa vez com 180s de tempo de fechamento da válvula.

5.2.4 Fechamento de 180s a jusante

A Figura 26, mostra a envoltória de pressões na tubulação causada por um fechamento de 180s na válvula a jusante da tubulação.

Figura 26 - Envoltória de pressões para um fechamento de 180s a jusante



Fonte: Autor (2024)

Com 180s de fechamento, a pressão máxima foi de 143,81 m.c.a. e a pressão mínima caiu para -1,91 m.c.a. ficando dentro das recomendações da norma, sem necessidade de equipamentos de proteção.

5.3 Cenário 02 – Fechamento de válvula a montante

O segundo cenário gerado foi a simulação de como se comporta a envoltória de pressões para um fechamento de válvula a montante, junto ao RED 100 m³.

5.3.1 Fechamento de 60s a montante

A Figura 27, mostra a envoltória de pressões na tubulação causada por um fechamento de 60s na válvula a montante da tubulação.

Figura 27 - Envoltória de pressões para um fechamento de 60s a montante

Fonte: Autor (2024)

A pressão máxima nessa situação foi de 32,21 m.c.a. que como já visto não apresenta riscos à tubulação, entretanto a mínima foi de -10 m.c.a. que é inclusive o limite do software, com isso foi aumentado o tempo de fechamento para 3600s (1h).

5.3.2 Fechamento de 3600s a montante

A Figura 28, mostra a envoltória de pressões na tubulação causada por um fechamento de 3600s (1h) na válvula a montante da tubulação.

Figura 28 - Envoltória de pressões para um fechamento de 3600s a montante

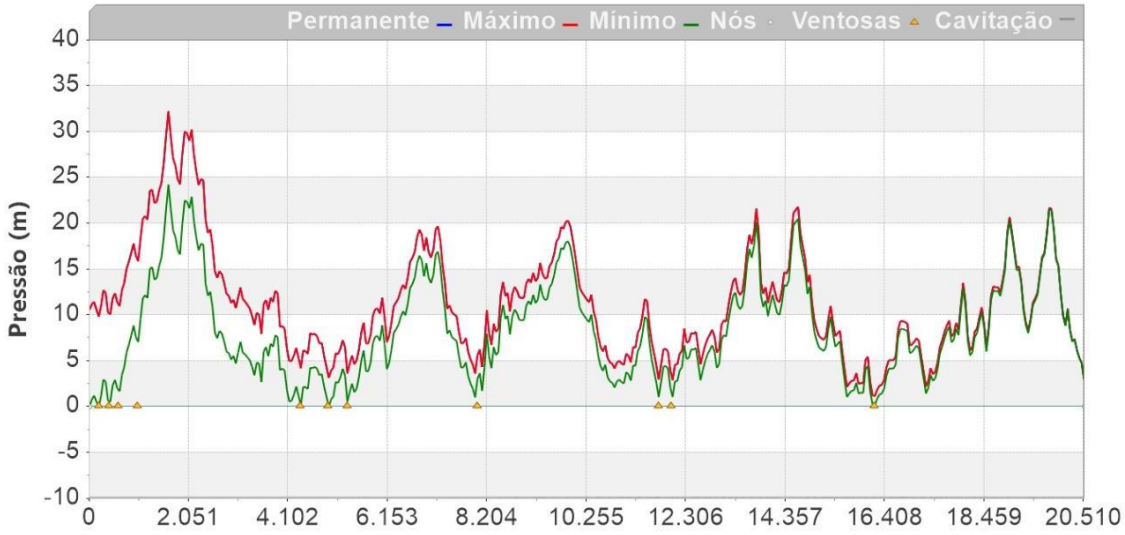
Fonte: Autor (2024)

As pressões máximas e mínimas se mantiveram as mesmas da simulação com 60s de tempo de fechamento, sendo também 1 hora para o fechamento de uma válvula uma alternativa não muito interessante. Com isso foram adicionadas ventosas tipo anti golpe, de duplo efeito. Estes dispositivos atuam admitindo e extraindo ar da adutora o que causará uma diminuição dos efeitos do golpe de aríete na tubulação.

5.3.3 Fechamento de 3600s a montante com proteção

A Figura 29, mostra a envoltória de pressões na tubulação causada por um fechamento de 3600s (1h) na válvula a montante da tubulação com ventosas como dispositivo de proteção.

Figura 29 - Envoltória de pressões para um fechamento de 3600s a montante com proteção



Fonte: Autor (2024)

Foram adicionadas 11 ventosas ao longo da adutora, os detalhes das ventosas e suas respectivas distâncias ao longo da tubulação podem ser visualizados na Tabela 3. Com a proteção das ventosas houve uma queda brusca da pressão mínima para -0,0028 m.c.a. mantendo a pressão máxima em 32,21 m.c.a. como na situação anterior.

Tabela 3 - Detalhe das ventosas para fechamento a montante

	Tipo Ventosa	Dist. (m)
1	Aduc. DN 80 + Vent. DN 50	200
2	Aduc. DN 80 + Vent. DN 50	400
3	Aduc. DN 80 + Vent. DN 50	600
4	Aduc. DN 80 + Vent. DN 50	1000
5	Aduc. DN 80 + Vent. DN 50	4350
6	Aduc. DN 80 + Vent. DN 50	4925
7	Aduc. DN 80 + Vent. DN 50	5330
8	Aduc. DN 80 + Vent. DN 50	8000
9	Aduc. DN 80 + Vent. DN 50	11750
10	Aduc. DN 80 + Vent. DN 50	12000
11	Aduc. DN 80 + Vent. DN 50	16200

Fonte: Autor (2024)

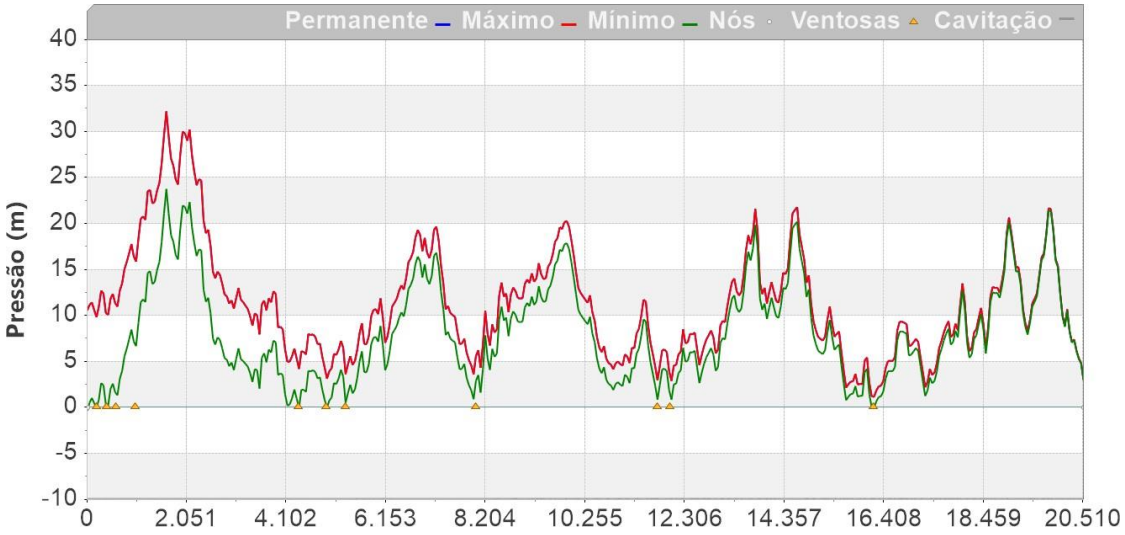
Entretanto o tempo de fechamento de 1 hora ainda é alto, por esse motivo foram simulados tempos de fechamentos menores, já que agora a tubulação possui

proteção das ventosas. O primeiro tempo de fechamento simulado após a adição das ventosas foi de 900s.

5.3.4 Fechamento de 900s a montante com proteção

A Figura 30, mostra a envoltória de pressões na tubulação causada por um fechamento de 900s na válvula a montante da tubulação com ventosas como dispositivo de proteção.

Figura 30 - Envoltória de pressões para um fechamento de 900s a montante com proteção



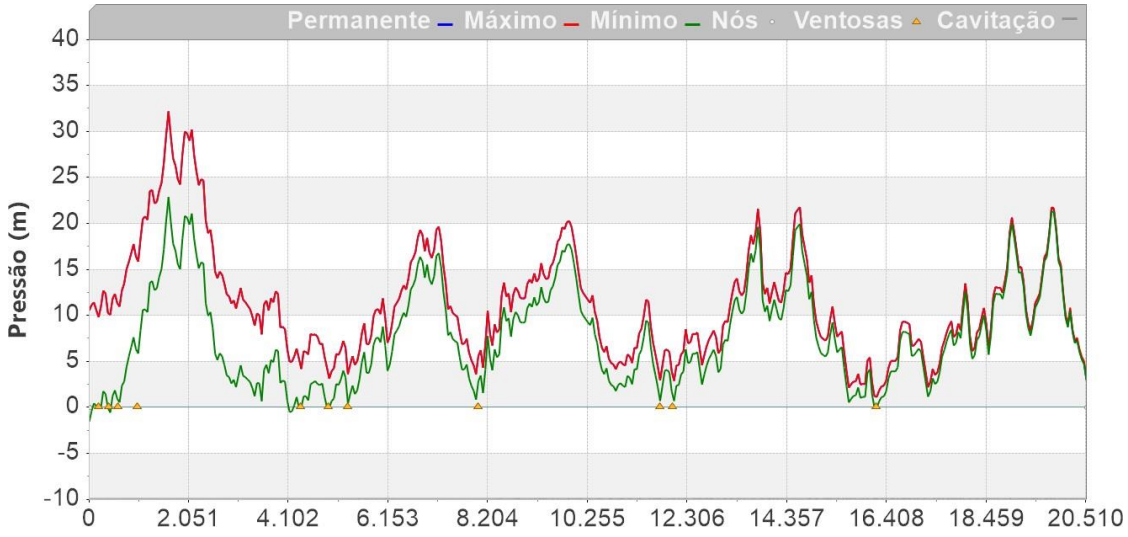
Fonte: Autor (2024)

A pressão mínima foi de -0,32 m.c.a. enquanto que a máxima se manteve nos 32,21 m.c.a., como o limite recomendado pela norma é de -2 m.c.a., foram simuladas novas situações com menores tempos de fechamento.

5.3.5 Fechamento de 300s a montante com proteção

A Figura 31, mostra a envoltória de pressões na tubulação causada por um fechamento de 300s na válvula a montante da tubulação com ventosas como dispositivo de proteção.

Figura 31 - Envoltória de pressões para um fechamento de 300s a montante com proteção



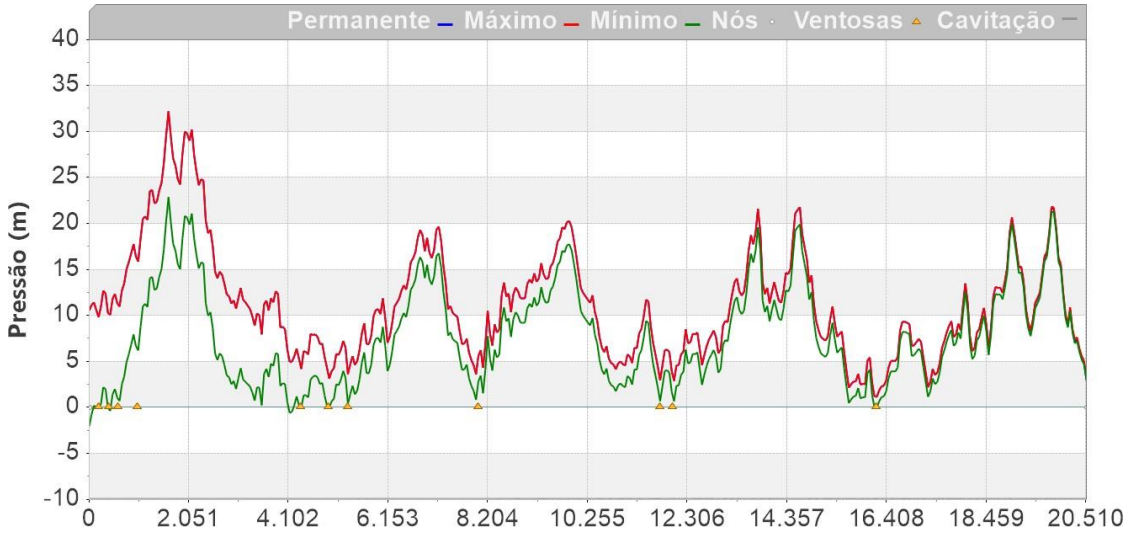
Fonte: Autor (2024)

A pressão mínima para essa situação caiu para -1,50 m.c.a. enquanto que a máxima se manteve com o mesmo valor anterior, com isso foi simulado mais uma situação dessa vez com o tempo de fechamento de 240s.

5.3.6 Fechamento de 240s a montante com proteção

A Figura 32, mostra a envoltória de pressões na tubulação causada por um fechamento de 240s na válvula a montante da tubulação com ventosas como dispositivo de proteção.

Figura 32 - Envoltória de pressões para um fechamento de 240s a montante com proteção



Fonte: Autor (2024)

Foi atingido uma pressão mínima de -1,98 m.c.a., que é bem próximo do recomendado pela norma, com a pressão máxima se mantendo em 32,21 m.c.a. Com a utilização das ventosas como equipamentos de proteção, foi possível mitigar os efeitos do golpe de aríete na tubulação com um tempo de fechamento aceitável.

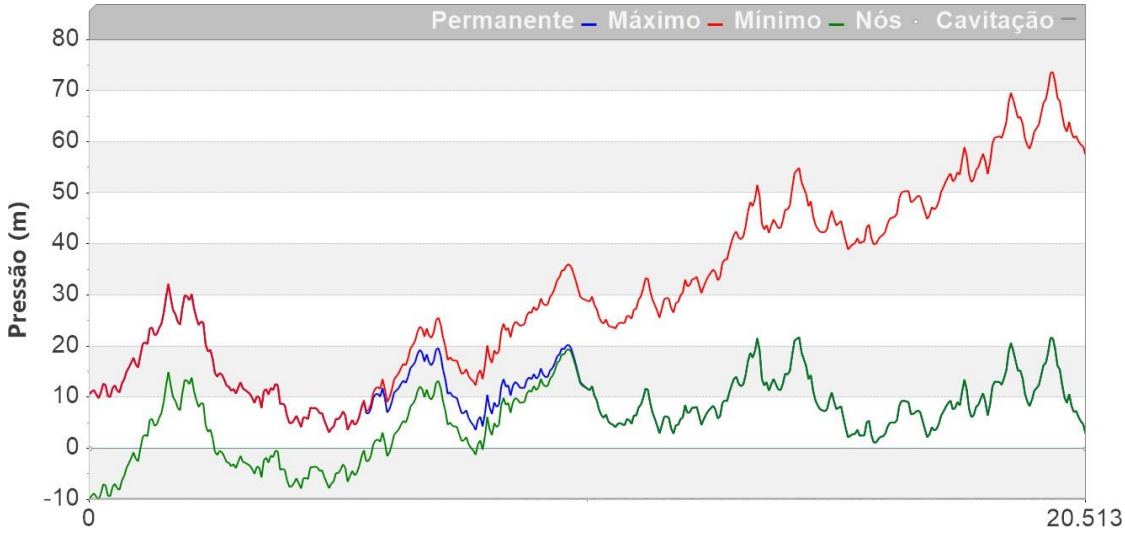
5.4 Cenário 03 – Fechamento de válvula simultâneo

O terceiro cenário foi gerado a simulação de como se comporta a envoltória de pressões para um fechamento de válvulas simultâneas.

5.4.1 Fechamento de 7200s simultâneo de válvulas

A Figura 33, mostra a envoltória de pressões na tubulação causada por um fechamento de 7200s (2h) nas válvulas a montante e a jusante da tubulação.

Figura 33 - Envoltória de pressões para um fechamento de 7200s simultâneo de válvulas



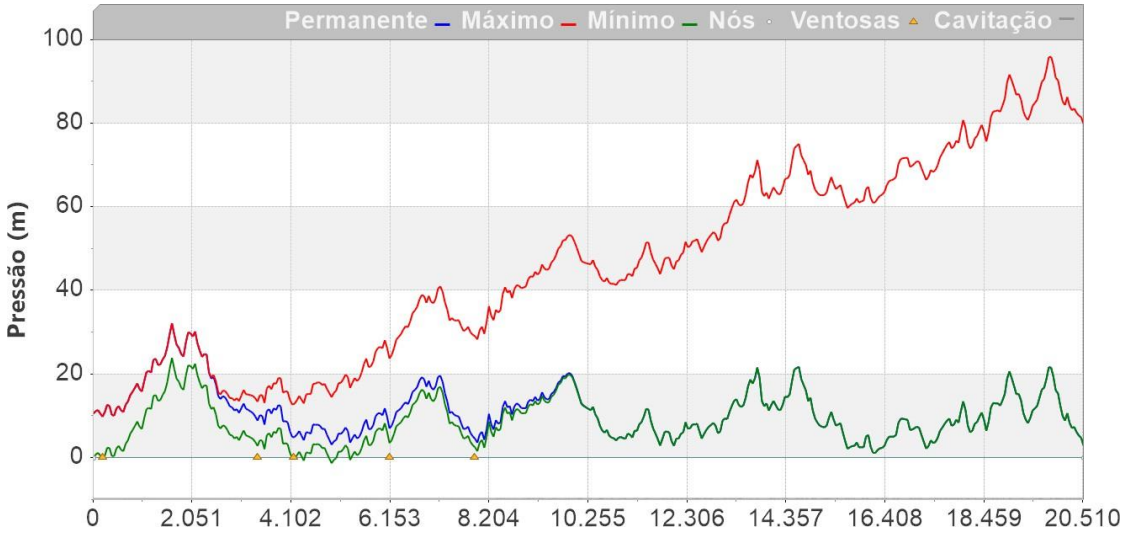
Fonte: Autor (2024)

As pressões máximas e mínimas foram de 73,67 e -10 m.c.a. respectivamente. Visto que o comportamento do fechamento simultâneo no que se diz respeito a pressão mínima no começo da tubulação é bem parecida com a de fechamento a jusante, foram adicionadas ventosas como equipamento de proteção e diminuído o tempo de fechamento para o próximo cenário.

5.4.2 Fechamento de 3600s simultâneo de válvulas com proteção

A Figura 34, mostra a envoltória de pressões na tubulação causada por um fechamento de 3600s (1h) nas válvulas a montante e a jusante da tubulação com ventosas como equipamento de proteção.

Figura 34 - Envoltória de pressões para um fechamento de 3600s simultâneo de válvulas com proteção



Fonte: Autor (2024)

Foram adicionadas 5 ventosas na metade inicial da adutora, que eram onde se concentravam as pressões negativas observadas na situação anterior, os detalhes das ventosas e suas respectivas distâncias ao longo da tubulação podem ser visualizados na Tabela 4.

Tabela 4 - Detalhe das ventosas para fechamento simultâneo

	Tipo Ventosa	Dist. (m)
1	Aduc. DN 80 + Vent. DN 50	200
2	Aduc. DN 80 + Vent. DN 50	3400
3	Aduc. DN 80 + Vent. DN 50	4150
4	Aduc. DN 80 + Vent. DN 50	6150
5	Aduc. DN 80 + Vent. DN 50	7900

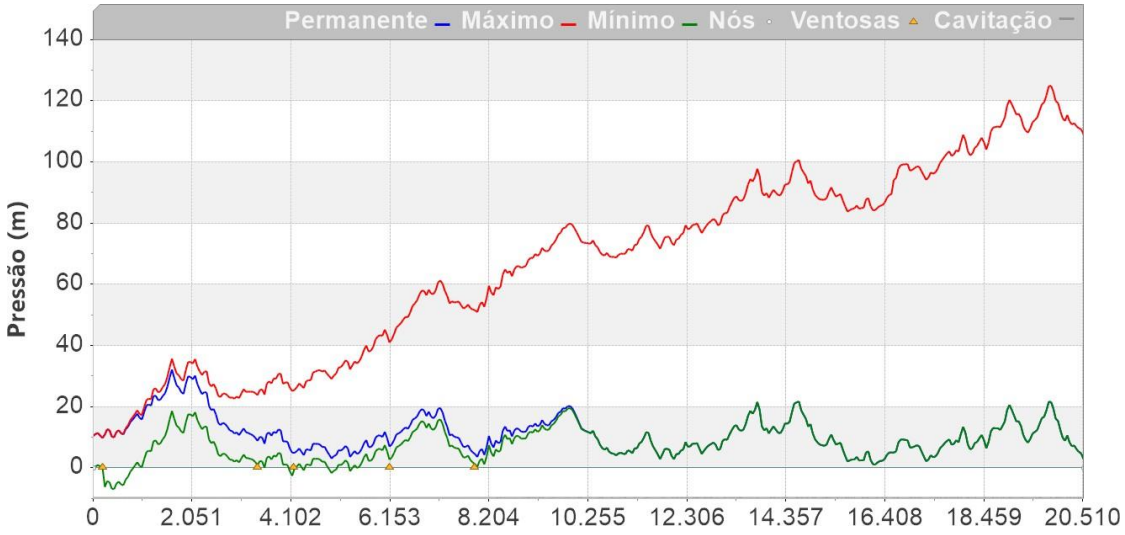
Fonte: Autor (2024)

Com a proteção das ventosas houve uma queda da pressão mínima para -1,27 m.c.a. com a pressão máxima em 95,95 m.c.a. Mas como dito anteriormente 1h é um tempo de fechamento alto e ainda existe uma folga na recomendação da norma para pressão mínima, por isso foram geradas mais situações com tempos menores de fechamento.

5.4.3 Fechamento de 900s simultâneo de válvulas com proteção

A Figura 35, mostra a envoltória de pressões na tubulação causada por um fechamento de 900s nas válvulas a montante e a jusante da tubulação com ventosas como equipamento de proteção.

Figura 35 - Envoltória de pressões para um fechamento de 900s simultâneo de válvulas com proteção



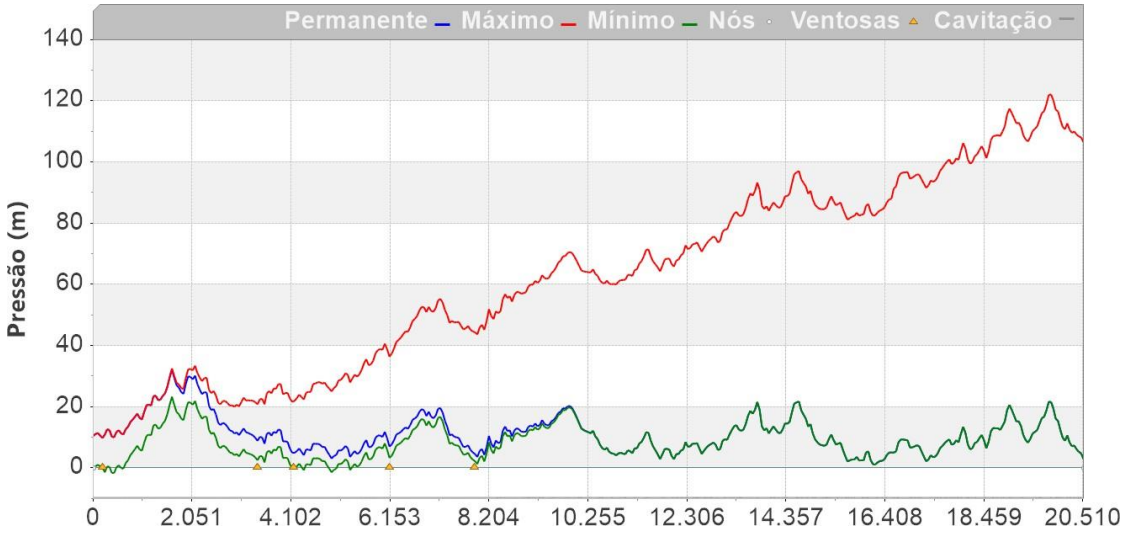
Fonte: Autor (2024)

As pressões máximas e mínimas foram de 124,97 e -6,85 m.c.a. respectivamente, como a pressão mínima ficou acima do recomendado por noma, foi aumentado o tempo de fechamento para 1200s.

5.4.4 Fechamento de 1200s simultâneo de válvulas com proteção

A Figura 36, mostra a envoltória de pressões na tubulação causada por um fechamento de 1200s nas válvulas a montante e a jusante da tubulação com ventosas como equipamento de proteção.

Figura 36 - Envoltória de pressões para um fechamento de 1200s simultâneo de válvulas com proteção



Fonte: Autor (2024)

Com o aumento do tempo de fechamento para 1200s e a adição das ventosas como equipamento de proteção, a pressão mínima atingida foi de -1,57 m.c.a. enquanto que a pressão máxima foi de 122,15 m.c.a. ficando ambas dentro das recomendações da norma diminuindo os riscos à adutora e com um fechamento simultâneo de válvulas de 20 minutos, que é aceitável.

6 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Sabe-se que basicamente o que causa o golpe de aríete é a variação brusca na velocidade do fluido, geralmente provocada pelo fechamento rápido de uma válvula ou pela parada repentina de uma bomba. Nesse caso, por ser uma adutora por gravidade a maior preocupação fica exatamente em relação ao tempo de fechamento das válvulas.

Com isso, foram gerados cenários com diferentes tempos de fechamentos de válvulas a jusante e a montante dos reservatórios, necessárias para possíveis manutenções, tanto da adutora quanto dos reservatórios, avaliando o comportamento das subpressões e sobrepressões geradas na tubulação.

No primeiro cenário proposto, que foi o fechamento de 30s da válvula a jusante, ficou evidenciado que foram geradas subpressões no primeiro terço da

tubulação, mas que apesar disso os valores obtidos não foram muito altos, ficando na casa dos – 6,8 m.c.a., o que para o ferro fundido seria um valor aceitável, entretanto ficaria longe da recomendação da norma, que é de -2 m.c.a. Foram observados também picos de sobrepressão de forma ascendente em direção ao RAD 400 m³, porém pressões que não causariam preocupações para o material utilizado, ficando na casa dos 150 m.c.a., muito abaixo do limite do material. Com isso foram geradas simulações com maiores tempos de fechamento de válvula a jusante, conseguindo diminuir as subpressões para um valor de -1,91 m.c.a. com sobrepressão máxima de 143,81 m.c.a., com 180s de tempo de fechamento, ficando assim em acordo com a recomendação da norma. Pode-se observar então, que muitas vezes não há necessidade de equipamentos de proteção para mitigar as pressões geradas na adutora, fica claro nas simulações feitas para o primeiro cenário.

Já no segundo cenário, fechamento de 60s da válvula a montante, o comportamento das pressões mudou, a sobrepressão máxima ficou na casa dos 32 m.c.a. no início da tubulação, enquanto que as subpressões atingiram -10 m.c.a. em vários pontos no primeiro terço da tubulação, diminuindo de forma ascendente nos dois terços finais. Entretanto, nesse cenário apenas o aumento do tempo de fechamento da válvula não foi efetivo, visto que mesmo com tempos muito altos 3600s (1h) os valores se mantinham, fazendo-se necessário dessa vez a adição de ventosas ou válvulas de admissão e saída de ar como equipamentos de proteção. Foram adicionadas 11 ventosas em pontos críticos da adutora, o que tornou possível atingir a subpressão de -1,98 m.c.a. mantendo a sobrepressão em 32 m.c.a. com o um fechamento de válvula de 240s. O que mostra que nem sempre apenas o atraso no fechamento de uma válvula se faz eficiente para atenuar as pressões geradas.

O terceiro cenário foi realizando observando o comportamento gerado pelo fechamento de 7200s (2h) simultâneo das válvulas de montante e jusante. Assim como no segundo cenário, as subpressões atingiram -10 m.c.a. em apenas 3 pontos, diminuindo também de forma ascendente nos terços finais como no segundo cenário, com sobrepressão na casa dos 73 m.c.a. Pelo comportamento muito parecido com o segundo cenário, optou-se logo por adicionar ventosas como equipamento de proteção, só que numa quantidade menor, visto que haviam menos pontos atingindo a subpressão de -10 m.c.a. Foram adicionadas então 5 ventosas nos pontos críticos inicias da adutora, o que se fez possível diminuir as subpressões para -1,57 m.c.a.

com sobrepressões na casa dos 122 m.c.a., ficando assim dentro das recomendações da norma e do limite do material.

Todas as simulações foram realizadas no intuito de encontrar formas de abrandar os efeitos das pressões negativas e positivas, seja através do retardo no fechamento de válvula, buscando sempre o fechamento mais rápido, seja utilizando equipamentos de proteção, as mantendo dentro do limite sugerido pela Norma Brasileira NBR 12215-1/2017 de forma a evitar ou diminuir drasticamente qualquer tipo de dano ou risco à tubulação, que prejudicaria o abastecimento de água a cidade.

7 CONCLUSÃO

Os resultados gerados foram satisfatórios e condizentes com a realidade, quando aplicamos algum tipo de proteção seja por um equipamento de proteção propriamente dito, quanto com o aumento do tempo de fechamento de uma válvula ao sistema os impactos do golpe são mitigados de forma a atender as recomendações de norma e os limites do próprio material.

Entretanto pela falta de alguns dados e algumas considerações necessárias para alimentar o programa, os resultados dão apenas uma ideia do comportamento das pressões numa adutora por gravidade, tendo uma validade mais acadêmica e de suporte a estudos futuros.

Como recomendação a futuros estudos na área, pode-se realizar a confecção de um gráfico relacionando o tempo de fechamento da válvula com a variação de pressão em pontos críticos da adutora, podendo ainda criar uma equação para a curva gerada, a análise com outros tipos de materiais ou equipamentos de proteção como também o estudo dos custos das variadas formas de proteção.

Adutoras necessitam de manutenções eventuais, por isso é de suma importância entender o que acontece na tubulação quando uma válvula se fecha em determinado tempo, para que se proteja a tubulação caso seja necessário, ou que o fechamento de uma válvula para manutenção não gere mais problemas a serem resolvidos.

8 REFERÊNCIAS

AMOAH, S. O. K., ELBASHIR, M. A. M. Hydraulic Transient in a Pipeline Using Computer Model to Calculate and Simulate Transient. Master of Science Thesis in Water Resources. Division of Water Resources Engineering - Department of Building and Environmental Technology – Lund University – Sweden. January 2007.

ANA, NOTA TÉCNICA Nº 3/2022 - Parâmetros de cálculo do Sistema Federal de Regulação de Usos – Regla para a finalidade Abastecimento Público – 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15750: Tubulações de PVC-O (cloreto de polivinila não plastificado orientado) para sistemas de transporte de água ou esgoto sob pressão — Requisitos e métodos de ensaios.** Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5647: Sistemas para adução e distribuição de água – Tubos e conexões de PVC 6,3 com junta elástica e com diâmetros nominais até DN 100 – Requisitos.** Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7665: Sistemas para adução e distribuição de água – Tubos de PVC 12 DEFOFO com junta elástica – Requisitos.** Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-12214 NB 590: Projeto de sistema de bombeamento de água para abastecimento público.** Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-12214: Projeto de estação de bombeamento ou de estação elevatória - Requisitos.** Rio de Janeiro, 2020 – Segunda edição.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-12215-1: Projeto de adutora de água. Parte 1: Conduto forçado.** Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-12218: Projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público - Procedimento.** Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-7675: Tubos e conexões de ferro dúctil e acessórios para sistemas de adução e distribuição de água – Requisitos.** Rio de Janeiro, 2005.

BERMO: A company of the ARI-Armaturen Group. Blumenau, c 2024. Disponível em: https://blog.bermo.com.br. Acesso em: 6 nov. 2024.

BOULOS, P. F. **Hydraulic Transient Guidelines for Protecting Water Distribution Systems**. 2005. Peer-Reviewed. 97:5. Journal AWWA. May 2005.

CARVALHO, Raphael Costa. Estudo Numérico do Problema do Golpe de Aríete em Tubulações. 2018. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

CASTRO, M. A. H., & SANTOS, R. M. N. (2001). **Modelagem Computacional do Golpe de Aríete em Adutoras.**

COUTINHO, Fernanda; MELLO, Ivana L.; SANTA MARIA, Luiz C. de. Polyethylene: main types, properties and applications. **Polímeros**, v. 13, p. 01-13, 2003.

DULONG. [*S.l.*]. c 2024. Disponível em: https://dulong.com.br/blog/golpe-de-ariete/#:~:text=O%20Golpe%20de%20Aríete%20pode,de%20danificar%20bombas%20e%20motores. Acesso em: 06 nov. 2024.

FARIA, Ítalo Meireles. **Desenvolvimento de modelo computacional para simulação de Transiente Hidráulico em Linhas de Recalque**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2020.

ITA. *Universitat Politècnica de València, ALLIEVI Manual Técnico, Versión 3.0.0*; ITA: València, Spain, 2018 del Teso, R.; Gómez, E.; Estruch-Juan, E.; Soriano, J.

ALLIEVI as a Tool for Simulating Hydraulic Transients in Energy Recovery Systems. *Eng. Proc.* **2024**, *69*, 131. https://doi.org/10.3390/engproc2024069131

LAHLOU, Z. Michael. **Golpe de Ariete**. **Tecnología en breve**, p. 1-4, 2009.
MAGALHÃES, Cláudio Henrique Milfont de. Tubos e dispositivos de segurança utilizados para minimizar os efeitos dos transientes hidráulicos em adutoras. / Cláudio Henrique Milfont de Magalhães - 2018.

MARIANO, João Carvalho. **Adutoras puras e mistas: análise técnico-económica**. 2014. Tese de Doutorado.

MASIERO JUNIOR, Pedro Antonio. Análise de transientes hidráulicos em uma adutora utilizando o método das características. 2008.

MICHAL, Kubrak. "**Water hammer mitigation by internal rubber hose**" *Archives of Civil Engineering*, vol. 70, Art. no. 1, 2024, doi: 10.24425/ace.2024.148911.

NETTO, A. **Manual de Hidráulica. 9ª edição**, Blucher. São Paulo/SP. 2018.

População estimada: IBGE, Diretoria de Pesquisas, Coordenação de População e Indicadores Sociais, Estimativas da população residente com data de referência 1o de julho de 2024

PORTO, R. M. **Hidráulica básica. 4ª edição.** São Carlos/SP. 2006.

Resolução nº 11.135 de 19 de dezembro de 1997. Conselho Deliberativo da SUDENE. Divisão Político-Administrativa do Estado da Bahia. SEI, Versão - 30 de Junho de 2015

SANTANA, Maria Clara Nascimento. Análise dos transientes hidráulicos em uma adutora localizada no município de Vicência-PE utilizando o software ALLIEVI / Maria Clara Nascimento Santana. - 2018.

SILVA, Pedro Alves; DE MORAES, Alisson Gomes; FRANÇA, Francis Valter Pêpe. I-204-ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE MATERIAIS DE TUBULAÇÃO PARA CONSTRUÇÃO DE REDES ADUTORAS DE ÁGUA. 2017.

SOBRINHO, P. A.; TSUTIYA, M. T. **Coleta e Transporte de Esgoto Sanitário**. 2ª edição. Editora Escola Politécnica. São Paulo, 2000.

VLASE, Sorin et al. Study on the mechanical responses of plastic pipes made of high density polyethylene (HDPE) in water supply network. **Applied Sciences**, v. 10, n. 5, p. 1658, 2020.