

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ESTUDO PARA REDUÇÃO DOS EFEITOS DO GOLPE DE ARÍETE NO
CARREGAMENTO DE VAGÃO TANQUE COM DIESEL S10

por

Gustavo Trindade Iserhardt

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, Novembro de 2021

Iserhardt, Gustavo Trindade
ESTUDO PARA REDUÇÃO DOS EFEITOS DO GOLPE DE ARIETE
NO CARREGAMENTO DE VAGÃO TANQUE COM DIESEL S10 /
Gustavo Trindade Iserhardt. -- 2021.
21 f.
Orientador: Sergio Viçosa Möller.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto
Alegre, BR-RS, 2021.

1. Golpe de Ariete. 2. Transiente Hidráulico. 3.
Módulo de Elasticidade de derivados de petróleo. I.
Möller, Sergio Viçosa, orient. II. Título.

Gustavo Trindade Iserhardt

ESTUDO PARA REDUÇÃO DOS EFEITOS DO GOLPE DE ARÍETE NO
CARREGAMENTO DE VAGÃO TANQUE COM DIESEL S10

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Cirilo Seppi Bresolin
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Energia e Fenômenos de Transporte/Processos de
Fabricação/Mecânica dos Sólidos

Orientador: Sergio Viçosa Möller

Comissão de Avaliação:

Prof^a. Thamy Hayashi

Prof. Fernando Pereira

Prof. Paulo Schneider

Porto Alegre, Novembro de 2021

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus por ter me sustentado até aqui.

Agradeço à minha família e noiva por me auxiliarem em todas as etapas percorridas na graduação.

Aos meus colegas de trabalho por todo o suporte e auxílio na produção desse estudo.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul por toda estrutura e incentivo.

E a todos os professores do curso de Engenharia Mecânica.

Iserhardt, Gustavo Trindade. **Estudo para a redução dos efeitos do golpe de aríete no carregamento de vagão tanque com Diesel S10**. 2021. 21. Monografia de Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo propor soluções para reduzir os efeitos do golpe de aríete em um sistema hidráulico real de carregamento de vagão tanque e contribuir para o campo de estudo de transientes hidráulicos com fluidos derivados de petróleo. O sistema hidráulico é composto por uma válvula de autorização, uma válvula pneumática de fechamento rápido, uma bomba centrífuga e são consideradas juntas de papelão hidráulico. Foi criada uma sistemática utilizando o equacionamento para determinar a celeridade, período da tubulação, sobrepessão do sistema e a possibilidade de ocorrência do golpe de aríete. Com os parâmetros necessários obtidos, foram então propostas soluções para mitigar os efeitos do golpe nas válvulas, bomba e flanges com juntas de papelão hidráulico.

PALAVRAS-CHAVE: Golpe de aríete, Módulo de elasticidade de derivados de petróleo, Transiente hidráulico.

Iserhardt, Gustavo Trindade. **Study to reduce the effects of water hammer phenomenon in wagon loading with S10 Diesel**. Mechanical Engineering End of Course Monography – Mechanical Engineering degree, The Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

ABSTRACT

The goal of this study is to offer solutions to reduce the effects of water hammer phenomenon in a real hydraulic system of wagon loading and contribute to the hydraulic transients with petroleum products field of study. The hydraulic system is composed of an authorization valve, a high speed closing pneumatic valve, a centrifugal pump and hydraulic cardboard gaskets are considered. A systematic of existent equations was created to determine the celerity, pipe period and increase of pressure after the water hammer phenomenon. After the required parameters were obtained, solutions to mitigate the effects of the water hammer in the valves, pump, and hydraulic cardboard gaskets were recommended.

KEYWORDS: Water hammer phenomenon, hydraulic transients, bulk modulus of petroleum products.

NOMENCLATURA

Símbolos

a	Celeridade	[m/s]
c	Constante numérica	
d	Diâmetro interno do tubo	[mm]
D	Diâmetro externo do tubo	[mm]
dP/dV	Derivada parcial da pressão em relação ao volume	
e	Espessura do tubo	[mm]
E	Módulo de Young do material	[GPa]
g	Aceleração da gravidade	[m/s ²]
h	Sobrepessão	[mca]
K	Módulo de elasticidade do fluido (<i>Bulk modulus</i>)	[GPa]
L	Comprimento do tubo	[m]
λ	Coefficiente de segurança	
P_{max}	Pressão máxima de trabalho para o tubo	[kgf/cm ²]
ρ	Massa específica do fluido	[kg/m ³]
R_t	Resistência à tração do material do tubo	[kgf/cm ²]
t_c	Tempo de fechamento da válvula	[s]
T	Período da tubulação	[s]
v	Velocidade média de escoamento	[m/s]
V	Volume	[m ³]
ν	Coefficiente de Poisson do material	

Abreviaturas e acrônimos

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANP	Agência Nacional de Petróleo
AISI	American Iron and Steel Institute
NBR	Norma Brasileira
NR	Norma Regulamentadora

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. FUNDAMENTAÇÃO	2
2.1. GOLPE DE ARÍETE	2
2.2. BULK MODULUS OU ELASTICIDADE VOLUMÉTRICA	2
2.3. CARREGAMENTO DE VAGÃO TANQUE	3
2.4. DIESEL S10.....	4
3. METODOLOGIA.....	4
3.1. DESCRIÇÃO DO SISTEMA HIDRÁULICO	4
3.1.1. Tubulação	5
3.1.2. Válvula de autorização	5
3.1.3. Válvula pneumática.....	6
3.1.4. Bomba	7
3.1.5. Junta de papelão hidráulico	7
3.2. MÉTODO DE CÁLCULO	7
3.2.1. Celeridade	7
3.2.2. Período da tubulação	8
3.2.3. Sobrepressão	8
3.2.4. Pressão máxima de trabalho para tubos	8
4. RESULTADOS	8
5. CONCLUSÃO.....	11
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	12

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, 21% de todo transporte de cargas é feito através do modal ferroviário e, apesar do grande volume que é carregado pelas malhas ferroviárias, o Brasil ainda conta com uma infraestrutura arcaica instalada na década de 1970. Entende-se por essa infraestrutura desde os vagões que foram herdados da Argentina até os equipamentos, válvulas e bombas utilizadas na operação de carregamento de vagão tanque (ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTES FERROVIÁRIOS, 2020).

Toda a operação de carregamento de um tanque com combustíveis inflamáveis, seja rodoviário ou ferroviário, é extremamente crítica por se tratar de um líquido altamente explosivo e com baixo ponto de fulgor, a gasolina tem ponto de fulgor de $-43\text{ }^{\circ}\text{C}$ aproximadamente. Por se tratar de uma operação com alto risco, diversas barreiras de segurança devem ser estabelecidas a fim de evitar acidentes com explosões ou derrames que afetam o meio ambiente, respeitando as normas da ANP e NR 13 e 20.

Devido à infraestrutura para carregar vagões com combustíveis inflamáveis ser relativamente antiga em todas as varejistas de derivados de petróleo, alguns acidentes podem ocorrer por falhas nos equipamentos, como por exemplo, golpes de aríete.

“O golpe de aríete ou martelo hidráulico é causado pela propagação e reflexão de ondas acústicas em um líquido confinado, por exemplo, quando uma válvula é bruscamente fechada em uma tubulação. O ruído resultante pode ser similar ao da batida de um martelo em um tubo, daí a origem do termo” (FOX et al., 2010).

Acidentes ocasionados por golpes de aríete costumam ser devastadores, podendo causar, além de extremos danos materiais e vazamentos de resíduos para o meio ambiente, lesões e eventuais fatalidades. Como no caso do acidente ocorrido na usina hidrelétrica de Sayano-Shushenskaya, na Rússia em 2009, devido à falha de uma das turbinas causada por um erro operacional, deixando 69 vítimas fatais e três desaparecidos (POWERMAG, 2010). Outro incidente ocasionado por golpe de aríete ocorreu no Laboratório Nacional de Brookhaven, nos Estados Unidos em 1986, devido a um erro operacional ao manejar uma válvula de alívio, deixando 2 vítimas fatais e outras duas com ferimentos graves (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2006).

Golpes de aríete podem ocorrer em carregamento de vagão, pois em caso de emergência as válvulas devem ser rapidamente fechadas para interromper o fluxo de produto em vazão elevada, evitando possíveis contaminações ou derrames. As empresas do ramo sofrem com acidentes causados por golpes de aríete que geram derrames de milhares de litros de derivados de petróleo.

Atualmente existem poucos artigos publicados estudando o efeito do golpe de aríete com derivados de petróleo, porém foram encontrados diversos trabalhos sobre o efeito em dutos de água e gases e os melhores métodos para cálculo de sobrepressão. Em um estudo relevante foram estudados o fenômeno do golpe de aríete e os métodos de previsão mais utilizados. Foi modelado computacionalmente um sistema hidráulico composto por dois reservatórios de água, um a montante e outro a jusante e uma válvula. Os reservatórios eram conectados por um tubo retilíneo e foram calculados os valores de sobrepressão para os casos de fechamento rápido e lento da válvula. Por fim, os valores encontrados pelo método computacional são comparados com os encontrados pelas expressões clássicas a fim de verificar a confiabilidade de cada um deles (ESTEVES, 2018).

Outro estudo relevante para o assunto propõe um método alternativo para a estimativa da elasticidade volumétrica de diferentes tipos de diesel. No estudo foram testados três tipos de diesel: diesel comercial com 5,8% de biodiesel, um diesel orgânico derivado da soja e um diesel orgânico hidrodesulfurizado. Todas as medições foram realizadas a uma temperatura

de 38°C e foram obtidos valores variando a pressão de trabalho do fluido entre 3 a 33 MPa. Por fim foi obtida uma correlação otimizada para prever a elasticidade volumétrica de acordo com a pressão de trabalho (LAPUERTA et al., 2011). É importante encontrar uma forma assertiva de determinar a elasticidade volumétrica do diesel, pois é parâmetro fundamental para cálculo da celeridade e conseqüentemente da sobrepressão no sistema e esses valores variam de acordo com a composição do diesel que está sendo utilizado e a quantidade de biodiesel que é adicionada na mistura.

O presente trabalho tem a motivação de estudar o fenômeno do golpe de aríete em uma tubulação de Diesel S10 em um terminal de distribuição de derivados de petróleo, além de propor soluções para controlar ou mitigar possíveis golpes de aríete a fim de aumentar a segurança nas operações, proteger a integridade física dos operadores envolvidos e evitar derrames de derivados de petróleo.

2. FUNDAMENTAÇÃO

2.1. GOLPE DE ARÍETE

Em escoamentos com alta velocidade, o fechamento súbito de uma válvula, turbina ou até mesmo a parada brusca de uma bomba produzem efeitos dinâmicos conhecidos como transiente hidráulico ou golpe de aríete (LOMBARDI, 2005). Esse fenômeno é caracterizado por:

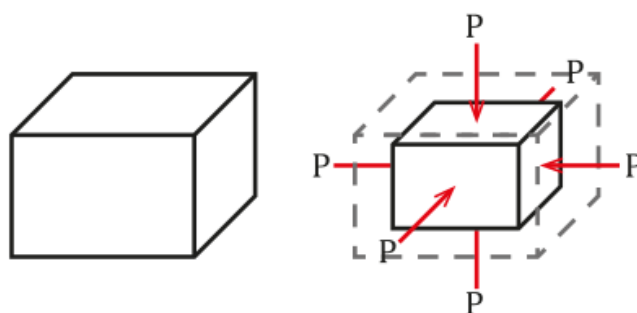
- Um aumento de pressão a montante da válvula que é fechada subitamente causado pela da inércia do fluido. Devido à parada brusca, parte da energia cinética do fluido é convertida em energia de pressão, gerando um trabalho de compressão no fluido e de deformação nas paredes da tubulação. Esse fenômeno gera uma onda de pressão que se propaga com uma velocidade igual à velocidade do som no meio (chamada celeridade) ao longo do duto (LÜDECKE; KOTHE, 2006).
- Uma súbita queda de pressão à jusante da válvula que produz uma onda de baixa pressão. Se as condições forem favoráveis (baixa pressão e baixo tempo de fechamento da válvula) uma bolsa de vapor pode ser formada que eventualmente entrará em colapso gerando uma segunda onda de pressão.

Entender a capacidade dos materiais de se expandirem e contraírem é fundamental para compreender o fenômeno do golpe de aríete. A intensidade desses movimentos depende da sobrepressão que é aplicada, gerando uma tensão interna no material que é propagada para as paredes dos dutos (GOLDMAN, 1953).

2.2. BULK MODULUS OU ELASTICIDADE VOLUMÉTRICA

O módulo de massa (*bulk modulus*) pode ser definido como a capacidade do material de ser resistente à compressão. Chamado de módulo de elasticidade volumétrica, é inversamente proporcional à compressibilidade é uma propriedade de qualquer material, mas geralmente é utilizada para descrever o comportamento de fluidos (HELMENSTINE, 2021). O fluido deforma-se em todas as direções como resultado de uma carga que é aplicada de todas as direções, como mostrado na Figura 1.

Figura 1 – Representação da elasticidade volumétrica.



Fonte: Wikimedia, 2018.

O módulo de elasticidade é parâmetro fundamental para cálculo da sobrepressão no golpe de aríete. O módulo de elasticidade é uma constante e é definido pela letra K , em GPa, é dado pela Equação 1.

$$K = \frac{v \partial P}{\partial v} \quad (1)$$

com V sendo o volume inicial (m^3), $\partial P / \partial V$ a derivada parcial da pressão em relação ao volume.

O módulo de elasticidade pode variar de acordo com a temperatura do fluido e a pressão de trabalho (LAPUERTA, 2011). Para fins de cálculo, nesse estudo foram utilizados os parâmetros para o diesel a uma temperatura de 38°C e pressão de $6,9 \text{ MPa}$, com um valor de $K=1,477 \text{ GPa}$. Valores do módulo de elasticidade para diferentes materiais podem ser vistos na tabela 1.

Tabela 1 – Valores do módulo de elasticidade para diferentes materiais.

Material	Módulo de Elasticidade (GPa)	Fonte
Água	2,2	(FOX et al., 2010)
Aço	160	(FOX et al., 2010)
Óleo Mineral	1,8	(FOX et al., 2010)
Mercúrio	28,5	(FOX et al., 2010)
Diesel (a $6,9 \text{ MPa}$ e 38°C)	1,477	(LAPUERTA, 2011)
Diamante	443	(FOX et al., 2010)
Gasolina	1,3	(HELMENSTINE, 2021)

Foi entrado em contato com um engenheiro responsável da Petrobrás para verificar a disponibilidade do dado de bulk modulus para diferentes composições de diesel S10 com adição de biodiesel, porém foi informado que este dado não estava disponível, já que quem realiza a adição de biodiesel na composição são as empresas distribuidoras (PETROBRAS, 2012). O engenheiro responsável sugeriu a utilização de uma dissertação, como fonte de dados alternativa, na qual o autor realiza um estudo sobre a variação da densidade do diesel S10 de acordo a variação da temperatura e da quantidade de biodiesel adicionada, como pode ser visto na Tabela 2 (SILVA, 2013).

Tabela 2 – Valores da densidade para o sistema biodiesel + diesel S10 a diferentes composições e temperaturas

Composição	$\rho / \text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$					
	10 °C	20 °C	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C
B0	0,843633	0,836650	0,829646	0,822627	0,815602	0,808582
B2	0,844448	0,837442	0,830428	0,823400	0,816366	0,809325
B5	0,845615	0,838603	0,831577	0,824542	0,817499	0,810426
B10	0,848300	0,841400	0,834500	0,827400	0,820400	0,813300
B20	0,851929	0,844873	0,837810	0,830732	0,823656	0,816580
B30	0,856336	0,849260	0,842167	0,835068	0,827963	0,820837
B40	0,860865	0,853751	0,846633	0,839505	0,832377	0,825252
B50	0,865531	0,858387	0,851236	0,844081	0,836931	0,829792
B60	0,870307	0,863132	0,855957	0,848773	0,841597	0,834435
B70	0,874650	0,867446	0,860243	0,853036	0,845840	0,838669
B80	0,879169	0,871944	0,864717	0,857488	0,850263	0,843023
B90	0,883857	0,876598	0,869341	0,862090	0,854848	0,847609
B100	0,888585	0,881302	0,874018	0,866741	0,859466	0,852175

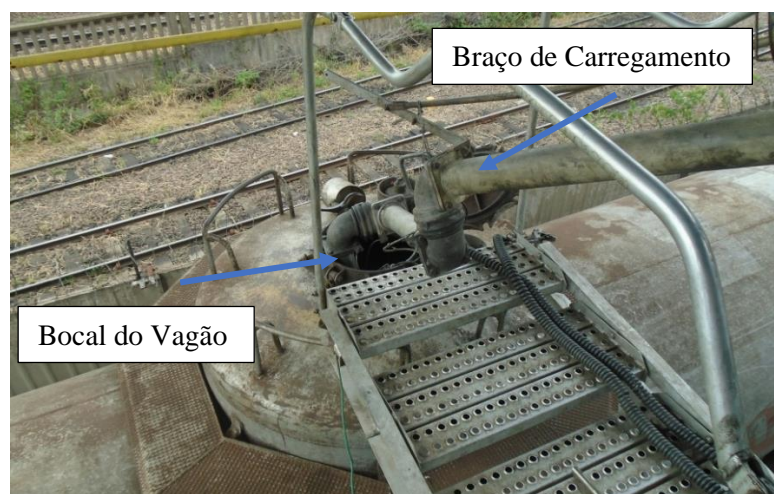
Fonte: SILVA (2013)

A interferência da variação da temperatura e composição no valor da densidade e consequentemente do bulk modulus são abordados nos Resultados.

2.3. CARREGAMENTO DE VAGÃO TANQUE

O carregamento de vagão tanque é uma operação comum em empresas varejistas de derivados de petróleo, produtos químicos e terminais de distribuição. O carregamento é realizado por um braço colocado dentro do vagão até o fundo, para evitar a formação de vapor de combustível, pelo bocal superior do vagão (carregamento *top loading*) e então o combustível é escoado para dentro do vagão, de acordo com a Figura 2.

Figura 2 – Carregamento de Vagão Tanque



2.4. DIESEL S10

O óleo Diesel é o combustível mais utilizado no Brasil, produto do refino do petróleo através da destilação fracionada. É constituído basicamente de hidrocarbonetos e contém baixas concentrações de enxofre, oxigênio e nitrogênio. É um líquido inflamável, com baixo ponto de fulgor (38 °C), utilizado em motores ciclo Diesel por possuir poder calorífico maior do que outros combustíveis comerciais (AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO, 2010).

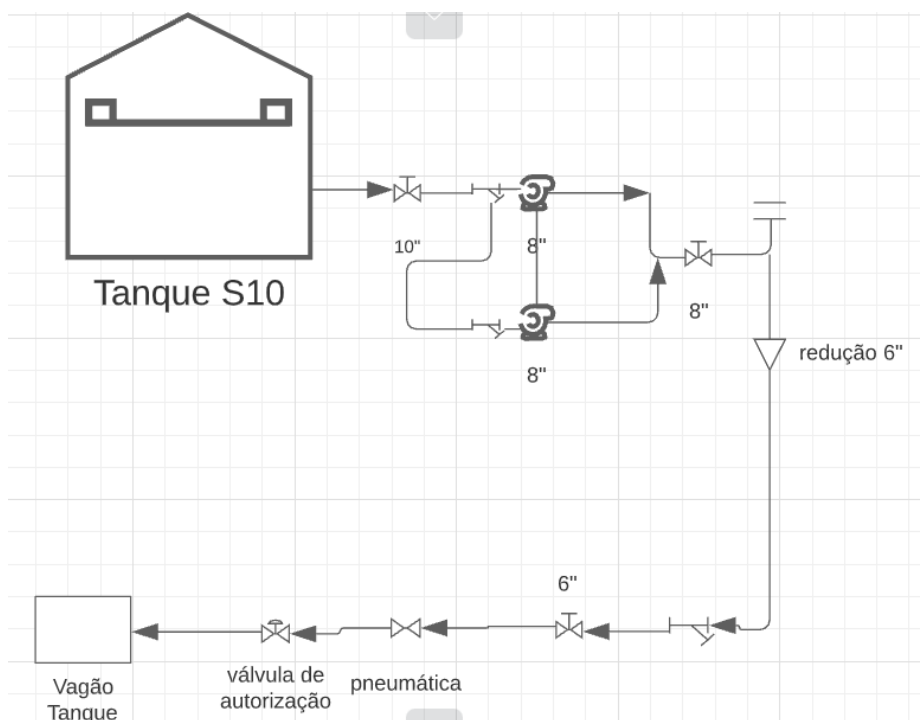
A sigla para Diesel S10 refere-se à quantidade de enxofre presente na composição, o S10 indica que há 10 partes de enxofre por milhão, diferentemente do Diesel comum, chamado de S500 que possui 500 partes de enxofre por milhão. A utilização do Diesel S10 é recomendada para veículos fabricados após 2012 por apresentarem menor resistência a maiores quantidades de enxofre, já que o excesso de enxofre pode causar a corrosão das peças, danificando o motor precocemente. O Diesel S10 possui uma massa específica que varia entre 815 a 850 kg/m³.

3. METODOLOGIA

3.1. DESCRIÇÃO DO SISTEMA HIDRÁULICO

O sistema hidráulico a ser estudado está presente em um terminal de distribuição de derivados de petróleo. É composto por tubulações de diesel S10, uma bomba, válvula autorizadora, válvulas de gaveta e válvula pneumática os quais são descritos nas subseções seguintes. O fluxograma de válvulas com o detalhamento dos componentes pode ser visto na Figura 3.

Figura 3 – Fluxograma de válvulas do sistema hidráulico a ser estudado



O fluxograma foi elaborado com a utilização do pacote LucidChart ® e respeitando a convenção da norma vigente ABNT (NBR 8190).

3.1.1. Tubulação

A linha de dutos de S10 do sistema hidráulico a ser estudado é feita por tubulações de aço carbono galvanizadas AISI 1020 “Schedule” 40 conforme norma NBR 5590. As propriedades e os parâmetros utilizados nos cálculos foram obtidos na literatura constante nas referências e podem ser vistos na Tabela 3.

Tabela 3 – Parâmetros e propriedades das tubulações de S10

Parâmetro	Valor	Fonte
Comprimento	500 m	
Diâmetro externo	6”	
Espessura da parede (NBR 5590)	7,11 mm	(NBR 5590)
Módulo de Young	200 GPa	(ESTEVES, 2018)
Coefficiente de Poisson	0,3	(ESTEVES, 2018)
Pressão interna	3,5 kgf/cm ²	
Resistência à tração	420 MPa	(TELLES, 1999)

O comprimento utilizado para cálculo foi considerado apenas no trecho de 6”, pois os trechos com diâmetros diferentes representam menos de 1% do trecho total e não possui nenhuma válvula de retenção. O comprimento total é considerado a partir do recalque da bomba até a última tomada de vazão da plataforma de carregamento, uma aproximação pode ser vista na imagem gerada pelo site Google Maps, apresentada na Figura 4.

Figura 4 – Comprimento e posição das tubulações



Fonte: Google Maps.

3.1.2. Válvula de autorização

A válvula de autorização utilizada no sistema hidráulico a ser estudado é um modelo de válvula de controle auto-operada através do acionamento de dois solenoides responsáveis por controlar a vazão do fluido, controlando a abertura e fechamento de um pistão. O modelo utilizado é produzido pelo fabricante Metalúrgica Ribeiro, modelo VA 150, opera com uma vazão mínima de 15 m³/h, uma vazão máxima de 150 m³/h, pressão máxima de trabalho de 10,5 kgf/cm² e tempo de fechamento de 0,6 segundos, podendo ser vista na Figura 5.

Figura 5 – Válvula de autorização



A válvula de autorização controla a vazão e a passagem do produto na operação de carregamento de vagão tanque. Possui um solenoide que controla a abertura para vazão baixa de 400 l/min (24 m³/h) e outro solenoide para vazão alta de 2000 l/min (120 m³/h). Ao final do carregamento ambos os solenoides são desmagnetizadas, fechando o pistão interno e interrompendo o fluxo de produto. O tempo de fechamento precisa ser baixo para evitar transbordos, possíveis derrames ou contaminação de produto.

3.1.3. Válvula pneumática

A válvula pneumática utilizada no sistema hidráulico é uma válvula de gaveta de fechamento rápido atuada por um controlador pneumático. Tem sua função exclusiva de interromper o fluxo de produto em caso de emergência e é acionada pela botoeira de emergência. A válvula fica posicionada antes da válvula de autorização, conforme pode ser visto no fluxograma da Figura 3. A válvula e sua montagem no sistema podem ser vistos na Figura 6.

Figura 6 – Válvula de gaveta pneumática



3.1.4. Bomba

A bomba utilizada no sistema é do tipo centrífuga, produzida pelo fabricante KSB, modelo MCPK150-125-315EC, vazão máxima de 240 m³/h e altura manométrica de 51 mca. A bomba e sua montagem no sistema podem ser vistos na Figura 7.

Figura 7 – Montagem da bomba no sistema



O sistema conta com duas bombas montadas em paralelo que alternam seu funcionamento a cada operação de carregamento a fim de não sobrecarregar nenhuma delas.

3.1.5. Junta de papelão hidráulico

As montagens de flanges em tubulações requerem a instalação de elementos de vedação chamados juntas. Flanges de tubulações sempre precisam ser acompanhados de um elemento de vedação chamado junta. Essa junta pode ser produzida de diversos materiais, mas geralmente é feita de papelão hidráulico quando utilizada em tubulações de hidrocarbonetos. As juntas utilizadas são da fabricante Teadit e admitem uma pressão máxima de trabalho de 50 bar. Como a pressão na linha pode atingir valores próximos a esse limite no caso de um golpe de aríete, as juntas tornam-se pontos críticos e devem receber atenção no projeto.

3.2. MÉTODO DE CÁLCULO

3.2.1. Celeridade

Para TSUTIYA (2006) a celeridade é definida como a velocidade de propagação da onda de pressão no meio ao longo do tubo. Esse parâmetro depende tanto do fluido que está escoando quanto da geometria e material do tubo e é essencial para cálculo da sobrepressão. A celeridade a , em m/s, pode ser calculada para qualquer material de tubo e qualquer fluido escoando pela Equação 2.

$$a = \sqrt{\frac{1}{\rho \left(\frac{1}{K} + \frac{D \cdot c}{e \cdot E} \right)}} \quad (2)$$

na qual ρ é a massa específica do fluido (kg/m³), K é o *bulk modulus* ou módulo de elasticidade do fluido (GPa), D é o diâmetro externo do tubo (m), c é uma constante numérica que depende do coeficiente de Poisson ν do material do tubo, da geometria e das restrições, e é a espessura do tubo (m) e E é o módulo de Young do material do tubo (GPa). Os valores da constante c podem ser vistos na Tabela 3.

Tabela 3 – Valores da constante c

Tipo de tubulação	Valor da constante c
Tubulação presa rigidamente em uma extremidade	$c = 1 - \frac{v}{2}$
Tubulação ancorada, axialmente rígida	$c = 1 - v^2$
Tubulação com juntas de expansão	$c = 1$

Fonte: Esteves, 2018.

3.2.2. Período da Tubulação

Quando se trata acerca do controle do golpe de aríete, a primeira hipótese que deve ser considerada é a possibilidade de se aumentar o tempo de fechamento da válvula. As válvulas devem ser operadas a fim de evitar um fechamento rápido. O golpe acontecerá apenas se o tempo de fechamento t_c informado para o modelo da válvula, em segundos, for menor do que o período da tubulação T , em segundos, descrito nas Equações 3 e 4.

$$T = \frac{2L}{a} \quad (3)$$

$$T > t_c \quad (4)$$

em que L é o comprimento da tubulação (m) e a , a celeridade (m/s). A expressão $2L/a$ define o período T da tubulação.

3.2.3. Sobrepressão

A sobrepressão, causada pelo fechamento rápido de uma válvula, é relacionada com o tempo de fechamento através da equação de Michaud-Vensano. A sobrepressão h , em mca, pode ser calculada pela Equação 5.

$$h = \frac{2Lv}{gt_c} \quad (5)$$

Em que L é comprimento da tubulação (m), v é a velocidade média de escoamento do fluido (m/s), g é a aceleração da gravidade (m/s²) e t_c é o tempo de fechamento determinado de fábrica para o modelo da válvula (s). A pressão total interna aplicada na tubulação será dada pela velocidade do som entre a sobrepressão e a pressão de operação nominal do duto.

3.2.4. Pressão máxima de trabalho para tubos

De acordo com TELLES (1999) a pressão interna máxima de tubo é função de sua resistência à tração. A pressão interna máxima P_{max} , dada pela equação em kgf/mm², pode ser calculada pela Equação 6.

$$P_{max} = \frac{R_t(D^2 - d^2)}{\lambda(D^2 + d^2)} \quad (6)$$

na qual R_t é a resistência a tração do material do tubo (kgf/mm²), D é o diâmetro externo do tubo (mm), d é o diâmetro interno do tubo (mm) e λ é o coeficiente de segurança conforme norma. O cálculo da pressão máxima é utilizado para verificar quão próximo a pressão total do tubo se aproximaria de um ponto crítico em caso de golpe de aríete.

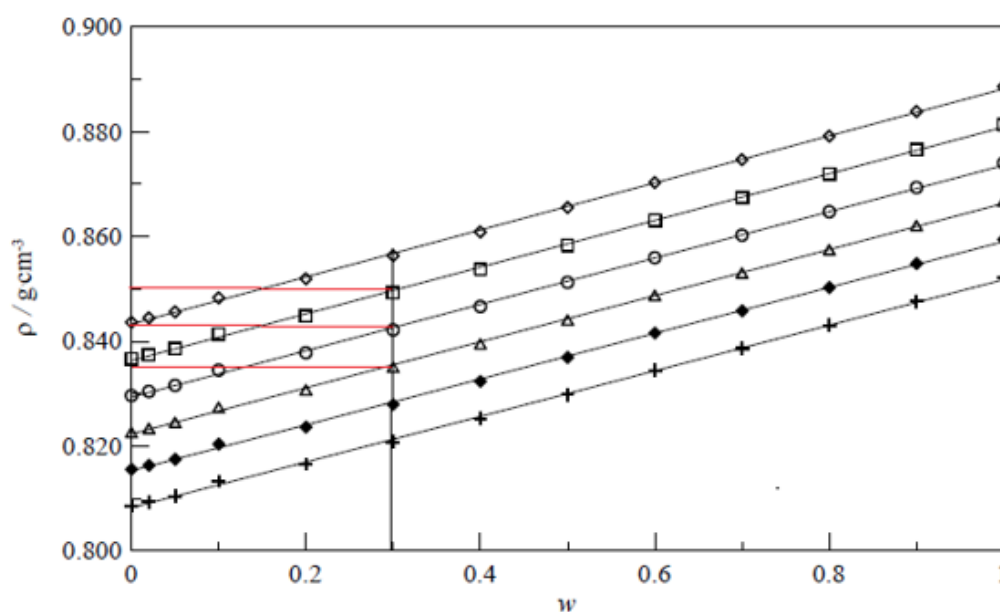
4. RESULTADOS

Para propor as devidas soluções para mitigar o golpe de aríete no sistema hidráulico estudado, deve-se começar calculando a celeridade do sistema. Através da Equação 2 e

utilizando os dados dos materiais das Tabelas 2 e 3 foi possível calcular a celeridade a do sistema, sendo $a = 1258,60$ m/s.

Para o diesel S10, uma variação de 10° C na temperatura produz uma variação de cerca de $6,7$ kg/m³ na massa específica, de acordo com a Tabela 2. Ora, considerando-se a Eq. (2), vê-se que a celeridade a é inversamente proporcional ao inverso da raiz quadrada da massa específica. Portanto, para o mesmo material de tubo, uma variação de 10° C na temperatura do diesel produzirá uma variação de $0,42\%$ (5 m/s) na celeridade para mais ou para menos conforme a temperatura aumenta ou diminui (SILVA, 2013). A mesma análise é válida para a quantidade de biodiesel na composição, já que o incremento de 10% na quantidade de biodiesel produz uma variação de cerca de $3,6$ kg/m³ na massa específica, de acordo com a Tabela 2, portanto uma variação de 10% na quantidade de biodiesel produzirá uma variação de $0,23\%$ ($2,4$ m/s).

Figura 8 – Valores da densidade, em função da fração volumétrica de biodiesel, para o sistema biodiesel + diesel S10 a diferentes temperaturas: \diamond , 10° C; \square , 20° C; \circ , 30° C, Δ , 40° C; \blacklozenge , 50° C; $+$, 60° C.



Fonte: (SILVA, 2013)

É necessário, então, verificar se o período da tubulação será maior do que o tempo de fechamento da válvula, para validar a ocorrência de golpe de aríete no sistema. A condição pode ser verificada utilizando a Equação 3, uma vez que o tempo de fechamento é de $0,6$ segundos para ambas as válvulas (válvula pneumática e autorizadora), pois é o tempo de fechamento de fábrica para esses modelos de válvulas. Tem-se que o período da tubulação é de $0,8$ s, sendo maior do que o tempo de fechamento das válvulas, portanto ocorrerá golpe de aríete no sistema.

Depois de validada a condição de ocorrência de golpe de aríete, é necessário calcular a sobrepressão no sistema. O golpe ocorrerá quando o sistema estiver operando em vazão plena (2000 l/min) para os casos de fechamento de ambas as válvulas. Utilizando a Equação 4, com uma velocidade média de escoamento de $2,22$ m/s (vazão de 2000 l/min e tubo de $6''$ de diâmetro), obtém-se um valor de sobrepressão de $378,02$ mca ou $37,8$ kgf/cm². Esse valor de sobrepressão somado ao valor de pressão de trabalho interna do sistema, disponível na Tabela 1, resulta em uma pressão total de $41,3$ kgf/cm².

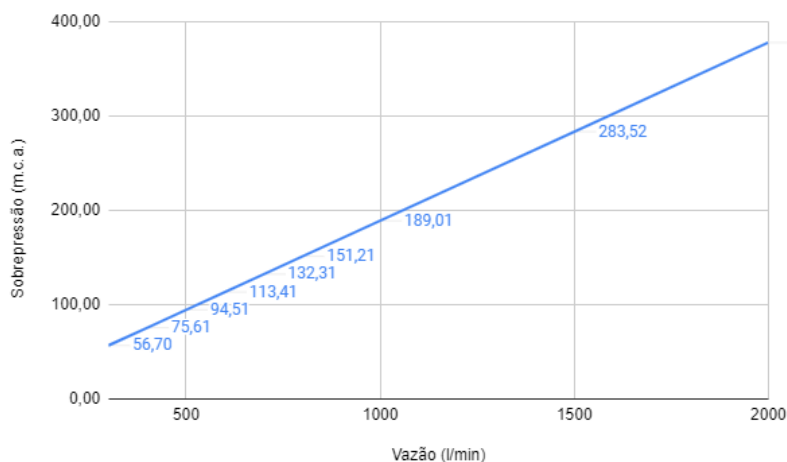
Para fins de comparação, é importante determinar o valor da pressão máxima admissível pela tubulação a fim de verificar a integridade do sistema após o golpe. A pressão

máxima pode ser obtida através da Equação 5 com os dados disponíveis na Tabela 1, sendo $P_{max} = 83,08 \text{ kgf/cm}^2$. Percebe-se que o valor da pressão total após o golpe corresponde a 50% da pressão máxima admissível para o sistema, garantindo a integridade dos dutos caso não existam pontos frágeis. Porém, os pontos mais críticos do sistema são os flanges que possuem juntas de papelão hidráulico, pois eles apresentam uma pressão máxima de trabalho de 50 bar (51 kgf/cm^2) e a pressão total do sistema após o golpe corresponde a 81% desse valor, tornando os flanges um ponto crítico para possíveis vazamentos.

Como evitar o golpe de aríete não é possível para o sistema, já que o tempo de fechamento da válvula não pode ser alterado, é necessário propor métodos para mitigar os efeitos do fenômeno. Uma estratégia de controle é reduzir a vazão de final de carregamento na válvula autorizadora nos últimos 500 litros. A válvula autorizadora permite a configuração de uma vazão intermediária ao abrir apenas um dos solenoides, método que já é utilizado no início do carregamento para minimizar a formação de uma atmosfera inflamável dentro do vagão. A Figura 9 evidencia a redução da sobrepressão do golpe de aríete conforme a vazão é diminuída na válvula autorizadora.

Configurando a válvula autorizada para finalizar o carregamento com a mesma vazão de início (400 l/min) seria reduzida a sobrepressão para 75,61 mca, uma redução de 80% do valor para a vazão de 2000 l/min, reduzindo os efeitos do golpe de aríete principalmente nas juntas, como pode ser visto na Figura 8. A metodologia para configuração da nova lógica de vazão no fim do carregamento não pode ser descrita nesse trabalho por se tratar de segredo industrial.

Figura 9 – Sobrepressão na linha em função da vazão na válvula autorizadora

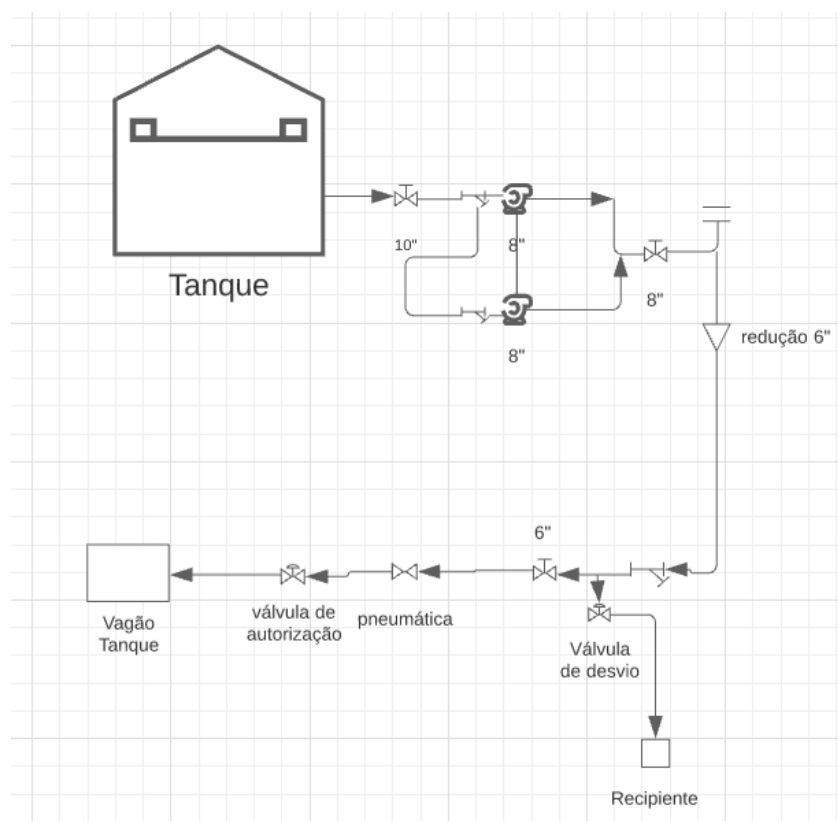


Como também não é possível reduzir a vazão no fechamento da válvula pneumática, por se tratar de um fechamento de emergência ao pressionar a botoeira, deve-se propor uma solução alternativa para o problema do golpe quando este ocorre na válvula pneumática.

Outras práticas de engenharia podem ser utilizadas para minimizar os efeitos do golpe na válvula pneumática. A primeira delas é realizar o interligamento da botoeira de emergência com a parada da bomba, assim evitando que a bomba continue a operação após a parada de emergência, evitando que a sobrepressão na linha aumente ainda mais.

Alternativamente seria a instalação de uma válvula de desvio de abertura rápida acionada quando a válvula pneumática for fechada, esse sistema faria o papel de uma chaminé de equilíbrio. Essa válvula de desvio precisa ter um tempo de fechamento lento para que pressões excessivas não ocorram na linha. A instalação dessa válvula de desvio na linha pode ser visto com mais detalhes no fluxograma de válvulas mostrado na Figura 10.

Figura 10 – Fluxograma de válvulas com incremento do novo sistema de desvio



Esse sistema de desvio pode ser construído como um alívio com uma tubulação de 1” e uma válvula de controle acionada por um atuador ao pressionar a botoeira de emergência. É necessária a utilização de um recipiente de armazenamento para a quantidade de fluído que será desviada da linha principal. Esse recipiente precisa ter ao menos 300 litros de volume para armazenar a quantidade de produto que seria aliviada, considerando um tempo de abertura da válvula de 3 segundos, vazão plena de 2000 l/min e um duto com diâmetro de 1”.

Os efeitos do golpe de aríete também podem ser propagados até o recalque da bomba, ponto que se torna crítico por possuir flange de conexão com junta na tubulação. Esse efeito pode ser mitigado de duas maneiras:

- A instalação de um sistema redundante na bomba, análogo ao sistema com válvula de desvio;
- A instalação de válvula de retenção ao longo do trecho de diesel S10, reduzindo assim o comprimento efetivo pelo qual a onda de pressão será propagada.

5. CONCLUSÃO

O presente trabalho permitiu verificar com maior clareza os efeitos do golpe de aríete em um sistema hidráulico real com escoamento de diesel S10, contribuindo para o estudo do fenômeno com fluidos derivados de petróleo. A determinação do módulo de elasticidade (*bulk modulus*), bem como o cálculo da celeridade para diesel S10 e outros derivados de petróleo são pontos de possíveis pesquisas futuras no assunto.

Foi possível determinar que a variação da composição do diesel S10 com diferentes quantidades de biodiesel, bem como a variação da temperatura tem pouca influência no valor da celeridade e conseqüentemente no valor do bulk modulus.

A determinação da sobrepressão através do método de Michaud-Vensano mostrou-se suficiente para um entendimento mais amplo do fenômeno do golpe de aríete em tubulações com escoamento de Diesel S10.

Foi possível determinar a condição de ocorrência de golpe de aríete para o sistema hidráulico estudado e também determinar a pressão total no sistema após a ocorrência do fenômeno. A pressão total correspondeu a 50% da pressão total admissível para dutos de aço 1020 com 6” de diâmetro, o que garante a integridade dos tubos caso não existam pontos de fragilidade oriundos de defeitos de fabricação. Porém, os flanges com juntas de papelão hidráulico se mostraram pontos críticos para possíveis vazamentos, pois a pressão total após o golpe correspondeu a 81% da pressão máxima permitida para esse material de acordo com o fabricante.

A redução da vazão de final de carregamento na válvula autorizadora para 400 l/min, o interligamento da botoeira de emergência com a parada da bomba e a construção de um sistema com válvula de desvio de abertura rápida para o caso de fechamento da válvula pneumática foram algumas das soluções propostas para mitigar o efeito do golpe de aríete no sistema, já que não é possível aumentar o tempo de fechamento das mesmas. Também foram propostas a instalação de um sistema redundante análogo ao de válvula de desvio no recalque da bomba e a inclusão de válvulas de retenção no sistema para reduzir os efeitos do golpe nos flanges e na bomba. Com a redução dos efeitos do fenômeno de golpe de aríete no sistema é possível garantir maior segurança na operação para os colaboradores e evitar possíveis derrames de derivados de petróleo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCMBUSTIVEIS. 2007. **Resolução ANP 32**. Distrito Federal. Disponível em: <<https://in.gov.br/web/dou/-/portaria-anp-n-32-de-28-de-julho-de-2021-334919573>>. Acesso em: 10 de Setembro de 2021.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTES FERROVIÁRIOS. 2020. **Informações Gerais**. ANTF. Disponível em: <<https://www.antf.org.br/informacoes-gerais/>>. Acesso em: 22 de Setembro de 2021.

ESTEVES, C. **Estudo do Transiente Hidráulico em Tubulações de Transporte de Água**. Trabalho de conclusão (Graduação em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal Fluminense. Rio de Janeiro, p.51. 2018.

FOX, R.; MCDONALD, A.; PRITCHARD, P. 2010. **“Introdução à Mecânica dos Fluidos”**. 8ª Edição. LTC, Rio de Janeiro. 816 p.

GOLDMAN, O. G.” **Water hammer: Its cause, magnitude, prevention”**. 1ª Edição. California: Columbia Graphs, 1953.

HELMENSTINE, A. M. **What is Bulk Modulus?** 2019. Disponível em:<<https://www.thoughtco.com/bulk-modulus-definition-and-examples-4175476>>. Acesso em: 25 de Outubro de 2021.

LAPUERTA, M.; AGUDELO, J.; PROROK, M.; BOEHMAN, A. **Bulk Modulus of Compressibility of Diesel/Biodiesel/HVO Blends**. 2011. American Chemical Society. Disponível em: <<https://doi.org/10.1021/ef201608g>>. Acesso em 01 de Novembro de 2021.

LOMBARDI, J.C. 2005. **Análise de distribuição de pressão em válvulas de diafragma poroso**. Tese (Doutorado Engenharia Mecânica), INPE, São José dos Campos, 125 p.

LÜDECKE, H. J., KOTHE, B., 2006. **KSB Know-how Water Hammer, Volume 1**, KSB, Halle.

MINISTÉRIO DO TRABALHO. **NR 20, Segurança e saúde no trabalho com inflamáveis e combustíveis**. Distrito Federal, p. 4. 2019. Disponível em: <<http://www.guiatrabalhista.com.br/legislacao/nr/nr20.htm>>. Acesso em: 10 de Outubro de 2021.

NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION. **NFPA 30, Flammable and Combustible Liquids Code**. Massachusetts, p. 10. 2018. Disponível em: <<https://www.nfpa.org/codes-and-standards/all-codes-and-standards/list-of-codes-and-standards/detail?code=30>>. Acesso em: 10 de Outubro de 2021.

PETROBRAS. 2012. **Manual Técnico do Produto**. 1ª Edição. Abastecimento, Gerência de Combustíveis. Cenpes. Disponível em: <ciapetro.com.br>. Acesso em: 05 de Dezembro de 2021.

POWERMAG. 2010. **Investigating the Sayano-Shushenskaya Hydro Power Plant Disaster**. Power. Disponível em: <<https://www.powermag.com/investigating-the-sayano-shushenskaya-hydro-power-plant-disaster/>>. Acesso em: 03 de Novembro de 2021.

SILVA, E., 2013. **Estudo Experimental de Propriedades Termofísicas de Blendas de Diesel/Biodiesel a Diferentes Temperaturas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), FEI, São Bernardo do Campo, p. 59.

TELLES, P. S., 2001. **“Tubulações Industriais: Materiais, Projeto e Montagem”**. 10ª Edição. Rio de Janeiro: LTC.

TELLES, P. S. 1999. **“Tubulações Industriais: Cálculo”**. 9ª Edição. Rio de Janeiro: LTC.

TSUTIYA, M. 2006. **“Abastecimento de Água”**. 3a ed. São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. 2006. **Operating Experience Summary**. Office of Health, Safety and Security. Disponível em: <<https://ehss.energy.gov/oesummary/oesummary2006/2006-11screen.pdf>>. Acesso em: 03 de Dezembro de 2021.