



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – UFOP

ESCOLA DE MINAS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA



BERNARDO VIEIRA DAMASCENO

**SIMULAÇÃO E AVALIAÇÃO DO CENÁRIO DE RUPTURA EM
UM MODELO DE MINERODUTO FICTÍCIO ATRAVÉS DO
SOFTWARE LIQSIM**

**OURO PRETO - MG
2023**

BERNARDO VIEIRA DAMASCENO
bernardo.damasceno@aluno.ufop.edu.br
bernardo.vieira.damasceno@gmail.com

**SIMULAÇÃO E AVALIAÇÃO DO CENÁRIO DE RUPTURA EM UM
MODELO DE MINERODUTO FICTÍCIO ATRAVÉS DO SOFTWARE
LIQSIM**

Monografia apresentada ao Curso de
Graduação em Engenharia Mecânica
da Universidade Federal de Ouro Preto
como requisito para a obtenção do
título de Engenheiro Mecânico.

Professor orientador: DSc. Edson Alves Figueira Júnior

OURO PRETO – MG
2023

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

D155s Damasceno, Bernardo Vieira.

Simulação e avaliação do cenário de ruptura em um modelo de mineroduto fictício através do software LIQSIM. [manuscrito] / Bernardo Vieira Damasceno. - 2023.

76 f.

Orientador: Prof. Dr. Edson Figueira Jr..

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Mecânica .

1. Transporte de carga- Mineroduto. 2. Equipamentos industriais- Estação de válvula. 3. LIQSIM (Software). 4. Minério de ferro - Polpa. 5. Medidores de fluxo. I. Figueira Jr., Edson. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 621

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



FOLHA DE APROVAÇÃO

Bernardo Vieira Damasceno

Simulação e avaliação do cenário de ruptura em um modelo de mineroduto fictício através do software LIQSIM

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico

Aprovada em 28 de fevereiro de 2023.

Membros da banca

[Dsc] - Edson Alves Figueira Júnior - Orientador - Universidade Federal de Ouro Preto

[Dsc] - Ana Maura Araújo Rocha - Universidade Federal de Ouro Preto

[Dsc] - Claudio Marcio Santana - Universidade Federal de Ouro Preto

Edson Alves Figueira Júnior, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 03/03/2023.



Documento assinado eletronicamente por **Edson Alves Figueira Junior, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 03/03/2023, às 14:08, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Claudio Marcio Santana, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 03/03/2023, às 20:30, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ana Maura Araujo Rocha, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 04/03/2023, às 12:03, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0483707** e o código CRC **44E772C**.

Aos meus pais dedico esta conquista, por sempre estarem presente na minha vida me apoiando e motivando.

Aos meus amigos e professores, por nunca terem desistido de mim.

AGRADECIMENTO

Agradeço aos meus pais por todo esforço, carinho e dedicação para me proporcionarem tudo de melhor que podiam e não podiam. Também à toda a minha família, em especial meu tio Nilton. Sem esse apoio eu não teria chegado tão longe.

Ao meu orientador Edson Figueira pelo conhecimento técnico e contribuições sobre assunto, pela orientação pessoal, profissional e por não ter desistido de mim ao longo desses anos.

Aos professores do curso de Engenharia Mecânica da UFOP pela minha formação teórica e prática ao longo da graduação. Em especial os professores Alisson Figueiredo e Vinícius Teles pela oportunidade acadêmica de iniciação científica e monitoria.

Aos meus amigos da graduação das turmas 17.1, 16.2, DIFERENCIAL EJ, VP e Engenharia Civil por todos os momentos incríveis que vivemos em Ouro Preto. Aos meus queridos amigos de Juiz de Fora, por toda a nossa trajetória juntos. Também guardo com carinho o companheirismo da Isabella, Gustavo, Lucas, Matheus e Renata pelos finais de semana de descontração e descanso no período mais difícil dessa caminhada.

Aos meus colegas de trabalho da GMI e Laboratório de Processos por toda a minha formação técnica, profissional e pessoal. Em especial Antônio, Ayron, Eduardo, Gabriela, Leandro, Vitor pelo apoio técnico e acadêmico essencial no desenvolvimento deste trabalho.

À cidade de Ouro Preto pela oportunidade de formação na Escola de Minas, entretenimento, tradição, cultura e por fazer parte da minha história.

“Mas o mais importante para nossa análise da ignorância é uma terceira categoria de informações, incógnitas desconhecidas, informações que são relevantes para o projeto, mas que as pessoas não sabem que carecem. São considerações que a pessoa nem imagina. Perguntas que as pessoas não sabem o suficiente para perguntar.”

David Dunning

RESUMO

A mineração e exportação do minério de ferro são atividades extremamente importantes que implicam em desafios logísticos complexos. Por conta disso, o mineroduto surge como uma alternativa eficiente para o transporte de polpa de minério de ferro à longas distâncias. Contudo, apesar da elevada segurança operacional proporcionada por este método é possível haver a ocorrência de acidentes e vazamento de material. Diante disso, este trabalho tem como objetivo simular o cenário de ruptura de modelo fictício de mineroduto e, a partir disso, avaliar o posicionamento de estações de válvula, a fim de reduzir o volume de vazamento, através do *software* LIQSIM. Portanto, o sistema proposto consiste em um duto de 400 km de comprimento, seccionado em duas partes, no qual foram posicionadas duas estações de bombas (EB) e duas estações de válvulas (EV), além da seleção de inúmeros parâmetros operacionais e um perfil de elevação. A partir disso, foram propostas diferentes condições para análise do cenário de ruptura como: comportamento do sistema nas condições normais de operação; remoção das EV; redução do tempo de detecção de vazamento; inclusão de novas EV em diferentes posições da tubulação; avaliação do desempenho das válvulas; e proposta de otimização combinando a redução do tempo de detecção com uma nova EV. Dito isso, foram realizadas as simulações e os dados tratados e analisados pelo Excel. Os resultados obtidos para cada uma das seções do duto foram tratados individualmente, tendo em vista suas diferentes características. Logo, foi identificado que a inclusão de uma EV na posição de 50 km tem o potencial de redução superior a 60% do volume de vazamento na sua zona de influência, ao passo que a retirada das EV presentes não influenciou na simulação. Para a Seção 2, foi identificado que a remoção das EV disponíveis impacta significativamente com o incremento do volume de material vazado, além disso a redução do tempo de detecção representa ganhos para a mitigação dos impactos. Ainda sobre a Seção 2, foi possível obter reduções relativas semelhantes aos valores da Seção 1, contudo, em valores absolutos, a redução foi consideravelmente menor. A proposta de otimização, para o caso da Seção 1, demonstrou ganhos para o processo. Conclui-se que o estudo do posicionamento e a inclusão de novas EV no sistema possibilita uma redução no volume de vazamento, mas é válido ressaltar que o processo de tomada de decisão envolve inúmeros outros parâmetros não considerados neste trabalho.

Palavras-chave: Mineroduto. Estação de válvula. LIQSIM. Polpa de minério de ferro. Ruptura. Volume de vazamento.

ABSTRACT

Mining and exporting iron ore are extremely important activities that involve complex logistical challenges. As a result, the slurry pipeline emerges as an efficient alternative for transporting iron ore slurry over long distances. However, despite the high operational safety provided by this method, accidents and material leakage may occur. In view of this, this work aims to simulate the rupture scenario of a fictitious slurry pipeline model and, based on this, to evaluate the positioning of valve stations, in order to reduce the leakage volume, through the LIQSIM software. Therefore, the proposed system consists of a 400 km long pipeline, sectioned into two parts, in which two pump stations (PS) and two valve stations (VS) were positioned, and the selection of numerous operational parameters and a profile elevation. Based on this, different conditions were proposed for analysis of the failure scenario, such as: system behavior under normal operating conditions; VS removal; reduction of leak detection time; inclusion of new VS in different positions of the pipeline; evaluation of valve performance; and optimization proposal combining detection time reduction with a new VS. That said, the simulations were performed and the data processed and analyzed by Excel. The results obtained for each section of the pipeline were treated individually, in view of their different characteristics. Therefore, it was identified that the inclusion of an VS in the 50 km position has the potential to reduce more than 60% of the leak volume in its influence zone, while the removal of the VS present did not influence the simulation. For Section 2, it was identified that the removal of available VS significantly impacts with the increase in the volume of leaked material, in addition to the reduction of detection time represents gains for the mitigation of impacts. Still on Section 2, it was possible to obtain relative reductions similar to the values of Section 1, however, in absolute values, the reduction was considerably smaller. The optimization proposal, for the case of Section 1, demonstrated gains for the process. It is concluded that the study of the positioning and the inclusion of new VS in the system allows a reduction in the volume of leakage, but it is worth mentioning that the decision-making process involves numerous other parameters not considered in this work.

Keywords: Slurry pipeline. Valve station. LIQSIM. Iron ore slurry. Rupture. Leak volume.

LISTA DE SIMBOLOS

MME	Ministério de Minas e Energia
PIB	Produto Interno Bruto
IBRAM	Instituto Brasileiro de Mineração
CFEM	Compensação Financeira pela Exploração de Recursos Minerais
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASME	Sociedade Americana de Engenheiros Mecânicos
km	Quilômetro
in	Polegada
EB	Estação de Bombas
EV	Estação de Válvulas
m	Metros
m ³	Metros cúbicos
h	Hora
psi	Libra por polegada quadrada
rpm	Rotações por minuto
SCADA	Controle de Supervisão e Aquisição de Dados
g	Gramas
cm ³	Centímetro cúbico
#	Malha da peneira
mm	Milímetro
s	Segundos
DNV	Det Norske Veritas
$\varnothing_{\text{Interno}}$	Diâmetro interno
ε	Rugosidade
$t_{\text{Detecção}}$	Tempo de detecção do vazamento

$P_{\text{Operação}}$	Pressão de operação
$v_{\text{Líquido}}$	Velocidade do líquido
$t_{\text{Desligamento}}$	Tempo de desligamento das bombas
Pa	Pascal
P	Pressão
v	Velocidade
$A_{\text{Seção}}$	Área da seção transversal
m^2	Metros quadrados
ρ	Massa específica
μ	Viscosidade dinâmica
P_{vapor}	Pressão de vapor
$t_{\text{Máx}}$	Tempo máximo de simulação

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Malha de Mineroduto no Brasil em quilômetros.	8
Figura 2: Fluxograma esquemático de um mineroduto.	10
Figura 3: Estação de Válvulas e Orifícios.	11
Figura 4: Esquema de uma bomba de polpa.	13
Figura 5: Bomba de deslocamento positivo.	14
Figura 6: Válvula de esfera flutuante e suas partes principais.	18
Figura 7: Válvulas de bloqueio.	19
Figura 8: Linha Gradiente Hidrostático.	20
Figura 9: Projeção de polpa de minério de ferro no ribeirão Santo Antônio.	21
Figura 10: Fluxograma das etapas da metodologia de pesquisa.	26
Figura 11: Perfil de Elevação do Mineroduto.	28
Figura 12: Janela de exibição dos resultados da Seção 1 no LIQSIM.	38
Figura 13: Janela de exibição dos resultados da Seção 1 no LIQSIM.	39
Figura 14: Volume de material vazado nos cenários de pequeno e médio vazamento e ruptura durante operação para a Seção 1.	40
Figura 15: Correlação entre o volume de vazamento e o perfil de elevação, em caso de ruptura do duto.	41
Figura 16: Cenários de ruptura da Seção 1 operante, inoperante e operação sem válvulas.	43
Figura 17: Cenários de ruptura da Seção 2 operante, inoperante e operação sem válvulas.	44
Figura 18: Cenários de ruptura da Seção 2 operante, inoperante e operação com tempo de detecção de 600s.	45
Figura 19: Cenários de ruptura da Seção 1 inoperante: controle, válvulas nas posições 60 km e 110 km.	47
Figura 20: Cenários de ruptura da Seção 1 inoperante: válvulas nas posições 50, 60, 90 e 110 km.	48

Figura 21: Redução do volume de vazamento: válvulas nas posições de 50, 60, 90 e 110 km.	49
Figura 22: Cenários de ruptura da Seção 2 inoperante: válvulas nas posições 210 km e 300 km.	50
Figura 23: Cenários de ruptura da Seção 2 com válvulas nas posições 200, 210, 280 e 300 km.	51
Figura 24: Redução do volume de vazamento para as condições de válvulas nas posições de 200, 210, 280 e 300 km.	52
Figura 25: Cenários de ruptura da Seção 1 em operação: controle, válvula na posição 50 km, detecção de 600 s e válvula na posição 50 km.	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Operadores de Mineroduto no Brasil.....	9
Tabela 2: Tamanhos máximos e condições típicas para diferentes materiais.	16
Tabela 3: Intervalo das Seções do Perfil de Elevação.	27
Tabela 4: Análises e avaliações propostas para o modelo simulado.	29
Tabela 5: Parâmetros da tubulação do mineroduto.	30
Tabela 6: Posição das estações ao longo do mineroduto.....	31
Tabela 7: Parâmetros das válvulas.....	31
Tabela 8: Parâmetros das bombas centrífugas.....	32
Tabela 9: Curva simplificada da bomba.	32
Tabela 10: Parâmetros dos tanques de armazenamento.	33
Tabela 11: Propriedades físicas do fluido.....	33
Tabela 12: Parâmetros de vazamento.	34
Tabela 13: Parâmetros de cálculo.	34
Tabela 14: Variáveis e indicadores.....	36

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Formulação do Problema.....	1
1.2	Justificativa.....	4
1.3	Objetivos.....	5
1.3.1	Geral	5
1.3.2	Específicos.....	5
1.4	Estrutura do Trabalho	6
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
2.1	Mineroduto	7
2.1.1	Instalações de um mineroduto	10
2.1.2	Características da polpa	15
2.2	Válvulas de bloqueio	17
2.3	Software LIQSIM.....	21
3	METODOLOGIA.....	24
3.1	Tipo de pesquisa	24
3.2	Materiais e Métodos	26
3.2.1	Definição do modelo de simulação	26
3.2.2	Definição dos cenários analisados.....	29
3.2.3	Coleta dos parâmetros de entrada.....	30
3.2.4	Realização das simulações e tratamento de dados.....	35
3.3	Variáveis e Indicadores	35
3.4	Instrumento de coleta de dados	37
3.5	Tabulação dos dados.....	37
3.6	Considerações finais do capítulo	37
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	38
4.1	Condição normal de operação	38
4.2	Remoção de válvulas do modelo	42
4.3	Influência do tempo de detecção	45
4.4	Inclusão de válvulas ao modelo.....	46
4.4.1	Válvulas na Seção 1.....	46
4.4.2	Válvulas na Seção 2.....	50

4.4.3	Otimização dos resultados	53
4.5	Considerações	55
5	CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES	56
5.1	Conclusão	56
5.2	Recomendações	57
	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	58

1 INTRODUÇÃO

1.1 Formulação do Problema

De acordo com Ministério de Minas e Energia - MME (2020), a participação da indústria extrativa mineral brasileira, exclusive petróleo e gás, correspondeu cerca de 2,44% do PIB Brasil, sendo este valor correspondente a 166,6 bilhões de reais, no ano de 2018.

Nos anos seguintes, segundo Instituto Brasileiro de Mineração - IBRAM (2021 a), durante o primeiro semestre de 2021 foi registrada alta de 98% nos rendimentos do setor mineral brasileiro em relação ao mesmo período do ano anterior. O Instituto também aponta que este crescimento de produtividade resultou no faturamento de R\$ 149 bilhões e US\$ 27,65 bilhões em exportações minerais na Balança Comercial.

Em relação às oportunidades geradas pelo setor, IBRAM (2021 b), aponta que a mineração tem retomado o crescimento na contratação de funcionários e atingiu 186,6 mil postos de trabalho em fevereiro de 2021. Este cenário de desenvolvimento também implicou na arrecadação de R\$4,48 bilhões da CFEM (Compensação Financeira pela Exploração de Recursos Minerais), correspondendo a um aumento de 111,7% no que se refere ao primeiro semestre de 2020 (IBRAM, 2021 a).

Conforme MME (2020), o Brasil é detentor de 19,8% da participação das reservas mundiais de Ferro, ao passo que este produto correspondeu a 84,8% da pauta de exportações da mineração em 2020. Além disso, de acordo com IBRAM (2021 a) o minério de ferro atingiu o preço médio de US\$ 183,43 por tonelada no primeiro semestre de 2021, 101,5% maior em relação ao mesmo período do ano anterior.

Em relação ao cenário regional em que a Universidade Federal de Ouro Preto e grandes mineradoras estão inseridas, foi registrado por IBRAM (2021 b) que, no primeiro trimestre de 2021, o Estado de Minas Gerais faturou R\$ 28,1 bilhões com a mineração, correspondendo a segunda maior participação no faturamento total brasileiro do setor mineral (40%), sendo a primeira o Pará (44%). Este impacto na economia está atrelado ao crescimento do faturamento com o minério de ferro em 118%, em relação ao mesmo período do ano anterior (IBRAM, 2021 b).

No primeiro trimestre de 2021 foram registradas exportações de 81,3 milhões de toneladas de minério de ferro no Brasil, representando um crescimento de 16,6% (IBRAM, 2021b). Segundo Gaggiato *apud* Pererira (2012) a maior parte do minério de ferro é

comercializado internacionalmente por meio de rotas transoceânicas. Portanto, estes números representam uma grande necessidade de as empresas brasileiras escoarem a produção de ferro, principalmente, em direção a portos no litoral.

Por outro lado, de acordo com Ribeiro e Ferreira (2002, p.6) o modal rodoviário é “o grande eixo de movimentação de cargas no transporte brasileiro”, sendo o segundo mais caro do país. Além disso, os autores também apontam que o desenvolvimento logístico brasileiro enfrenta grandes barreiras devido a deficiências na infraestrutura de transportes e comunicações.

Para Coelho e Morales (2012), uma análise da logística de transporte de minério de ferro retratou que o modal rodoviário sobrecarregaria as deficientes rodovias de Minas Gerais, bem como atribui elevados riscos de acidentes, custos operacionais e uma “complexa e onerosa estrutura logística de carga e descarga” (COELHO E MORALES, 2012, p.10). Os autores também acrescentam que o modal ferroviário, apesar dos menores custos e maior segurança, demanda de enormes investimentos de implantação e manutenção de vias, locomotivas e vagões, além das dificuldades técnicas e ambientais, tornando a alternativa inviável economicamente para determinadas circunstâncias.

Conforme Brandt *apud* Coelho e Morales (2012), o transporte dutoviário de polpas minerais, como a de ferro, é baseado na inserção do material em dutos e bombeados até seu processamento final. Além disso, acrescenta que este tipo de produto é classificado como inerte e não perigoso de acordo com os critérios da Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. Portanto, um mineroduto é capaz de transportar grandes volumes de polpa, por longas distâncias a um baixo custo operacional, atuando independente de variações climáticas e sob grande margem de segurança operacional, representando um baixo risco ambiental devido a poucas ocorrências de acidentes.

Neste contexto, segundo Anglo American (2014, [s.p]):

O mineroduto foi escolhido pela Anglo American para ser o modal logístico de transporte do minério de ferro por ser de alta confiabilidade, provocar baixos impactos ambientais, ter baixo custo operacional e de manutenção, especialmente se comparado com o de outras alternativas, como a ferroviária.

Portanto, para Silva (2017), de forma a garantir a viabilidade técnica, operacional e financeira do transporte dutoviário é interessante que o mineroduto opere com bombeamento contínuo e ininterrupto. Para isso, afirma que é necessário o planejamento de um programa de integridade de dutos, com inspeções programadas para a obtenção de dados confiáveis e, assim, possibilitar a tomada de decisões e avaliações assertivas na mitigação de anomalias e defeitos.

A partir disso, existem alguns *softwares* pagos de análise de integridade de dutos disponíveis no mercado. Dentre eles, o LIQSIM, o qual possibilita a simulação de cenários de vazamento em dutos de transporte, permitindo o cálculo de volume de derramado em diversos pontos da tubulação. Portanto, possibilita a identificação de regiões críticas para garantir a segurança operacional e que ações de mitigação de impactos sejam executadas no momento certo. Diante deste contexto, tem-se a seguinte problemática:

Como a simulação do cenário de ruptura de um modelo de mineroduto, através do *software* LIQSIM, pode contribuir com a análise do posicionamento de novas estações de válvula para a redução do volume de vazamento?

1.2 Justificativa

Tendo em vista o cenário apresentado, é nítido que a Indústria Extrativa Mineral tem um forte impacto na economia brasileira. Dito isso, foi estimado que entre os anos de 2021 a 2025 o setor mineral receberá US\$ 38 bilhões de investimentos, sendo 35% deste montante destinado a Minas Gerais e 23 projetos aplicados ao minério de ferro (IBRAM, 2021 b).

Portanto, sabendo que o setor mineral representa ganhos significativos para a região, garantir a qualidade e segurança do transporte de toda a produção até o destino final, a exportação, é uma tarefa de grande responsabilidade, tanto corporativa quanto técnica.

Assim, aponta Silva (2017), que minerodutos, em geral, apresentam comprimentos lineares que variam em até centenas de quilômetros. Com isso, o reparo em determinados trechos pode demandar da mobilização de recursos e outras equipes de manutenção, bem como a necessidade de escavações no solo. Logo, é importante que existam informações suficientes para priorizar anomalias e trechos com maiores riscos à operação (SILVA, 2017).

Esse contexto é relevante, uma vez que, apesar da segurança operacional proporcionada pelo transporte de dutos, é possível que ocorram vazamentos na tubulação com a liberação de polpa no ambiente. Segundo Melo *et al.* (2021), em menos de 4 anos de operação foram registradas duas ocorrências de vazamento no Sistema Minas-Rio, ocasionando no derramamento de mais de 470 toneladas de polpa de minério de ferro.

Para isso, existem recursos como *software* de integridade para a avaliação de cenários e obtenção de informações das regiões mais sensíveis da tubulação. Assim, programas como o LIQSIM podem ser utilizados no meio corporativo para averiguar o comportamento de cenários de ruptura e vazamento, verificando oportunidades de melhorias na utilização de Estações de Válvulas para a mitigação de impactos ambientais.

1.3 Objetivos

1.3.1 Geral

Simular o cenário de ruptura e vazamento de polpa de minério de ferro de um modelo fictício de mineroduto, através do *software* LIQSIM, com a finalidade de analisar o posicionamento das estações de válvulas para a redução do volume de vazamento.

1.3.2 Específicos

- Realizar um estudo teórico sobre as principais características de um mineroduto, dos sistemas de válvulas e suas particularidades e do *software* utilizado;
- Desenvolver um procedimento metodológico para simular e avaliar os cenários de ruptura, a fim de reduzir o volume de vazamento através do *software* LIQSIM;
- Explorar os recursos disponíveis pelo *software*;
- Avaliar o comportamento de ruptura em condições normais de operação e parada;
- Verificar o desempenho de Estações de Válvulas e redução do tempo de detecção;
- Identificar oportunidades de melhorias.

1.4 Estrutura do Trabalho

Este trabalho foi desenvolvido ao longo de cinco capítulos, sendo o primeiro referente à formulação do problema, bem como a definição das justificativas e dos objetivos para a análise em questão.

A seguir, o segundo capítulo aborda uma revisão bibliográfica das principais características de um duto para o transporte de minério. Além disso, também avalia a utilização de sistemas de válvulas para bloqueio operacional e ferramentas para a simulação e detecção de vazamentos.

Dessa forma, o terceiro capítulo discute a metodologia utilizada na realização do trabalho, de modo que contempla os aspectos avaliados para a definição do modelo simulado, os cenários de estudo, parâmetros de entrada, variáveis e indicadores, entre outros.

Logo após, o quarto capítulo apresenta os resultados e discussões da pesquisa detalhando o comportamento da tubulação nos diferentes cenários propostos. Com essas informações, foi possível identificar oportunidades de melhoria para o sistema apresentado.

Por fim, o quinto capítulo traz um apanhado geral com as conclusões do estudo e sugestões para trabalhos futuros, de modo que encerre as discussões abordadas e explicita as principais considerações desenvolvidas ao longo das simulações.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Mineroduto

De acordo com Chaves (2012, p.136), uma das possíveis definições de mineroduto é “o modo de transporte de sólidos granulares em que estes são misturados com um líquido, que funciona como veículo de transporte”. Além disso, complementa que o veículo de transporte pode ser a água, bem como qualquer outro líquido conveniente, ao passo que o sólido granulado pode ser composto por diversos tipos de materiais, como diferentes tipos de minérios e concentrados. O autor também sugere que a terminologia da tubulação surge em decorrência da aplicação específica do duto, como: mineroduto (dutos de minérios); rejeitoduto (dutos de rejeito) etc.

Em relação à norma de padronização, pode-se dizer que a *American Society of Mechanical Engineers* – ASME B31.4 - 2012 é mundialmente adotada para tubulações de transporte de líquidos e polpas em dutos pressurizados. Por conta disso, segundo ASME B31.4 - 2012 (2012), compreende-se como tubulação todas as partes das instalações físicas das quais o líquido se move durante o transporte, incluindo tubos, válvulas, conexões, entre outros. Já para o caso de minerodutos, o fluido transportado é dado como uma mistura de sólidos, bifásica, em meio aquoso.

Para Sampaio e Brandão (2004), o transporte de minério por meio de tubulações vem ganhando espaço pelo mundo, apesar de ainda não tão comum, devido às suas vantagens competitivas quando comparadas com outros métodos de transporte em escala. Isso se dá devido à fácil instalação, alta confiabilidade e disponibilidade, baixo risco de acidentes e vazamentos e custos reduzidos com consumo de energia, mão de obra e manutenção (SAMPAIO E BRANDÃO, 2004).

Chaves (2012) também aponta que os minerodutos destacam-se em relação aos outros modais por fatores como a fácil transposição de obstáculos naturais; reduzido impacto ambiental; alta confiabilidade. Cabrera (1979) complementa que a disponibilidade de operação dos minerodutos é superior a 95% do tempo, além de que este é um modal que exige pouca mão de obra, tornando-se uma característica muito relevante em cenários de instabilidades social e política.

Por outro lado, segundo Chaves (2012), os principais contrapontos se dão pelo alto investimento inicial exigido na implementação (70 a 80% direcionados para amortização e o restante em gastos operacionais), além da inflexibilidade de alterar os pontos de origem e destino. Ademais, Cabrera (1979) pontua que a escassez de água, no início da linha, pode ser um fator limitante e condicionante para o sucesso da operação.

Salgado e Chaves (1988) apontam que o sucesso da implantação de dutos no Brasil era inevitável pela decorrência de características como a grande extensão territorial, variedade e abundância de recursos minerais, além da insuficiência dos principais modais de transporte no país. Portanto, foram listados os minerodutos em operação mais importantes no mundo, de modo que o Brasil foi retratado como detentor de aproximadamente 600km de dutos (cerca de 20% do total instalado neste período), os quais foram implantados pelas seguintes empresas: Samarco (concentrado de minério de ferro); Fosfértil e Goiasfértil (concentrado de fosfato).

De acordo com Torres (2021), o crescimento da malha de Minerodutos, no Brasil, sofreu um expressivo aumento, como exemplificado pela Figura 1.

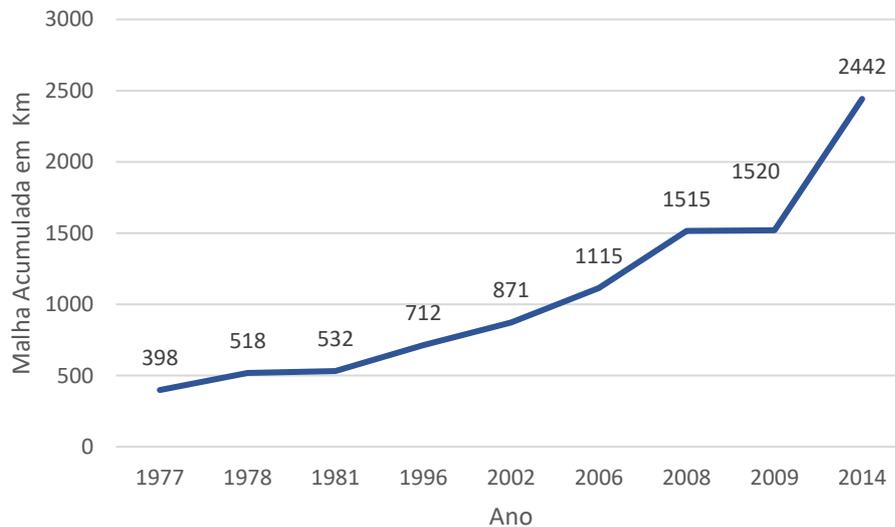


Figura 1: Malha de Mineroduto no Brasil em quilômetros.
Fonte: Adaptado de Torres (2021).

Este crescimento, detalhado pela Figura 1, tornou-se significativo a partir dos anos de 2008 e 2014 devido ao investimento em novas linhas de Mineroduto por parte de algumas empresas de mineração. Torres (2021), também sintetiza que o aumento da malha, ao longo dos anos, se deu pela grande confiabilidade do modal de transporte, uma vez que as interrupções no transporte e influências meteorológicas são mínimas; além dos baixos índices de acidentes, danos, perdas e custos operacionais, os quais justificam elevados custos de implantação.

A Tabela 1 lista os principais operadores de Mineroduto no Brasil até o ano de 2014.

Tabela 1: Operadores de Mineroduto no Brasil.

Operador	Minério	Comprimento [Km]	Diâmetros nominais [in]	Início de operação
Anglo American	Ferro	522	24/26	2014
Samarco Linha 3	Ferro	400	20/22	2014
Samarco Linha 2	Ferro	400	14/16	2008
Samarco Linha 1	Ferro	398	18/20/22	1977
Hydro	Bauxita	244	24	2006
Imerys PPSA	Caulium	180	10	1996
Imerys RCC	Caulium	159	14	2002
Mosaic (Fosfertil)	Ferro	120	9	1978
Dow Química	Sal-Gema	51	14	1977

Fonte: Adaptado de Torres (2021).

Diante disso, a Tabela 1 aponta que, ao longo dos anos, foram instaladas linhas de minerodutos com comprimento cada vez maiores. Como mencionado anteriormente, os anos de 2008 e 2014 destacam-se por conta do início de operação das Linhas 2 e 3 da Samarco Mineração S.A. e o mineroduto Minas-Rio da Anglo American.

2.1.1 Instalações de um mineroduto

Uma vez discutidas as principais características de um mineroduto, é interessante abordar alguns aspectos de instalações de operação do duto. De acordo com Chaves (2012), instalações de transporte de polpa, para longas distâncias, incluem o duto, propriamente dito, terminais de bombeamento e recepção do material, bem como todo o aparato de instrumentação da linha. Betinol e Navarro (2009) acrescentam que os sistemas também podem incluir tanques de armazenamento com agitadores, estações de válvula e pontos de monitoramento de pressão para a melhoria operacional.

De acordo com Mattioli (2016), a estrutura correspondente aos minerodutos Samarco dispõem de duas Estações de Bombas (EB), de modo que o bombeamento de polpa ocorre da primeira estação ao longo da seção, depositando material nos tanques de armazenamento. Em seguida, a segunda estação opera na propulsão da polpa armazenada até o destino final, atravessando duas Estações de Válvulas (EV). A Figura 2: Fluxograma esquemático de um mineroduto. exemplifica este comentário.

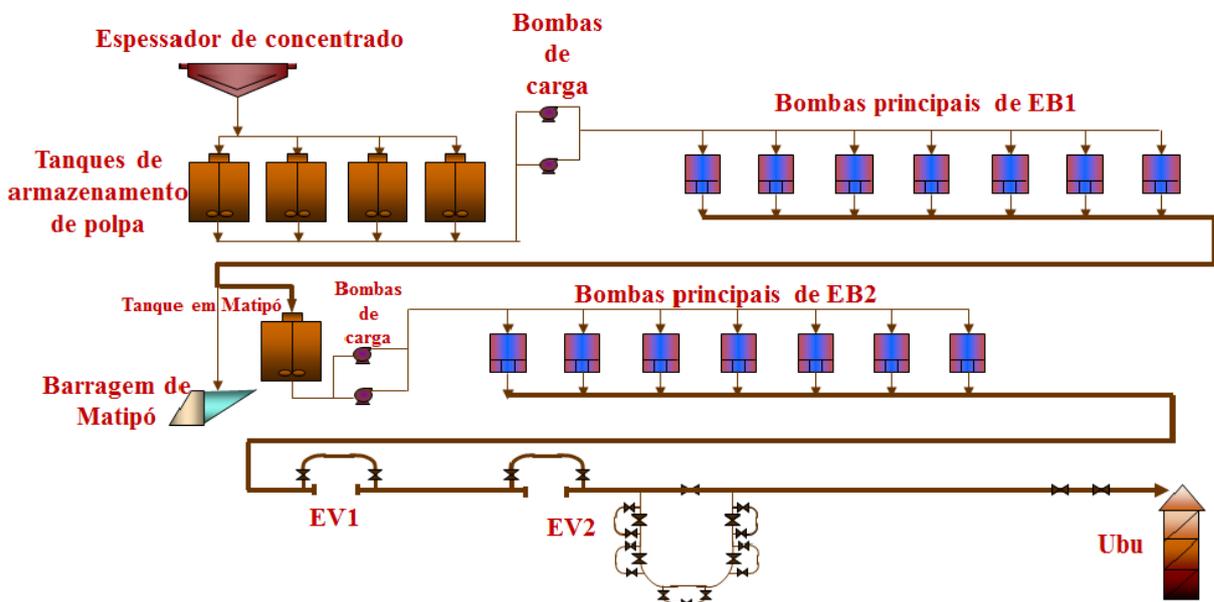


Figura 2: Fluxograma esquemático de um mineroduto.
Fonte: Mattioli (2016).

A Figura 2 apresenta o fluxograma de operação de um mineroduto para o transporte de minério de ferro, onde o início do processo ocorre no abastecimento dos tanques com a polpa proveniente do espessador de concentrado. De acordo com Betinol e Navarro (2009), o sistema mencionado é denominado como tubulação de fluxo total (*full flow pipeline*), de modo que inclui a utilização de bombas centrífugas para a entrega do material em outras aplicações. Em seguida, é direcionado para as bombas principais e, posteriormente, bombeada até a estação intermediária. Este processo repete-se na estação seguinte, atravessa duas estações de válvula e é direcionado ao terminal de recebimento. A EV pode ser ilustrada pela Figura 3.



Figura 3: Estação de Válvulas e Orifícios.
Fonte: Collahuasi *apud* Gomes (2012).

Segundo Torres (2021), as estações de válvulas, ainda sobre os minerodutos Samarco, têm a função de redução da pressão estática atuante em algumas localidades da tubulação, quando o duto permanece inoperante. Além disso, complementa que uma das estações dispõe de *loops* com orifícios cerâmicos para o controle de pressões dinâmicas ao longo da linha, como os representados pela Figura 3. Martinson (2010) complementa que estações de orifícios podem ser aplicadas quando há grande variação de altitude na tubulação, uma vez que permitem a dissipação de energia e controle do duto.

Para Harisson (2009), estações de orifício utilizam de transdutores de pressão, localizados em regiões de maior altitude, para o monitoramento de elevadas quedas de pressão de modo a direcionar o fluido a orifícios que restringem a passagem do fluxo. Portanto, cita que esta condição promove a dissipação de energia evitando o desgaste abrasivo proporcionado pelo *slack flow*. Segundo Chapman *et al.* (2009) este fenômeno representa a tubulação operando na condição de vácuo, de modo que pode proporcionar a erosão e falha prematura do aço do tubo.

De acordo com Vidal (2011), uma estação de bombas é projetada para que seja capaz de fornecer carga hidráulica suficiente para o transporte de polpa até o terminal de destino ou em tanques de armazenamento, com cerca de 16 m de altura e 16 m de diâmetro, para estocagem. Complementa sobre a utilização de agitadores, de modo que estes equipamentos podem variar a velocidade de rotação de acordo com o volume dos tanques.

De acordo com Chaves (2012), a maioria dos terminais de bombeamentos incluem aspectos que facilitam a eliminação de partículas mais grossas para a adequação de granulometria, como nas moagens de circuito fechado, uma vez que a utilização correta das porcentagens de sólidos é um fator crítico no bombeamento de polpa. Para isso, o autor cita a utilização dos tanques com agitadores no ajuste dos percentuais, além da estocagem de polpa para o bombeamento.

Vidal (2011) também apresenta que no projeto foram considerados dois conjuntos de bomba, com cinco bombas centrífugas em cada, bombeando numa vazão de 567,5 m³/h, na concentração de sólidos em massa de 68%, sendo uma configuração para a operação e outra para reserva. Para isso, cada uma das bombas dispõe de uma bomba de água para a selagem do sistema. Vale ressaltar que, o sistema adotado pelo autor corresponde a um mineroduto de 5 km com pressões de descarga na ordem de 575 psi.

Figueira (2017) aponta que as bombas centrífugas de polpa são dispositivos que utilizam de rotores com menor número de aletas e mais robustas e revestimentos de materiais resistentes ao desgaste, tendo em vista a operação com fluidos abrasivos. Além disso, cita que as velocidades de operação tendem a não ultrapassar 1800 rpm, uma vez que a rotação está diretamente relacionada ao desgaste. A Figura 4 exemplifica uma dessas bombas.

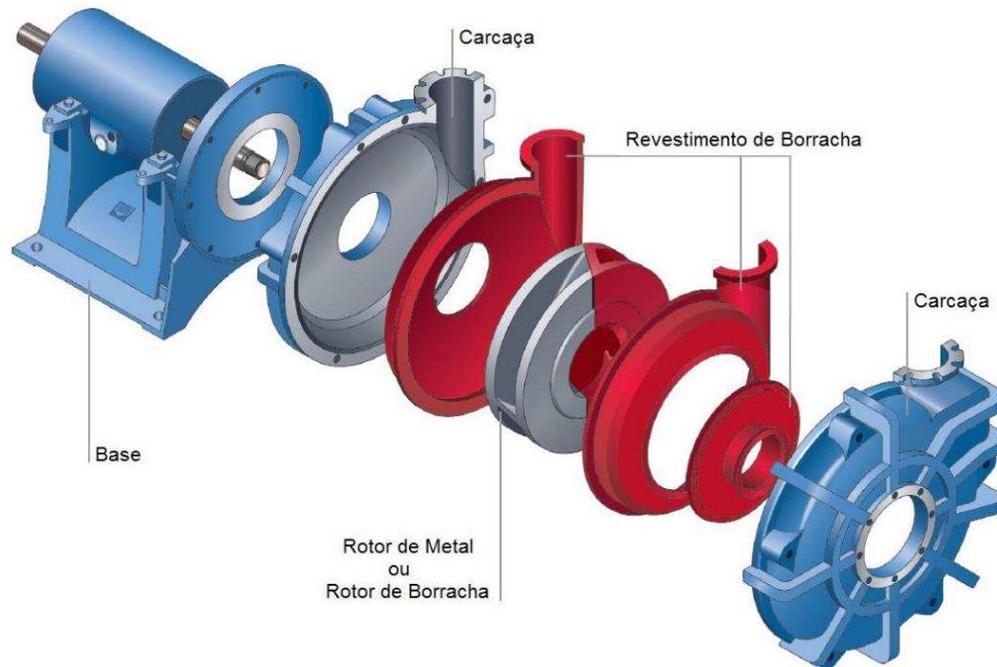


Figura 4: Esquema de uma bomba de polpa.
Fonte: KSB *apud* Figueira (2017).

A Figura 4 apresenta o esquema de uma bomba centrífuga de polpa, apresentando as características mencionadas anteriormente. Assim, de acordo com Chaves (2012), as partes em contato com a polpa são revestidas de materiais como borrachas e Ni-hard, além da utilização de carcaças bipartidas para a abertura e manutenção, com a troca de rotores, revestimentos e limpeza. Contudo, aponta que a eficiência dessas bombas tende a ser inferior do que as de água, além de limitações das pressões atingidas. Por fim, cita a necessidade da utilização de selagem hidráulica, injetando água sob pressão no interior da carcaça, podendo diluir a polpa bombeada.

Já em relação às bombas de deslocamento positivo, Abulnaga (2002) indica que são versáteis, eficientes e adequadas para pressões superiores a 2500 psi. Complementa que essa categoria vem ganhando aceitação, principalmente na operação de minerodutos de longa distância (300 km de comprimento), por conta da recuperação dos investimentos iniciais, maior eficiência hidráulica do que bombas centrífugas, além da capacidade de bombear polpas com 70% de concentração de sólidos. A Figura 5 ilustra esse tipo de equipamento.

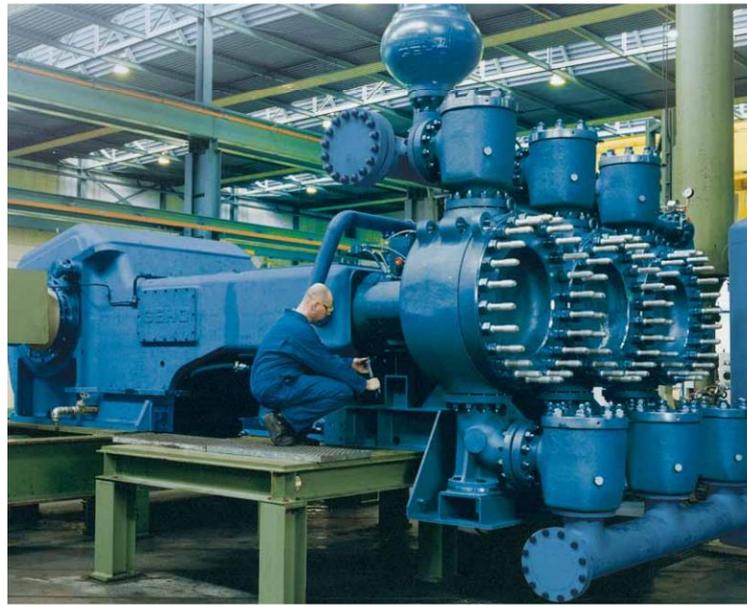


Figura 5: Bomba de deslocamento positivo.
Fonte: Weir *apud* Gomes (2012).

Na Figura 5 pode ser observado um modelo de bomba de deslocamento positivo de pistão diafragma, a qual, de acordo com Abulnaga (2002) é capaz de lidar com polpas abrasivas. De acordo com o autor, isso se dá uma vez que o diafragma utilizado é o componente que entra em contato direto com o material e, portanto, isola o pistão e seus mecanismos do contato com as partículas abrasivas.

Já em relação aos sistemas de controles e instrumentação da linha, Chaves (2012) pontua que dizem respeito ao monitoramento de pressões, temperaturas, densidade de polpa e velocidade, bem como o acionamento remoto de válvulas de controle. O autor complementa que, de forma geral, estes sistemas são retroalimentados para proporcionar uma correção automática de desvios, como no controle de pressões por meio da variação de velocidade de operação das bombas.

Chaves (2012) lista os principais instrumentos utilizados nas medições como os medidores: de densidade do tipo de dispersão de raios gama; magnéticos de vazão; pressão diferencial ou absoluta, separados por diafragma. Além disso, também complementa que estes equipamentos não estão em contato direto com a polpa em movimento, portanto, não interferem no escoamento.

Martinson (2010) complementa sobre a utilização de sistemas de controle supervisão e aquisição de dados (*Supervisory Control and Data Acquisition – SCADA*) como ferramenta na operação de dutos. Também explica que estes são sistemas baseados em controles lógicos programáveis, ou sistemas de controles distribuídos. Assim, conclui que, por meio de telecomunicação, permitem controles básicos para a rotina, como a operação e desligamento seguro, possibilitando a visualização de parâmetros hidráulicos, acompanhamentos dos lotes de produção (*batches*), detecção de vazamentos, análises remotas, entre outros.

2.1.2 Características da polpa

De acordo com Abulnaga *apud* Mattioli (2016, p.23), polpa é definida como “essencialmente uma mistura de sólidos e líquidos e, descrevendo de maneira mais específica, ela é composta por um fluido, geralmente água, que transporta partículas sólidas mantidas em suspensão”.

Chaves (2012) complementa que o transporte ideal em um mineroduto se dá por uma polpa homogênea, a qual é proporcionada pelo controle de tamanhos de partícula, elevada porcentagem de sólidos e composição de partículas finas para proporcionar uma suspensão homogênea e estável, mantendo as mais grosseiras suspensas. Também cita os principais parâmetros que limitam o escoamento do duto, sendo: velocidade mínima; limitações das classes de pressão; porcentagem de sólidos; velocidades máxima admissível e máxima compatível, para a limitação dos efeitos abrasivos e adequação às condições externas de bombeamento, respectivamente.

Chaves (2012) aponta que os minerodutos devem ser projetados para o transporte desse tipo de material nas características que são apresentadas, prevendo os tamanhos máximos e mínimos de partículas, uma vez que a distribuição granulométrica de concentrados (cobre, ferro, rejeito etc.) já é estabelecida previamente nos processos de beneficiamento. O autor também cita que o projeto deve considerar uma flexibilidade operacional para contemplar a variabilidade de características do material de diferentes regiões da jazida explorada,

permitindo a operação com este intervalo de variações ou garantindo ações que adaptem a esse cenário.

Por outro lado, Chaves (2012) reitera que a distribuição granulométrica dos sólidos deve ser mantida constante, especialmente o tamanho máximo de partícula, por meio de métodos confiáveis de controle como em peneiras de proteção, tendo em vista a importância dos valores de porcentagem de sólidos. Conclui que, uma vez que partículas mais grosseiras, transportadas por saltitação ou arrastadas, promovem um desgaste preferencial no fundo da tubulação. A Tabela 2 apresenta informações sobre essas partículas.

Tabela 2: Tamanhos máximos e condições típicas para diferentes materiais.

Material	Massa específica (g/cm³)	Tamanho máximo # (mm)	% sólidos	Velocidade (m/s)
Carvão	1,4	8 (2,38)	50	5,0
Calcário	2,7	48 (0,297)	70	3,5
Conc. cobre	4,3	65 (0,210)	55	5,0
Conc. ferro	4,9	100 (0,149)	65	6,0
Gilsonita	1,05	4 (4,76)	45	1,2
<i>Iron sands</i>	4,9	28 (0,595)	50	4,9

Fonte: Adaptado de Thompson e Aude *apud* Chaves (2012).

Observa-se na Tabela 2 o tamanho máximo de partículas de diferentes produtos e a correlação com diferentes condições de operação. Estes são alguns dos parâmetros mais importantes para o acompanhamento das atividades de bombeamento. Por outro lado, Chaves (2012) pontua que apesar do grande interesse em manter a máxima porcentagem de sólidos na polpa, em alguns casos, esse teor elevado pode inviabilizar questões operacionais por problemas ocasionados pela reologia da polpa.

2.2 Válvulas de bloqueio

De acordo com Skousen (2004, p.1), “válvulas são dispositivos mecânicos especificamente projetados para direcionar, iniciar, parar, misturar ou regular o fluxo, pressão ou temperatura de um fluido de processo”. Além disso, o autor também complementa que podem ser designadas para aplicações de líquidos ou gases e podem ser construídas com diversos materiais como ferro, plástico, latão, bronze, diversas ligas especiais e, principalmente, o aço.

Para Forsman e Morin (2005), além de fluidos e gases, válvulas também podem controlar o fluxo de misturas de sólidos e líquidos em tubulações ou compartimentos que, através de elementos móveis, abrem, fecham ou obstruem parcialmente uma passagem de fluxo.

Segundo Skousen (2004), válvulas podem ser classificadas de acordo com sua função. Diante disso, o autor classifica como válvula *on-off* (válvula de bloqueio) aquelas capazes de interromper ou permitir o fluxo do processo, sendo operadas manualmente ou por atuadores, além disso, são comumente utilizadas em aplicações de desvio de fluxo para manutenção ou proteção contra ameaças. Também classifica como válvula de retenção o equipamento capaz de permitir o fluxo apenas no sentido desejado, restringindo mecanicamente fluxo ou pressão no sentido oposto para a proteção de equipamentos e sistemas. Por fim, define válvula de estrangulamento aquela capaz de regular o fluxo, temperatura e pressão do serviço, permitindo qualquer posicionamento no curso da válvula, totalmente aberta ou fechada.

Forsman e Morin (2005) também pontuam que uma válvula de bloqueio pode isolar dois sistemas mutuamente, desde que proporcione vedação completa quando fechada e mínima restrição de fluxo quando aberta. Portanto, os principais modelos utilizados para essa aplicação são válvulas de esfera; borboleta; diafragma; gaveta; globo; mangote e macho.

Em relação às válvulas de esfera, Forsman e Morin (2005) citam que esta é basicamente uma válvula de bloqueio baseada em uma esfera com um furo no seu interior pelo qual o fluxo passa. Portanto, apontam que quando a esfera é rotacionada há um alinhamento do furo com o duto, permitindo a passagem do fluido, ao passo que, quando estão a um quarto de volta, a passagem se alinha em outra direção, bloqueando o fluxo. A Figura 6 exemplifica um modelo de válvula de esfera.

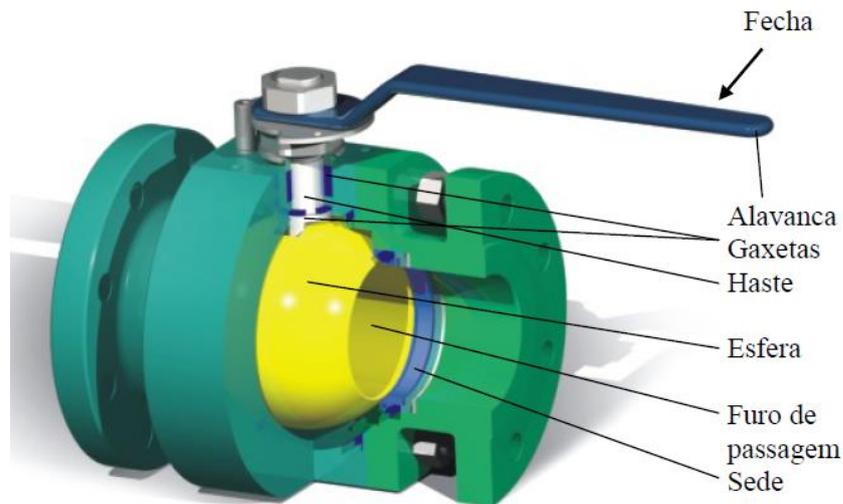


Figura 6: Válvula de esfera flutuante e suas partes principais.
Fonte: Costa (2009).

Costa (2009) comenta que, para a obtenção da estanqueidade, utiliza-se sedes ou anéis de vedação, internamente, entre as extremidades e a esfera, de modo a determinar as características de vedação da válvula, como exemplificado pela Figura 6. Complementa dizendo que a precisão na superfície de contato da sede é crítica para assegurar sua função, uma vez que imperfeições podem possibilitar o vazamento de fluido e, para que isso não ocorra, é necessária uma tensão de contato entre a esfera e as sedes.

Ainda, em uma abordagem muito completa sobre o assunto, Harrison (2009) discute que nos anos de 1990, as válvulas disponíveis para serviços severos com a operação de polpa eram do tipo macho e gaveta, mas estavam restritas aos limites de pressão. Por conta disso, cita que houveram tentativas de modificação dos modelos tradicionais de válvulas de esfera aplicadas em dutos de óleo e gás, mas estas não eram capazes de resistir às altas ciclagens, em médias e altas pressões, em fluidos abrasivos e diferenças de pressão.

Diante disso, Harrison (2009) explica que esse tipo de válvula utiliza de um selo dinâmico, nos dois lados da esfera, o qual é comprometido devido à presença de particulados. Para solucionar esta questão, cita que foram desenvolvidas sedes de metal revestidas com carbetos, possibilitando operação em condições muito mais severas. Portanto, aponta que são aplicáveis a condições de concentração de sólidos superior a 10%; altas pressões; ciclagem frequente ou longos períodos de inatividade; exigência de estanqueidade total; passagem plena de fluxo; erosão e corrosão; fácil manutenção e operação; dentre outros.

Além disso, Skousen (2004) apresenta que, devido ao seu movimento rotativo de limpeza, são ideais nas operações com polpas ou processos com particulados, uma vez que a porta esférica tende a separar ou cisalhar os particulados ao fechar. Por outro lado, aponta que partículas finas e longas podem sujar ou prender-se na esfera, ocasionando numa maior demanda de manutenção.

Segundo Harrison (2009), as válvulas de esfera com sede de metal são tipicamente aplicadas em dutos de longas distâncias para o transporte de polpas de minério. Complementa também sobre a necessidade de utilização destas válvulas para manutenção do sistema ou paradas de bombeamento, de modo que se faz necessária uma válvula de bloqueio para evitar o fluxo de retorno nas bombas, além de que estes modelos suportam as pressões e abrasividade exigida com a confiabilidade de zero vazamento.

Harrison (2009) também pontua que dutos nestas características demandam de proteção para a drenagem completa da tubulação em caso de eventos catastróficos de ruptura. Para isso, explica que, de acordo com a extensão do projeto, estações de válvulas são posicionadas em intervalos regulares e utilizadas para o isolamento de seções do sistema, em estações de orifícios e também nos terminais. A Figura 7 exemplifica as válvulas utilizadas em minerodutos.



Figura 7: Válvulas de bloqueio.
Fonte: Harisson (2009).

A Figura 7 demonstra as válvulas de esfera comumente utilizadas nas estações de válvula de um mineroduto. Como mencionado, são equipamentos adequados para serviços mais severos, em condições de abrasividade e altas pressões, aplicados no isolamento de sistemas e seções do duto. De acordo com Chapman *et al.* (2009), esse tipo de válvula enquadra-se na classe de pressão *Class 1500* da norma ANSI B16.5.

A condição apresentada na Figura 7 também sugere uma interessante característica, explicada por Harisson (2009), de forma que, normalmente, estas válvulas são utilizadas em pares sendo que a primeira é operada como uma “válvula de desgaste” e a segunda como “válvula de selagem”.

A Figura 8 retrata a aplicação das válvulas para isolamento dos sistemas.

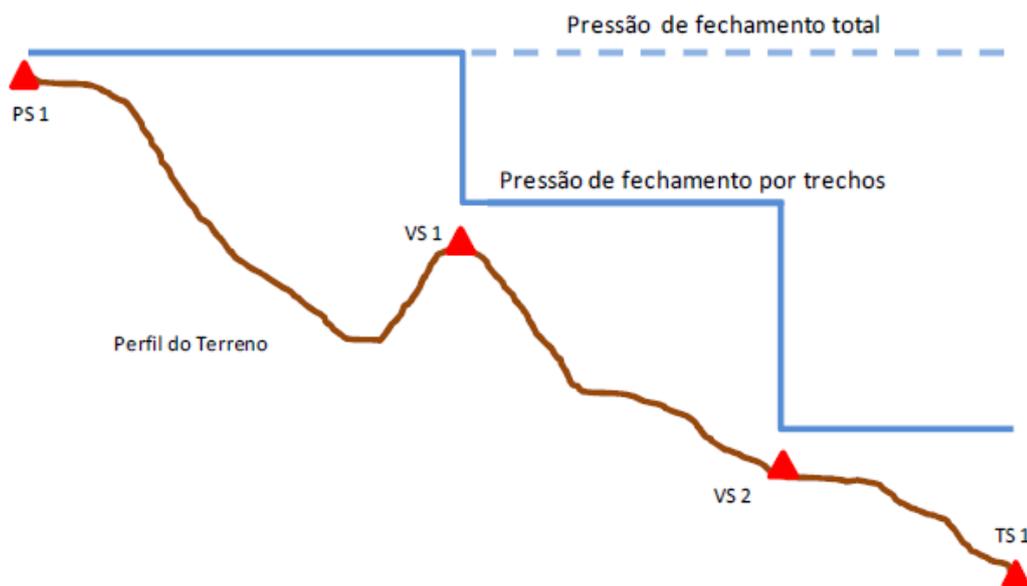


Figura 8: Linha Gradiente Hidrostático.
Fonte: BRASS *Engineering apud* Gomes (2012).

A Figura 8 exemplifica as pressões atuantes no sistema, de modo que para Gomes (2012), o gradiente hidrostático representa o plano de energia sob as condições de detenção do sistema. Em seguida, detalha que, quando o sistema está parado o plano de energia é horizontal e, ao posicionar estações de válvulas intermediárias na tubulação, a retenção proporcionada promove uma divisão na coluna hidrostática em diferentes partes. Assim, o autor conclui que, ao separar estas colunas, a pressão resultante nestes trechos será menor, ou seja, entre o trecho de VS1 e VS2 a pressão é dada pela altura na saída de VS1.

2.3 Software LIQSIM

Apesar dos aspectos positivos proporcionados por um mineroduto é válido ressaltar os impactos associados a este tipo de empreendimento. Diante disso, de acordo com Melo *et al.* (2021), os interesses socioambientais nem sempre são contemplados, tendo em vista o risco de rompimento da tubulação, bem como a desocupação de famílias para a instalação da tubulação. Além disso, o autor também pontua sobre a repercussão nos ecossistemas aquáticos causados pela contaminação de polpa em vazamentos.

Segundo Melo *et al.* (2021), nos dias 12 e 27 de março de 2018 houveram dois vazamentos de polpa no Sistema de mineroduto Minas-Rio, o maior em operação no mundo, no município de Santo Antônio do Gramma, Minas Gerais. Também é citado o lançamento de 947 toneladas de polpa de minério de ferro no Ribeirão Santo Antônio, afetando a qualidade de captação de água, apresentado pela Figura 9.



Figura 9: Projeção de polpa de minério de ferro no ribeirão Santo Antônio.
Fonte: Estado de Minas (2018).

A Figura 9~ apresenta a condição de projeção de polpa de minério de ferro durante um vazamento de mineroduto. É interessante ressaltar a altura atingida pelo jato de material, uma vez que o fluido é submetido a altas pressões.

De acordo com Betinol e Navarro (2009) existe a possibilidade de detecção de vazamento por meio de tecnologias como os Sistemas de Detecção de Vazamento. Dessa forma, discutem que são modelos computacionais que identificam a localização e as dimensões do vazamento da tubulação, uma vez que recebem informações das condições reais de campo por

meio de instrumentos. Portanto, permitem que ações e respostas sejam tomadas de maneira rápida, mitigando os vazamentos e reduzindo a contaminação (BETINOL e NAVARRO, 2009).

Martinson (2010) complementa que a detecção de vazamento pode ser desenvolvida por diversas abordagens, comparando as condições reais de operação com modelos matemáticos sobre a tubulação, de modo que variações inexplicadas tornam-se vazamentos em potencial. Dessa forma, exemplifica que essas informações podem ser obtidas por meio de ondas de pressão que propagam pela tubulação, proporcionadas durante vazamentos repentinos, que podem ser detectadas pelo sistema SCADA, verificando a existência e estimando a posição do vazamento. Também é citado a possibilidade de utilizar o balanço volumétrico entre as estações para identificar alterações no fluxo bombeado.

Chaves (2012) também pontua sobre a utilização de reservatórios de emergência em locais de mais baixa cota, além daqueles já presentes nos terminais, de modo a possibilitar o esvaziamento rápido do duto em caso de paradas no transporte e emergências. Portanto, o autor conclui que após a decantação dos sólidos, é possível retomá-los por meio de pás-carregadeiras ou retroescavadeiras, e ressalta que uma tubulação de 12 in e 10 km pode conter cerca de 750 m³ de polpa.

Diante disso, *softwares* como o LIQSIM surgem como uma ferramenta para corroborar com análises de risco complexas, possibilitando o reconhecimento dos possíveis impactos e o planejamento de ações prévias. De acordo com o Guia do Usuário, disponibilizado pela Det Norske Veritas – DNV Brazil (2011), LIQSIM é um *software* comercial, desenvolvido pela própria DNV, o qual baseia-se em modelagens hidráulicas de fluidos para simulação de vazamentos acidentais em dutos de transporte.

Segundo DNV (2011), o desenvolvimento do programa surgiu da demanda de avaliação de risco direcionada para dutos transportadores de líquidos operando, principalmente, em terrenos irregulares. Isso se dá, uma vez que os *softwares* PHAST e SAFETI, ambos disponibilizados pela DNV, não contemplavam simulações adequadas para este tipo de cenário, exigindo uma nova proposta por parte da empresa (DNV, 2011).

Em linhas gerais é apresentado por DNV (2011) que a aplicação é capaz de simular e estimar a quantidade de líquido em vazamentos de fluidos incompressíveis através de furos ou rupturas ao longo de um duto. Além disso, também são citados os três cenários de acidentes, os quais incluem vazamentos por furos de pequenos e médios diâmetros, bem como a ruptura total da tubulação considerando os seguintes aspectos:

- Diâmetro da tubulação;
- Pressão de operação;
- Perfil topográfico;
- Presença de válvulas de bloqueio ou de retenção;
- Propriedades hidráulicas do fluido;
- Característica da bomba;
- Queda de pressão ao longo da tubulação;
- Equipamentos utilizados.

Em relação aos modelos de simulação disponíveis, como apontado por DNV (2011), existem duas situações possíveis: operação com ou sem bombeamento. De forma que, segundo o autor, o primeiro modelo determina um cenário de lançamento de material com a tubulação em operação, ao passo que o segundo representa o duto completamente cheio, mas não operante durante o instante do acidente.

Logo, para DNV (2011), são necessários os seguintes parâmetros de entrada durante a execução das simulações: definições das bombas; do perfil da tubulação; de válvulas; propriedades do fluido; parâmetros de cálculo. Além disso, estes dados citados também incluem posicionamento de equipamentos ao longo da tubulação, em relação à distância da origem; tempos de fechamento e frequências de vazamento de válvulas; curvas características de bombas; pressão e velocidade de operação (DNV, 2011).

Segundo DNV (2011), a simulação resulta no cálculo das taxas de lançamento de material em função do tempo, e no montante de líquido derramado em qualquer posição do duto, possibilitando correlacionar este valor com a frequência de vazamentos. Também é citado como aplicação a identificação de pontos ótimos para a instalação de válvulas de bloqueio, com o objetivo de restringir o fluxo nos locais de maiores volumes de vazamento em cenários de acidentes. É interessante ressaltar que, de acordo com pesquisas diretas, o LIQSIM, além de corresponder a um módulo de simulação do *software* PHAST 6.7, foi descontinuado pela DNV *Digital Solutions* há alguns anos.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo são apresentados os principais aspectos da metodologia aplicada ao longo do desenvolvimento deste trabalho. Dessa forma, os assuntos abordados incluem o tipo de pesquisa; materiais e métodos; variáveis e indicadores; instrumentos de coleta de dados; tabulação de dados e, por fim, as considerações finais desta seção.

3.1 Tipo de pesquisa

De acordo com Creswell (2021), a abordagem de uma pesquisa consiste no planejamento e detalhamento de etapas envolvendo procedimentos, decisões, premissas, coletas e interpretação de dados. Portanto, o autor complementa que o resultado deste processo é identificação da forma mais adequada de conduzir o estudo de um determinado assunto. Dito isso, foram definidos três tipos de abordagem de pesquisa: qualitativa; quantitativa; e de métodos mistos (CRESWELL, 2021).

Segundo Creswell (2021), a pesquisa qualitativa é uma abordagem que consiste na exploração e entendimento de significado por meio de perguntas, procedimentos, análises indutivas e interpretações subjetivas. Por outro lado, aponta que a pesquisa quantitativa se dá por um viés teórico e objetivo o qual utiliza de instrumentos para aquisição de dados numéricos e análise de relações entre variáveis.

Para Gil (2019), a diferença entre as pesquisas quantitativa e qualitativa é evidenciada pelo fato de que a primeira é pautada em resultados numéricos ao passo que a segunda se dá por descrições verbais. Ressalta também o enfoque subjetivo, por parte da segunda, detalhe que proporciona análises mais complexas, já que também considera as perspectivas de um observador (GIL, 2019).

Por fim, com base na definição de Creswell (2021), a pesquisa de métodos mistos consiste na integração de dados qualitativos e quantitativos, de modo a ampliar as capacidades interpretativas dos resultados, em relação aos demais métodos isolados.

Logo, a pesquisa quantitativa foi a abordagem selecionada, uma vez que este trabalho consiste no cálculo estimado do volume de vazamento ao longo de um mineroduto para diferentes cenários de ruptura e uma posterior discussão dos resultados.

Além disso, Gil (2022), classifica as pesquisas de acordo com seus propósitos gerais, subdividindo-as em três categorias: exploratória, descritiva e explicativa. Dessa forma, define que a pesquisa exploratória busca aproximar fatos ou fenômenos por meio da elaboração de hipóteses e discussões sobre o tema. Já a descritiva, tende a correlacionar variáveis através da descrição e exposição, dissertando sobre o estudo de características de determinados grupos ou fenômenos e, até mesmo, definindo a natureza de relações. Por fim, a pesquisa explicativa investiga com maior detalhamento os aspectos da realidade através da identificação de fatores e a correlação destes com a determinação ou origem de fenômenos (GIL, 2022).

Portanto, o presente trabalho caracteriza-se como uma pesquisa explicativa, uma vez que pretende analisar e discutir diferentes cenários de ruptura da tubulação de um mineroduto. Assim, por meio da descrição detalhada de variáveis e a simulação de um modelo proposto, busca-se o entendimento do fenômeno ocasionado.

Lakatos e Marconi (2021) apresentam que as ciências, de maneira geral, utilizam de diversas estratégias para atingir seu objetivo. Diante disso, afirmam que as técnicas de pesquisa são instrumentos para possibilitar a análise dos objetos de estudo por meio da coleta de dados e de informações. De acordo com os autores, podem ser classificadas em diversas categorias, dentre elas as pesquisas documental, bibliográfica e experimental (LAKATOS e MARCONI, 2021).

Segundo Lakatos e Marconi (2021), a pesquisa documental tem como características a coleta de dados baseada, exclusivamente, em documentos (fonte primária) de origem pública, particular ou estatística. Já a pesquisa bibliográfica (fonte secundária), inclui materiais como publicações de livros, revistas, artigos científicos, teses sobre determinados objetos de estudo, entre outros. Para Gil (2022), a pesquisa experimental consiste na definição parâmetros de controle e observação dos resultados por meio da seleção e manipulação de variáveis que influenciam um determinado fenômeno.

Diante dos aspectos apresentados, este trabalho utilizará de recursos, bibliográficos e experimentais. Uma vez que, para a conclusão do estudo, foi necessária a revisão bibliográfica do tema abordado, bem como a utilização de simulações experimentais do objeto de estudo para a obtenção dos dados necessários.

3.2 Materiais e Métodos

A metodologia aplicada neste trabalho consiste no desenvolvimento das seguintes etapas, apresentadas pela Figura 10.

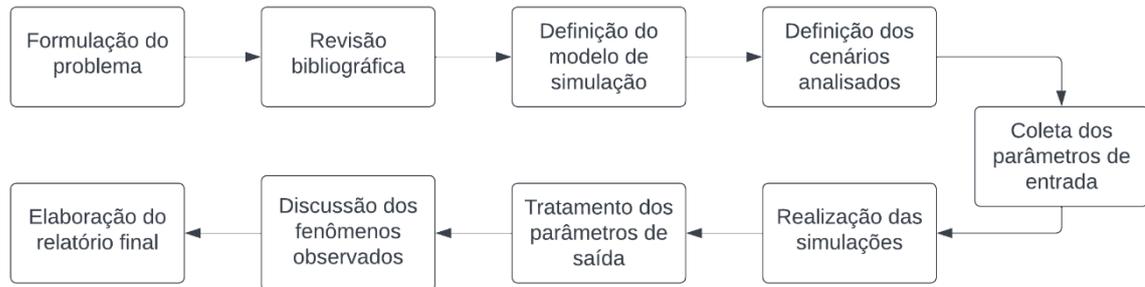


Figura 10: Fluxograma das etapas da metodologia de pesquisa.

Fonte: Pesquisa Direta (2022).

O fluxograma apresentado pela Figura 10 descreve as principais etapas definidas para a execução desta pesquisa. Inicialmente, a Formulação do Problema é desenvolvida no capítulo 1.1, resultando na pergunta problema a ser discutida. Em seguida, a Revisão Bibliográfica é apresentada ao longo do capítulo 2, proporcionando o estudo dos principais fundamentos necessários para a trabalho. As demais etapas serão discutidas nos tópicos seguintes sendo o capítulo 4 destinado para a Análise do fenômeno observado e, após a discussão dos resultados, a elaboração do relatório final da pesquisa.

3.2.1 Definição do modelo de simulação

A definição do modelo simulado, através do *software* LIQSIM, é uma etapa decisiva para o processo. É neste momento que serão estabelecidas as características fundamentais do mineroduto analisado, de forma que as definições adotadas influenciarão diretamente nos resultados obtidos pela simulação, ao passo que dizem respeito apenas às condições propostas pelo estudo. Diante disso, serão discutidos aspectos como: traçado da tubulação, perfil de elevação do duto; definições de diâmetro; posicionamento de válvulas, bombas e tanques; material transportado.

O sistema definido para este trabalho teve inspiração nos principais dutos de transporte de polpa de minério de ferro. Portanto, consiste em um mineroduto fictício, de longa distância, o qual interliga o sistema produtivo de regiões mineradoras no interior do país até cidades litorâneas para o escoamento da produção. Dessa forma, o duto analisado será submetido a diferenças de altitude ao longo do trajeto exigindo parâmetros operacionais específicos e estruturas como estações de válvulas e de bombeamento no percurso. A partir disso, foram detalhadas as principais especificações do ativo nos tópicos seguintes.

O perfil de elevação do mineroduto é utilizado como um dos parâmetros de entrada pelo LIQSIM para a avaliação das condições de relevo em que o duto foi instalado permitindo que, para cada ponto analisado, seja avaliada a altitude de tal localidade do mineroduto. Diante disso, o perfil de elevação foi definido e subdividido entre duas seções, conforme a Tabela 3.

Tabela 3: Intervalo das Seções do Perfil de Elevação.

Subdivisão	Intervalo (m)	
	Início	Fim
Seção 1	0	153637
Seção 2	153637	398805

Fonte: Pesquisa Direta (2022).

A Tabela 3, portanto, representa a necessidade de uma subdivisão do comprimento total do mineroduto por conta de limitações do software utilizado. Isso se dá, uma vez que ao longo da extensão total do duto há uma estação de bombas intermediária, contudo, o LIQSIM permite apenas a entrada de um parâmetro de bombeamento por simulação. Desse modo, a subdivisão entre seções marca a localização desta estação de bombeamento e o número de simulações necessárias para a avaliação integral do sistema. O perfil de elevação proposto é composto por 932 pontos na Seção 1 e 1177 na Seção 2. Também pode ser observado através da Figura 11.

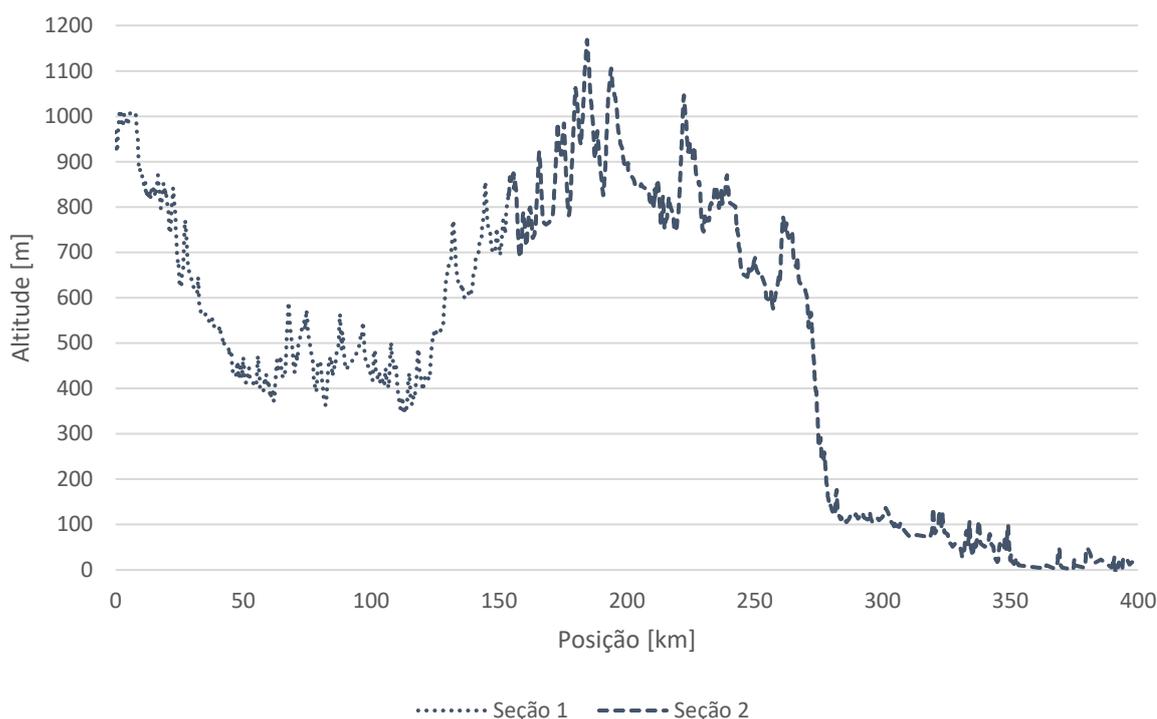


Figura 11: Perfil de Elevação do Mineroduto.
 Fonte: Pesquisa Direta (2022).

A Figura 11 remete à relação entre a posição em que o duto foi construído e sua respectiva altitude. É interessante mencionar sobre o comportamento da curva “Seção 2”, entre as posições de 250 e 300 km, o qual evidencia as condições geográficas da localização uma vez que a queda brusca de altitude está associada com a proximidade ao litoral brasileiro.

Como mencionado anteriormente, ao longo do duto há a disponibilidade de estações de bombas, estações de válvulas e o terminal. Essa condição se dá pela necessidade de controle de parâmetros operacionais específicos como o controle de pressões, bloqueio de operação, manutenção entre outros.

Diante disso, as EBs são responsáveis pelo bombeamento da polpa de minério de ferro desde a origem do duto até o terminal de recebimento, de modo que a Estação de Bombas I (EB I) realiza o bombeamento ao longo da Seção 1. Já a EB II promove o transporte pela Seção 2 atuando como estação intermediária e ampliando a capacidade de recalque até o trecho de altitude máxima. Além destes aspectos, a Estação de Válvulas I (EV I) e EV II atuam no bloqueio operacional para manutenção e como estação de orifícios no controle de pressões da tubulação, respectivamente. Por fim, o Terminal será o destino final da polpa, dispondo de uma válvula para o isolamento do sistema das demais instalações.

3.2.2 Definição dos cenários analisados

A seguir, após a definição do objeto de estudo, foram propostos alguns cenários para a discussão dos parâmetros de saída da simulação com o intuito de compreender o fenômeno observado. As situações sugeridas foram apresentadas pela Tabela 4.

Tabela 4: Análises e avaliações propostas para o modelo simulado.

Análise	Avaliação
Controle	Comportamento da ruptura do mineroduto em condições normais de operação
Visão Geral	Características de vazamento em função da variação de altitude ao longo do duto
Remoção de válvulas	Comportamento do mineroduto na ausência de válvulas de bloqueio
Tempo de detecção	Comportamento do mineroduto com a redução do tempo de detecção de vazamento
Inclusão de válvulas	Comportamento do mineroduto na presença de novas válvulas de bloqueio
Estudo comparativo	Desempenho das válvulas em diferentes cenários propostos
Otimização	Otimização dos benefícios da instalação de válvulas

Fonte: Pesquisa Direta (2022).

As simulações foram executadas e analisadas conforme critérios propostos na Tabela 4. Ou seja, inicialmente houve a definição de um cenário de controle com os parâmetros normais de operação e uma posterior comparação com o comportamento de diferentes condições de ruptura, com ou sem a presença de estações de válvulas. A partir disso, foi possível verificar o desempenho de cada uma destas análises comparativamente.

3.2.3 Coleta dos parâmetros de entrada

Para a realização de simulações através do *software* LIQSIM são exigidos uma série de parâmetros de entrada. De modo geral, o conteúdo abordado nesta etapa corresponde a uma análise mais detalhada do modelo de mineroduto proposto, uma vez que contempla as condições de operação e bombeamento, bem como as características específicas para a execução dos cálculos.

Também é válido ressaltar a possibilidade de calcular o volume de vazamento esperado baseado na frequência de ocorrência de acidentes na tubulação, de forma a atribuir um viés probabilístico aos resultados. Contudo, este não foi o tipo de análise explorada neste trabalho, tendo em vista a necessidade de um histórico de vazamentos para correlacionar as informações. Além disso, ainda que os parâmetros de frequência fossem exigidos para os cálculos estes foram arbitrados para a conclusão da simulação, já que o *software* permite gerar relatórios apenas com valores absolutos.

A Tabela 5 apresenta as principais características adotadas para o duto.

Tabela 5: Parâmetros da tubulação do mineroduto.

Tubulação		
Parâmetro	Valor	Unidade
ϕ_{interno}	0,38076	m
ϵ	0,0000508	m

Fonte: Pesquisa Direta (2022).

Conforme demonstrado pela Tabela 5, o diâmetro interno e a rugosidade são os parâmetros que definem a tubulação idealizada, influenciando diretamente nos cálculos de perda de carga e volume de material no interior do duto.

Em relação à Tabela 6, foram apresentadas as posições de cada instalação.

Tabela 6: Posição das estações ao longo do mineroduto.

Instalações		
Título	Posição	Unidade
EBI	0	m
EBII	153637	m
EVI	240298	m
EVII	273931	m
Terminal	398805	m

Fonte: Pesquisa Direta (2022).

As informações definidas na Tabela 6 representam a localização de cada instalação na tubulação. Em outras palavras, estes dados representam a posição, ao longo do duto, em que foram incluídas válvulas de bloqueio no sistema, tendo em vista que as Estações de Bombas também dispõem desse recurso. Ou seja, a Seção 1 dispões de válvulas na EB I e EB II, ao passo que a Seção 2 nas estações EB II, EV I e EV II. A Tabela 7 reúne as características destas válvulas.

Tabela 7: Parâmetros das válvulas.

Válvulas		
Parâmetro	Valor	Unidade
$t_{\text{Detecção}}$	900	s
Tipo	Bloqueio	-

Fonte: Pesquisa Direta (2022).

A Tabela 7 também reúne outras informações relevantes além da localização dos equipamentos. Além disso, todas as válvulas definidas no modelo são do tipo “bloqueio” e o tempo de desligamento do sistema foi estabelecido como 900 s para todos os casos. Dessa forma, Compreende-se por tempo de detecção ($t_{\text{Detecção}}$) a duração total para que a válvula esteja completamente fechada, incluindo o tempo gasto para a detecção e reação do operador, bem como o intervalo para o acionamento completo de todos os atuadores para a operação remota.

Em sequência, a Tabela 8 reúne as informações sobre as bombas.

Tabela 8: Parâmetros das bombas centrífugas.

Bomba de Carga		
Parâmetro	Valor	Unidade
Posição	EBI; EBII	-
$P_{\text{Operação}}$	318716	Pa
$V_{\text{Líquido}}$	1,54	m/s
$t_{\text{Desligamento}}$	180	s

Fonte: Pesquisa Direta (2022).

Como citado, a Tabela 8 traz importantes características das bombas centrífugas em operação. Dentre elas, foi citado que a localização é correspondente às Estações de Bomba I e II, de modo que cada estação dispões de uma bomba. Além disso as duas bombas correspondem às mesmas especificações de pressão, velocidade do líquido e tempo de desligamento. A Tabela 9 complementa as informações com a curva característica.

Tabela 9: Curva simplificada da bomba.

Curva Simplificada		
Pontos	P [Pa]	v [m/s]
1	0	5,52
2	245166	2,95
3	274586	2,44
4	323619	1,22
5	333426	0

Fonte: Pesquisa Direta (2022).

A Tabela 9 traz um apanhado de cinco pontos obtidos por meio da curva característica das bombas centrífugas selecionadas. Ou seja, a curva característica simplificada é a forma proposta pelo LIQSIM de inserir as informações de operação, utilizando uma relação de pressão de saída e velocidade do fluido.

A seguir, as dimensões dos tanques de armazenamento são apresentadas pela Tabela 10.

Tabela 10: Parâmetros dos tanques de armazenamento.

Tanques				
Parâmetro	A	B	C	Unidade
Altura	54,8	13,7	27,4	m
$A_{\text{Seção}}$	274,65	274,65	274,65	m ²

Fonte: Pesquisa Direta (2022).

De acordo com a Tabela 10, foram considerados três tanques equivalentes ao longo de todo o mineroduto, de forma que o Tanque A, localizado na EBI, corresponde a 4 tanques de 13,7 m de altura; o Tanque B, na EBI, equivalente ao volume de apenas 1 tanque; e o Tanque C, no Terminal, equivalente a 2 tanques. Todos os tanques possuem o mesmo diâmetro, logo a mesma área da seção transversal.

A Tabela 11 aponta as principais características do fluido de trabalho.

Tabela 11: Propriedades físicas do fluido.

Propriedades físicas		
Parâmetro	Valor	Unidade
ρ	2196,53	kg/m ³
μ	0,01825	Pa.s
P_{vapor}	3173,02	Pa

Fonte: Pesquisa Direta (2022).

A Tabela 11 detalha algumas propriedades físicas adotadas para a polpa de minério de ferro como a massa específica do material, viscosidade dinâmica e a pressão de vapor.

As condições de contorno definidas para a simulação foram abordadas nas tabelas seguintes. Portanto, a Tabela 12 corresponde às características de cada tipo de vazamento.

Tabela 12: Parâmetros de vazamento.

Vazamentos		
Categoria	Diâmetro	Unidade
Pequeno	0,019	m
Médio	0,076	m

Fonte: Pesquisa Direta (2022).

Como já mencionado, o *software* LIQSIM considera três cenários de vazamento (Pequeno, Médio e Ruptura). Dessa forma a Tabela 12 traz informações sobre o diâmetro adotado para cada furo nos cenários de pequeno e médio vazamento, de modo que estes valores foram obtidos conforme a recomendação do manual, sendo 5% do diâmetro interno para o primeiro caso e 20% para o segundo. Para o cenário de ruptura da tubulação o diâmetro do furo é considerado como o valor do diâmetro interno da tubulação. Por fim, a Tabela 13 aborda as últimas informações necessárias para iniciar a simulação.

Tabela 13: Parâmetros de cálculo.

Parâmetros de Cálculo		
Parâmetro	Valor	Unidade
Distância	1000	m
$t_{Máx}$	86400	s
Não operando	0,025	-
Operando	0,975	-

Fonte: Pesquisa Direta (2022).

A Tabela 13 expõe as condições de contorno definidas para os cálculos, como a distância entre os intervalos calculados sendo a cada quilômetro um novo cálculo e o tempo máximo de vazamento ($t_{Máx}$), considerando apenas os volumes derramados durante um dia. As linhas seguintes dizem respeito à fração do tempo em que o duto se encontra fora de operação ou operando, correlacionado à disponibilidade física do ativo.

3.2.4 Realização das simulações e tratamento de dados

As etapas finais deste processo compreendem a simulação do sistema proposto por meio do *software* LIQSIM e o posterior tratamento dos parâmetros de saída obtidos.

Em outras palavras, após a definição do modelo estudado e a definição de todos os parâmetros necessários será possível executar a simulação numérica de ruptura em um duto de transporte. Com isso, o programa retornará o relatório de cada cenário proposto, exigindo um tratamento e tabulação dos dados gerados a fim de possibilitar análises quantitativas por meio de gráficos estratégicos, os quais foram discutidos no capítulo seguinte.

3.3 Variáveis e Indicadores

De acordo com Lakatos e Marconi (2021), uma variável pode ser definida como: classificação ou medida; quantidade variável; conceito operacional; propriedade ou fator; objeto de estudo e passível de mensuração. Além disso, variáveis podem adquirir valor científico quando interagem com outras variáveis, fazendo parte de teorias ou hipóteses [SAMPIERI *et al apud* LAKATOS E MARCONI, 2021].

Para Gil (2019), indicadores podem ser definidos como elementos, os quais são observáveis e permitem a definição e quantificação empírica de um determinado conceito. O autor também cita a dificuldade de seleção de indicadores, uma vez que existem inúmeras possibilidades para uma mesma variável, exigindo do pesquisador a seleção daqueles mais adequados ao cenário analisado.

Dito isso, as variáveis e indicadores utilizados neste trabalho estão apresentadas na Tabela 14.

Tabela 14: Variáveis e indicadores.

Variável	Indicador
Volume de vazamento	Parâmetros operacionais
	Características do Mineroduto
	Posição
	Válvulas instaladas
Válvulas	Tempo de detecção
	Pontos de interesse
	Quantidade de válvulas
	Posição de válvulas
	Desempenho de válvulas
	Zona de influência

Fonte: Pesquisa Direta (2022).

3.4 Instrumento de coleta de dados

A coleta de dados desta pesquisa consistiu na avaliação de relatórios gerados pelo *software* LIQSIM resultantes da simulação de vazamento em um mineroduto. Portanto, os dados obtidos dizem respeito aos parâmetros de saída retornados pelo modelo numérico.

3.5 Tabulação dos dados

Em relação à tabulação dos dados deste trabalho foram utilizados os *softwares* Microsoft Excel para a execução de cálculos, elaboração de gráficos e tabelas auxiliares; além do Microsoft Word para as anotações e criação de materiais de apoio ao estudo.

3.6 Considerações finais do capítulo

Este capítulo, portanto, teve o objetivo de apresentar a metodologia aplicada para o desenvolvimento das simulações de vazamento em um duto de transporte de polpa. Dessa forma foram definidas as ferramentas utilizadas na pesquisa, variáveis e indicadores do objeto de estudo. Em seguida, a análise e discussão dos resultados obtidos durante o processo de simulação e avaliação do fenômeno foram apresentados no capítulo em sequência.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo foram apresentados e discutidos os resultados das simulações dos diversos cenários de ruptura propostos. Dentre eles, foram analisadas as condições de controle; visão geral do mineroduto; retirada de válvulas; influência do tempo de detecção; inclusão de válvulas; estudo comparativo; e otimização de resultados.

4.1 Condição normal de operação

Após a apresentação e detalhamento do modelo proposto para as simulações foi possível executar os cálculos necessários e compilar os dados para a análise. Diante disso, foram discutidos os cenários de acidente para o duto de acordo com as condições normais de operação. A Figura 12 ilustra os resultados pelo *software* LIQSIM para a Seção 1.

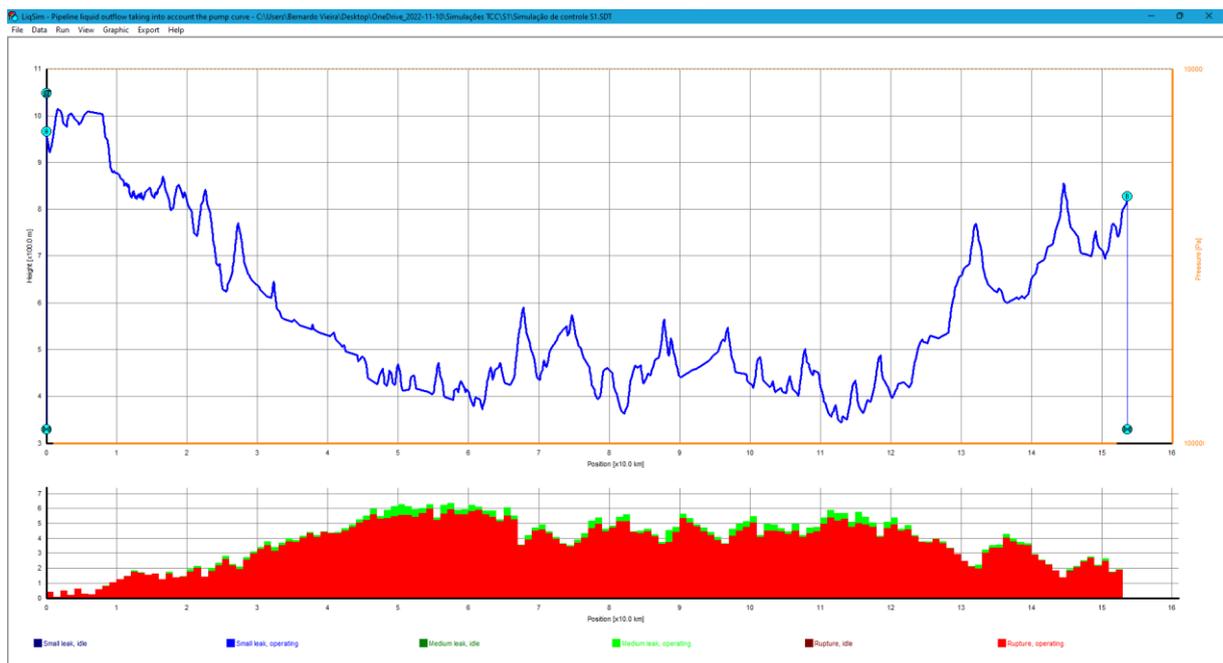


Figura 12: Figura ilustrativa da janela de exibição dos resultados da Seção 1 no LIQSIM.

Fonte: Pesquisa Direta (2022).

A Figura 12 é uma captura de tela meramente ilustrativa da interface do LIQSIM após a conclusão da simulação, de modo que exibe o perfil de elevação do modelo analisado com os principais elementos da tubulação como bombas centrífugas, válvulas e tanques de origem e destino. Além disso, logo abaixo é apresentado o gráfico referente à quantidade de material, em massa, derramada para os três cenários de acidente. O *software* também possibilita outras formas gráficas para a análise dos resultados, contudo estes recursos disponíveis não permitem uma fácil manipulação dos dados e nem uma visualização clara, conforme o exemplo. Já a Figura 13 representa a simulação para a Seção 2.

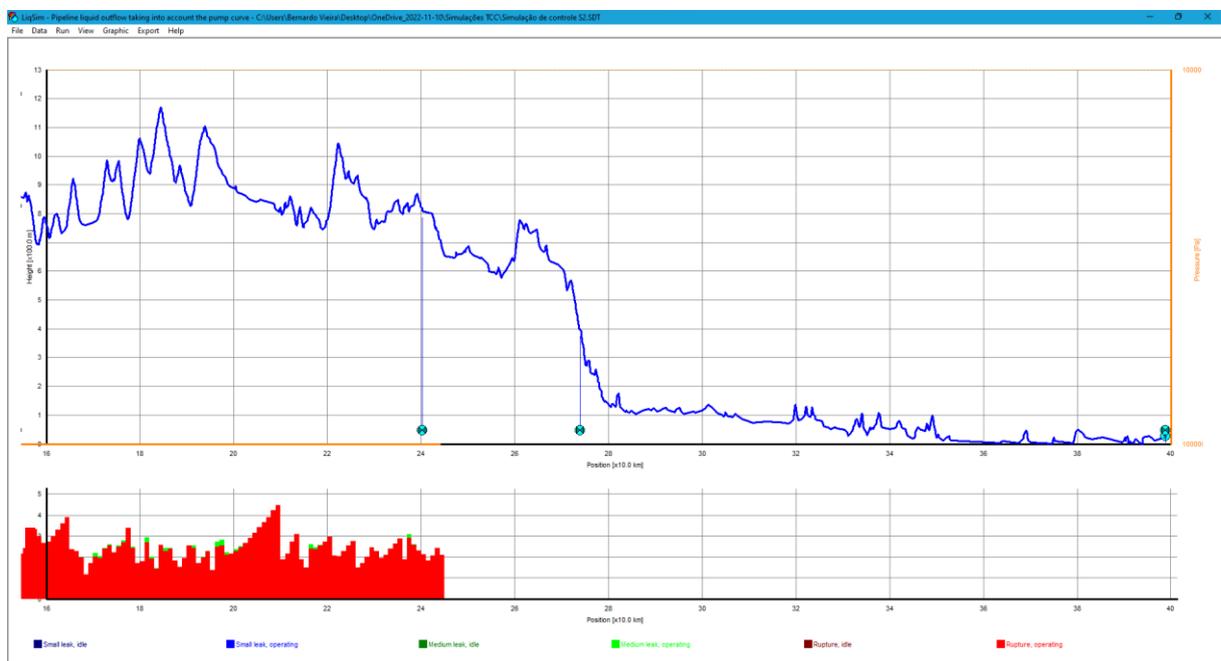


Figura 13: Figura ilustrativa da janela de exibição dos resultados da Seção 1 no LIQSIM.
Fonte: Pesquisa Direta (2022).

Em relação à Figura 13 pode-se dizer que o cenário é semelhante, já que os mesmos elementos gráficos são exibidos na tela. Além disso, confirma a afirmação anterior de que a visualização dos dados através do LIQSIM é prejudicada, principalmente pelos defeitos visuais que ocorreram na simulação da Seção 2, bem como a sobreposição de barras no gráfico de vazamento de massa e relatórios exportados no formato de texto.

Por conta disso, foi realizado um tratamento dos dados através do Excel com o intuito de melhorar a qualidade gráfica das análises, resultando nos próximos gráficos que foram apresentados em sequência. Diante disso, a Figura 14 representa os mesmos resultados obtidos pela Figura 12 após o tratamento dos dados.

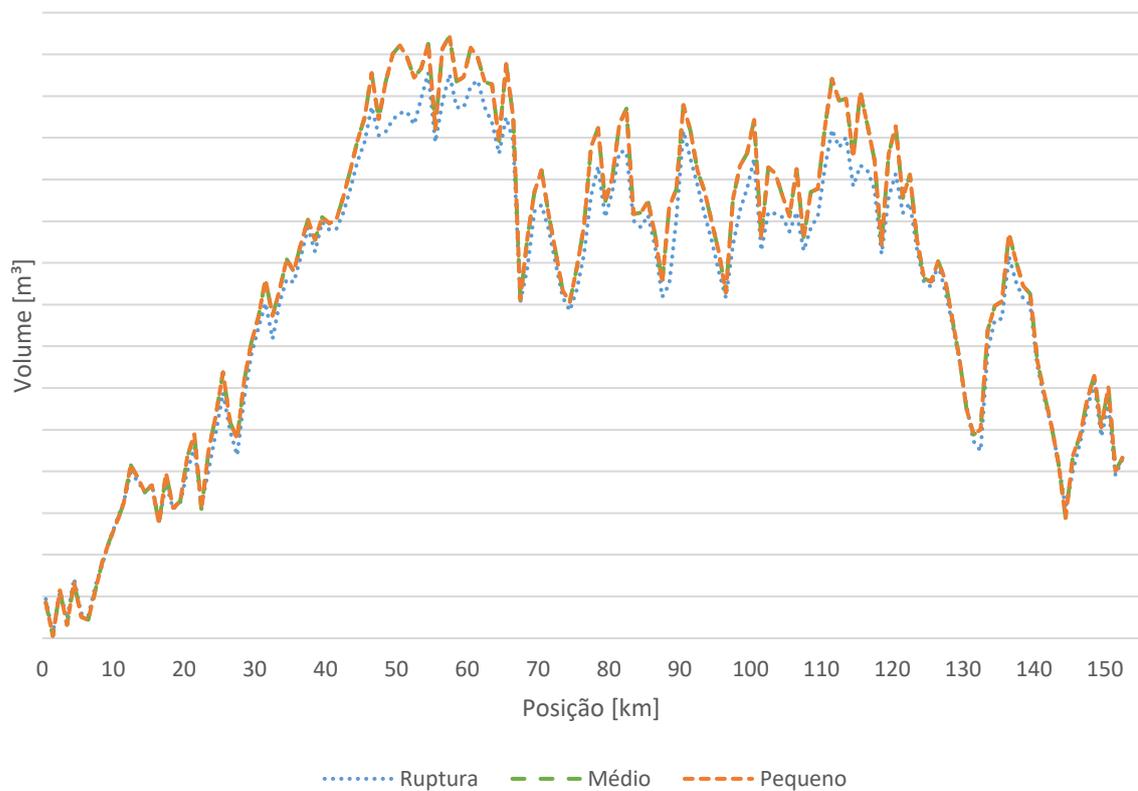


Figura 14: Volume de material vazado nos cenários de pequeno e médio vazamento e ruptura durante operação para a Seção 1.
Fonte: Pesquisa Direta (2022).

Portanto, a condição de acidente para a Seção 1 do mineroduto proposto, durante operação, tem seu comportamento representado pela Figura 14. Ou seja, os dados retornados pela simulação contemplam os cenários pequenos e médios vazamentos e ruptura, tanto para a condição de operação quanto para o duto inoperante. Por outro lado, ainda que sejam disponibilizadas estas três circunstâncias, foi considerado apenas o cenário de ruptura para as análises posteriores.

Também é válido ressaltar que a escala do eixo “Volume [m³]” foi retirada, uma vez que o principal objetivo deste trabalho é verificar o desempenho novas válvulas no sistema e não quantificar, em volume, os possíveis impactos causados pelo empreendimento. Dessa forma, é possível discutir oportunidades de melhorias ao passo que respeita o grau de confidencialidade desse tipo de informações, resguardando os interesses privados de empresas do ramo.

Analogamente à Figura 14, a Seção 2 também pode ser representada pela mesma configuração proposta, ou seja, o comportamento do vazamento para os três cenários possíveis na seção seguinte. Contudo, foi proposta uma nova composição das informações para a otimização dos gráficos, conforme a Figura 15.

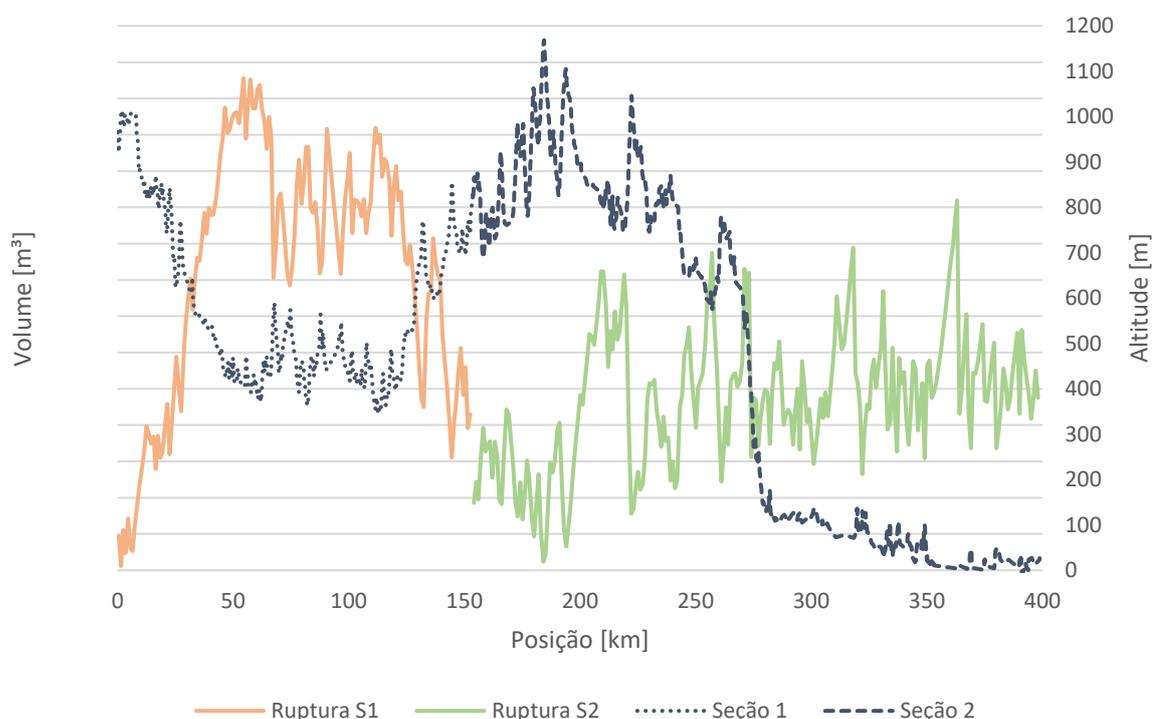


Figura 15: Correlação entre o volume de vazamento e o perfil de elevação, em caso de ruptura do duto. Fonte: Pesquisa Direta (2022).

A Figura 15 proporciona uma visualização mais ampla do comportamento de todo o mineroduto em caso de ruptura da tubulação, uma vez que o gráfico contempla a união dos resultados de ambas as seções do duto, ao passo que são correlacionados com o perfil de elevação. Dessa forma, este conjunto de informações permite uma avaliação mais assertiva dos pontos de interesse, em cada região, ao longo da extensão total.

Também é interessante ressaltar que as maiores incidências de volume de vazamento elevado estão diretamente atreladas às condições relevo regional. Isso se dá, uma vez que as regiões de vale e cotas mais baixas tendem a acumular o material derramado das regiões de maior altitude, resultando nos pontos de interesse deste trabalho.

Por exemplo, entre as posições de 50 a 100 km estão localizados os pontos de volume de vazamento mais expressivos, isso se dá por conta das elevadas altitudes a montante e a jusante. Portanto, haverá a atuação de toda a pressão estática das regiões de 0 a 50 km e 100 a 150 km no ponto de ruptura do duto, promovendo o derramamento de todo o material contido na tubulação ao longo destes comprimentos.

Analogamente, a região de 300 a 400 km também recebe a atuação da pressão de coluna de polpa acumulada a montante e, em caso de acidente, derramaria todo esse volume de material acumulado em 100 km de tubulação. Por outro lado, esta mesma consideração também é válida para as regiões de maiores altitudes, como as proximidades do ponto 200 km. Contudo, por conta do menor acúmulo de polpa no interior do trecho e de pressão hidrostática, durante a ocorrência de rupturas, o vazamento será moderado.

Outra importante observação acerca da Figura 15 é a descontinuidade entre as curvas “Ruptura S1” e “Ruptura S2”. Essa condição ressalta a divisão em duas seções por conta das limitações do *software*, de modo que as Seções 1 e 2 possam ser tratadas como minerodutos independentes. Portanto, o bombeamento da Seção 1 tem como destino o tanque da EB II, isolando o sistema das pressões hidrostáticas exercidas da posição 150 km até o ponto de maior altitude.

4.2 Remoção de válvulas do modelo

A avaliação do comportamento do sistema sem a disponibilidade de válvulas de bloqueio é uma forma de ressaltar o impacto positivo que as EVs exercem na mitigação dos riscos do mineroduto. Isso se dá, uma vez que as estações de válvula têm capacidade de retenção da polpa acumulada à montante, além da redução da pressão estática atuante nos pontos à jusante.

É importante ressaltar que o cenário anterior, descrito no tópico 4.1, é referente às condições normais de operação do duto, de modo que, na maior parte do tempo, não há obstrução da passagem de fluxo por meio das válvulas existentes. Em outras palavras, haverá bombeamento contínuo de polpa durante um vazamento, incrementando o volume de material derramado, até que este seja propriamente identificado e ações de mitigação sejam tomadas. Esta discussão pode ser exemplificada pela Figura 16.

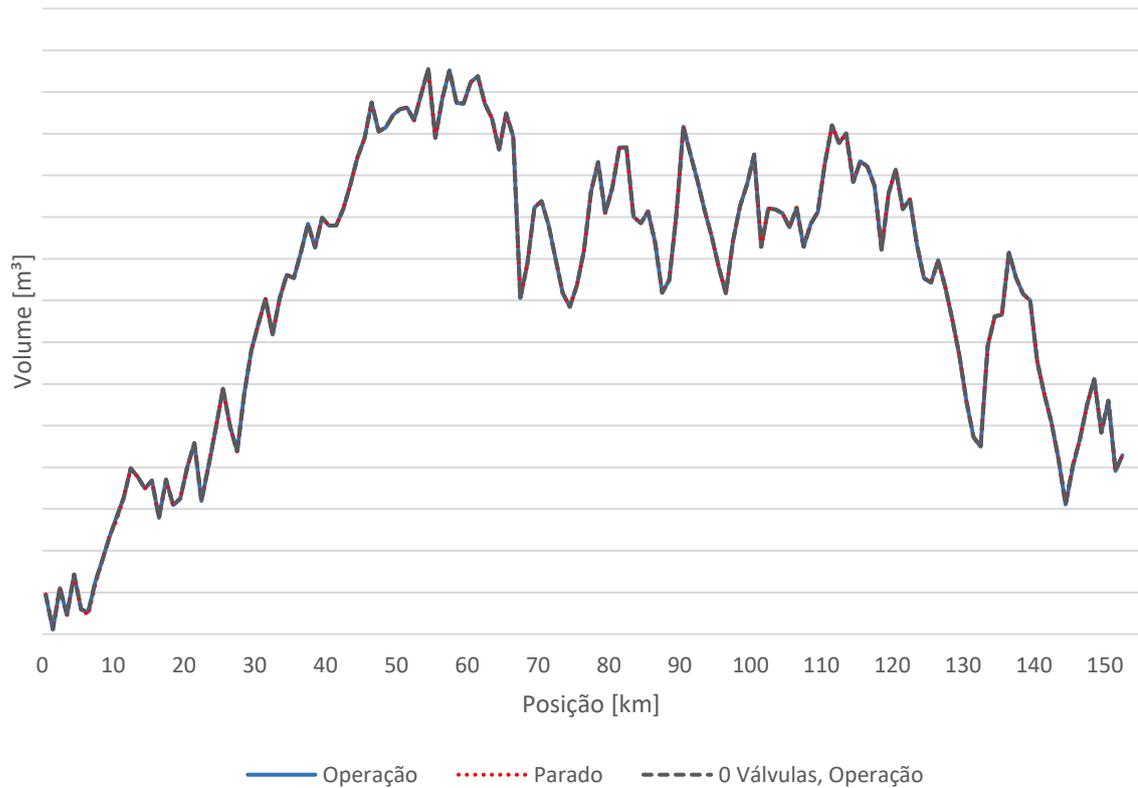


Figura 16: Cenários de ruptura da Seção 1 operante, inoperante e operação sem válvulas.
 Fonte: Pesquisa Direta (2022).

O caso apresentado na Figura 16 traz uma interessante abordagem, de acordo com o gráfico é possível perceber que as três curvas são coincidentes. Em outras palavras, o volume de vazamento na Seção 1 tende a se manter equivalente com o duto em operação; com a linha inoperante e as válvulas fechadas; e em operação sem a presença de válvulas instaladas.

Este comportamento é justificado pelo fato de que as válvulas presentes no sistema foram posicionadas nas extremidades do modelo, nas EB I e II. Portanto, por conta da localização, proporcionam apenas o isolamento dos tanques e não a retenção de material no interior da tubulação durante vazamentos. Tal condição, em termos de redução do volume vazado, ressalta uma possibilidade de melhoria do sistema com a inclusão de uma nova estação de válvulas intermediária, a qual foi discutida no tópico 4.4.1.

Por outro lado, a Figura 17 apresenta o cenário da Seção 2.

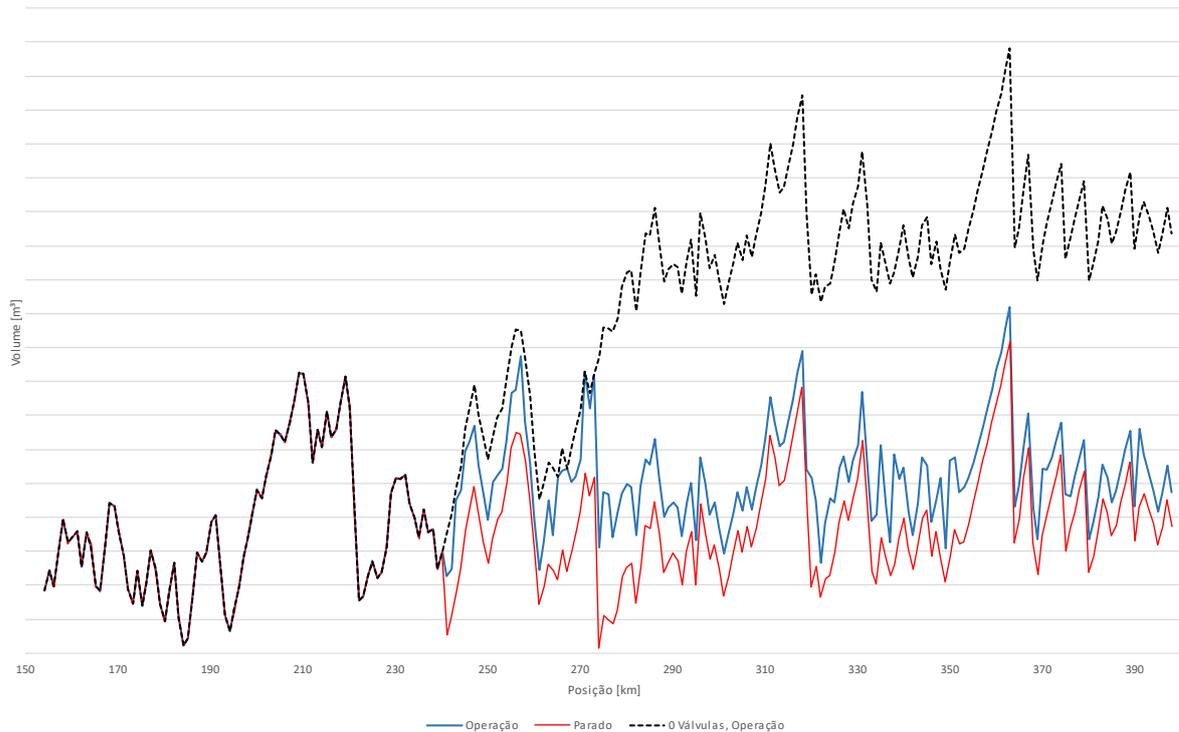


Figura 17: Cenários de ruptura da Seção 2 operante, inoperante e operação sem válvulas. Fonte: Pesquisa Direta (2022).

Para o caso da Seção 2, representado pela Figura 17, os diferentes cenários propostos comportam-se de formas distintas. Comparando as curvas “Operação” e “0 Válvulas, Operação” é nítida a influência das EV I e II, uma vez que, a partir de 240 e 270 km houve um crescimento significativo no volume de polpa vazada quando retiradas as válvulas de bloqueio. Essa condição coincide com a região de grande queda na altitude, apresentado pela Figura 15, visto a aproximação ao litoral. Além disso, a variação significativa de volume exigiu ajuste na escala do gráfico para contemplar este acréscimo.

É importante ressaltar também que a curva “Parado” apresenta o melhor desempenho na redução de derramamento de polpa, uma vez que a restrição do fluxo independe do tempo de detecção do vazamento. Desse modo, há a garantia de que não haverá bombeamento de material durante a ocorrência do acidente, minimizando os efeitos verificados.

4.3 Influência do tempo de detecção

Como mencionado anteriormente, o tempo de detecção foi definido como parâmetro de entrada para a simulação. Portanto, representa o tempo total gasto para a identificação da ocorrência de vazamento e o desenvolvimento dos procedimentos de desligamento de bombas e fechamento de válvulas. Diante disso, foi proposta uma redução do tempo inicial de 900 s para 600 s na Seção 2. Os resultados podem ser observados na Figura 18.

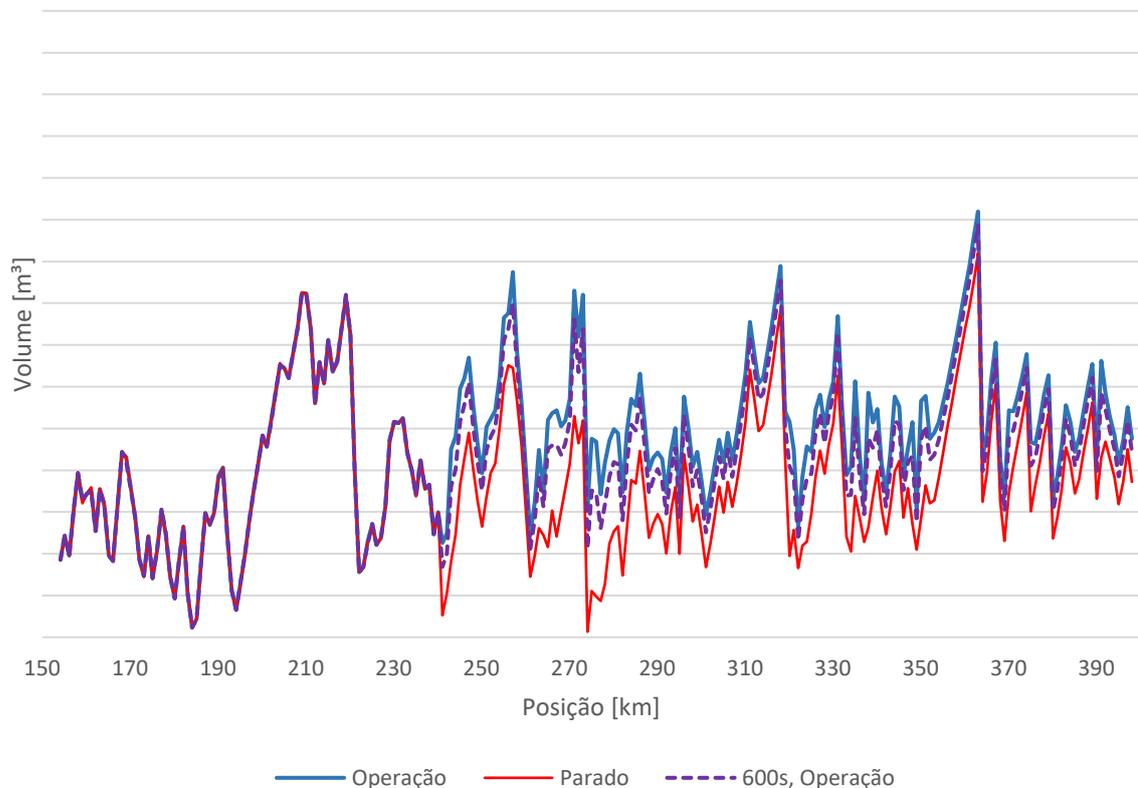


Figura 18: Cenários de ruptura da Seção 2 operante, inoperante e operação com tempo de detecção de 600s.

Fonte: Pesquisa Direta (2022).

Os resultados obtidos com a redução do tempo de detecção, apresentado na Figura 18, foram coerentes com as demais discussões até o momento. Primeiramente, as três curvas coincidiram até a posição de 240 km e, a partir dela, podem ser observados os efeitos de redução proporcionado pelas válvulas.

Dito isso, a curva “600s, Operação” permite observar que a redução de 300 s influenciou em melhor desempenho em relação às condições originais, tendo em vista o ganho de agilidade na mitigação dos impactos de bombeamento durante o acidente. Além disso, esta mesma curva também indica uma tendência de convergência com a curva “Parado”, já que a constante redução no tempo de detecção tende a uma reação “instantânea” (0 segundos).

Em outras palavras, o mineroduto inoperante, na condição de válvulas fechadas, desempenha a máxima redução de vazamento, confirmando a hipótese discutida na Figura 17. Portanto, este critério foi adotado como comparativo para as avaliações em sequência.

4.4 Inclusão de válvulas ao modelo

Uma vez identificadas oportunidades de melhoria no sistema proposto, foram analisados diferentes cenários com a inclusão de válvulas no sistema. Portanto, o objetivo deste capítulo é analisar e discutir o comportamento e desempenho, na retenção de volume de vazamento, de possíveis estações de válvulas em pontos de interesse propostos.

4.4.1 Válvulas na Seção 1

De acordo com os resultados apresentados pela Figura 15, foi possível identificar que as posições 50, 60, 90 e 110 km representam os maiores volumes de vazamento da Seção 1. Além disso, tais localidades estão situadas em altitudes mais baixas e, conseqüentemente, sujeitas aos efeitos de pressões estáticas de regiões mais altas. Por conta disso, configuram-se como pontos de interesse para essa discussão, uma vez que estas regiões sugerem a possibilidade de redução de volume de vazamento com a instalação de novas válvulas.

Em seguida, foram realizadas quatro simulações de ruptura com a inclusão de uma nova estação de válvulas para as respectivas posições, com o duto fora de operação. Em seguida, os resultados foram comparados com o comportamento do mineroduto inoperante, tendo em vista que este foi definido como o cenário de máxima redução de vazamento possível em condições normais. A Figura 19 exemplifica este comentário.

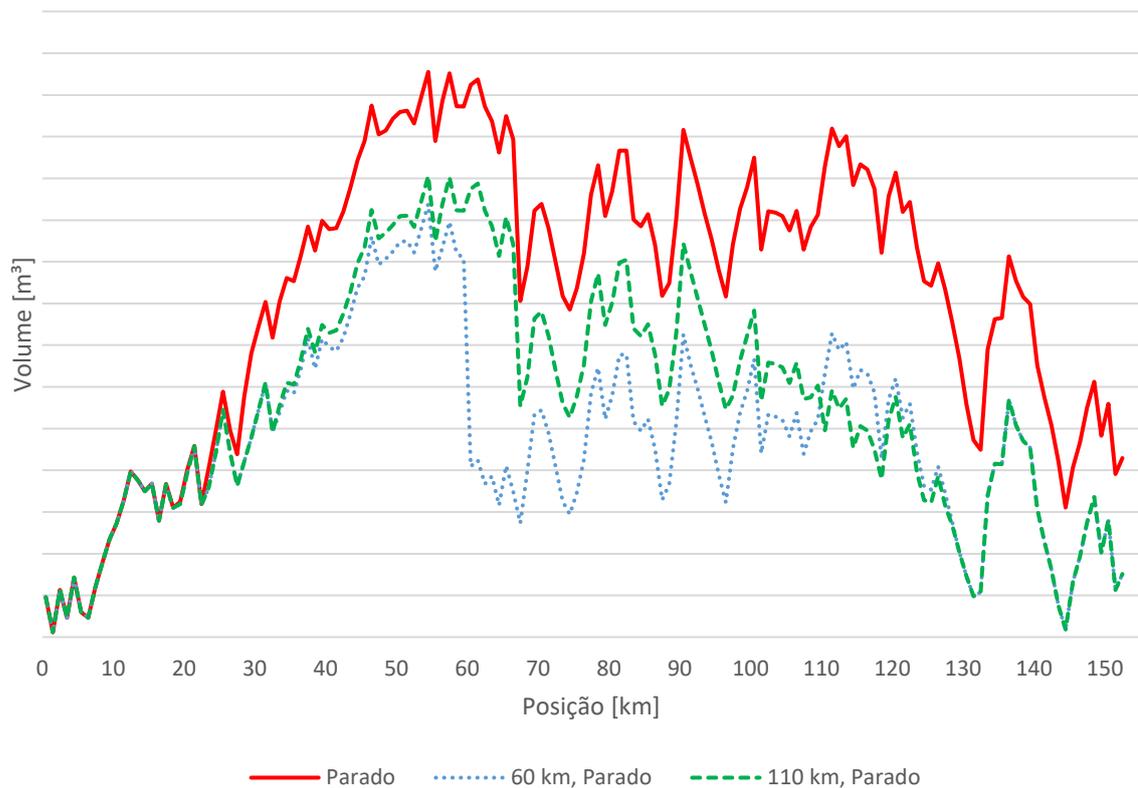


Figura 19: Cenários de ruptura da Seção 1 inoperante: controle, válvulas nas posições 60 km e 110 km. Fonte: Pesquisa Direta (2022).

Portanto, a Figura 19 compara cenários de ruptura, fora de operação, nas condições de controle e válvulas nas posições 60 e 110 km. Diante disso, é evidente que em cada um dos novos cenários houve a possibilidade de redução do vazamento. Contudo, é interessante observar que existem determinadas regiões em que a influência dessas EVs é mínima ou nula, como o trecho de 0 a 30 km.

Além disso, a curva “60 km, Parado” desempenha os melhores resultados na maior parte da seção, com exceção da extensão de 110 a 150 km em que apresenta reduções inferiores ou equivalentes à curva “110 km, Parado”. Tal condição supostamente indica que a EV tende a performar melhor próximo à sua posição de origem. Ou seja, a estação implica em maiores reduções de volume, naquela localidade, quando comparada com EVs em outras posições. Os demais pontos de interesse foram contemplados na Figura 20.

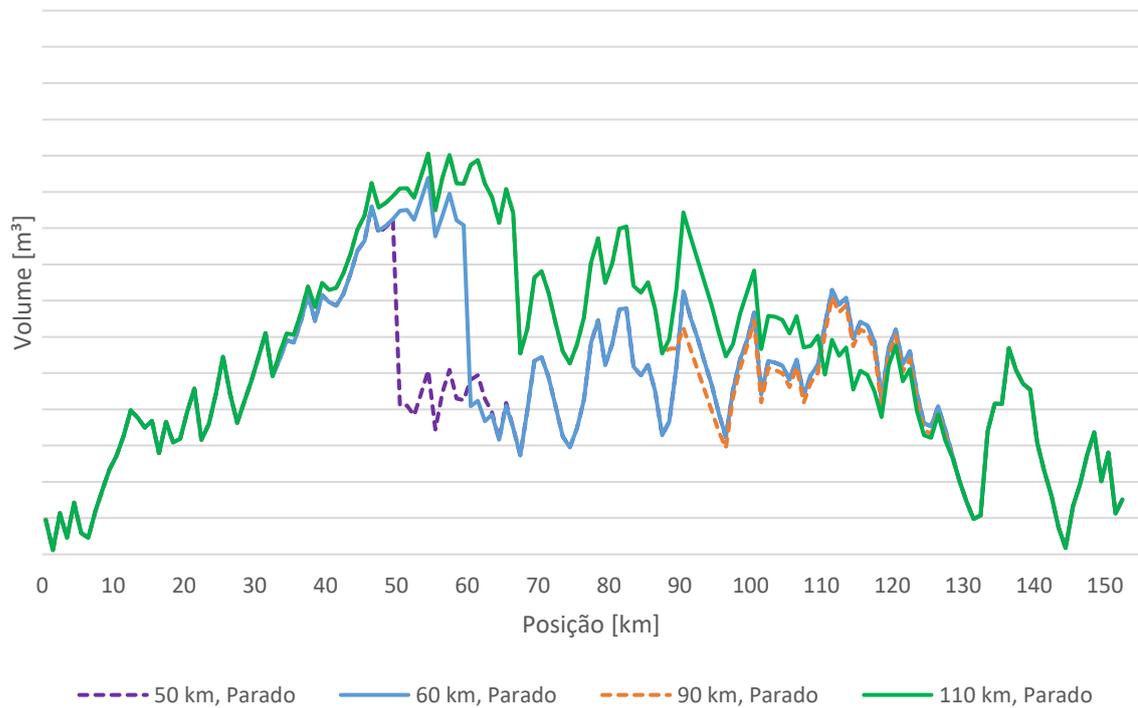


Figura 20: Cenários de ruptura da Seção 1 inoperante: válvulas nas posições 50, 60, 90 e 110 km.
Fonte: Pesquisa Direta (2022).

Logo, a Figura 20 reúne os quatro cenários propostos para a Seção 1. Portanto, a partir da comparação destes casos é possível identificar que as válvulas nas posições de 50 e 90 km ainda registram ganhos para o sistema.

Analisando individualmente, pode-se dizer que a curva “50 km, Parado” tem comportamento similar à “60 km, Parado” durante longas extensões, mas antecipa grandes reduções próximas à sua localização. Analogamente, a curva “90 km, Parado” também atua de forma parecida com a “110 km, Parado” além de desempenhar melhor entre as posições de 90 a 110 km.

Contudo, é possível observar que, ainda que estes novos cenários apresentem melhorias, as maiores reduções de volume de vazamento nos pontos 50, 60, 90 e 110 km são representadas pelas válvulas nos respectivos pontos de interesse. Assim, corroborando com a afirmação de que cada estação de válvula performa melhor na sua zona de influência. Com o intuito de sintetizar as discussões anteriores a Figura 21 traz uma nova abordagem dos dados.

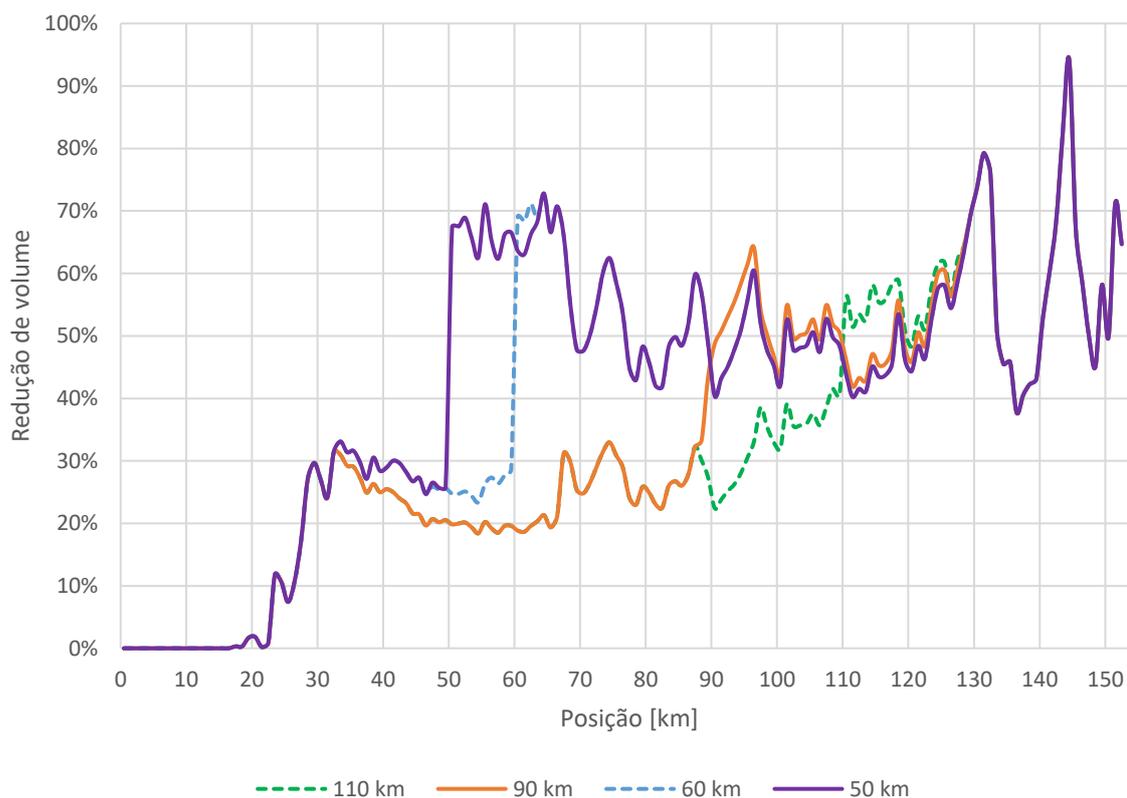


Figura 21: Redução do volume de vazamento: válvulas nas posições de 50, 60, 90 e 110 km.
Fonte: Pesquisa Direta (2022).

A Figura 21 surge como uma alternativa para avaliação do desempenho de cada condição proposta para o mineroduto. A partir disso, correlaciona a redução de volume de polpa derramada, em relação ao cenário de controle, em função da posição.

Portanto, é possível notar que a válvula na posição de 110 km apresentou o pior desempenho geral, em relação às demais, e o melhor desempenho local na sua zona de influência (110 a 130 km). Analogamente, a curva “90 km” desempenhou ganhos superiores no trecho de 90 a 110 km e melhores reduções locais, quando comparado à “60 km”, entre as posições de 100 a 130 km.

Por fim, como já mencionado, a inclusão de uma válvula na posição 50 km representa ganhos significativos para o sistema, sendo reduções superiores a 60% nos trechos de 50 a 70 km. Além disso, apresenta o melhor desempenho geral dentre as quatro propostas, com ênfase no trecho de 50 a 65 km o qual performa consideravelmente melhor do que a curva “60 km”.

4.4.2 Válvulas na Seção 2

Analogamente ao item 4.4.1, de acordo com a Figura 15, foram selecionadas as posições de 200, 210, 280 e 300 km como pontos de interesse para a Seção 2. Portanto, uma vez identificadas oportunidades de atuação, foram realizadas quatro simulações de ruptura com a inclusão de uma nova estação para as respectivas posições. Em seguida, os resultados também foram comparados com o duto inoperante para efeito de controle. Portanto, a discussão é exemplificada pela Figura 22.

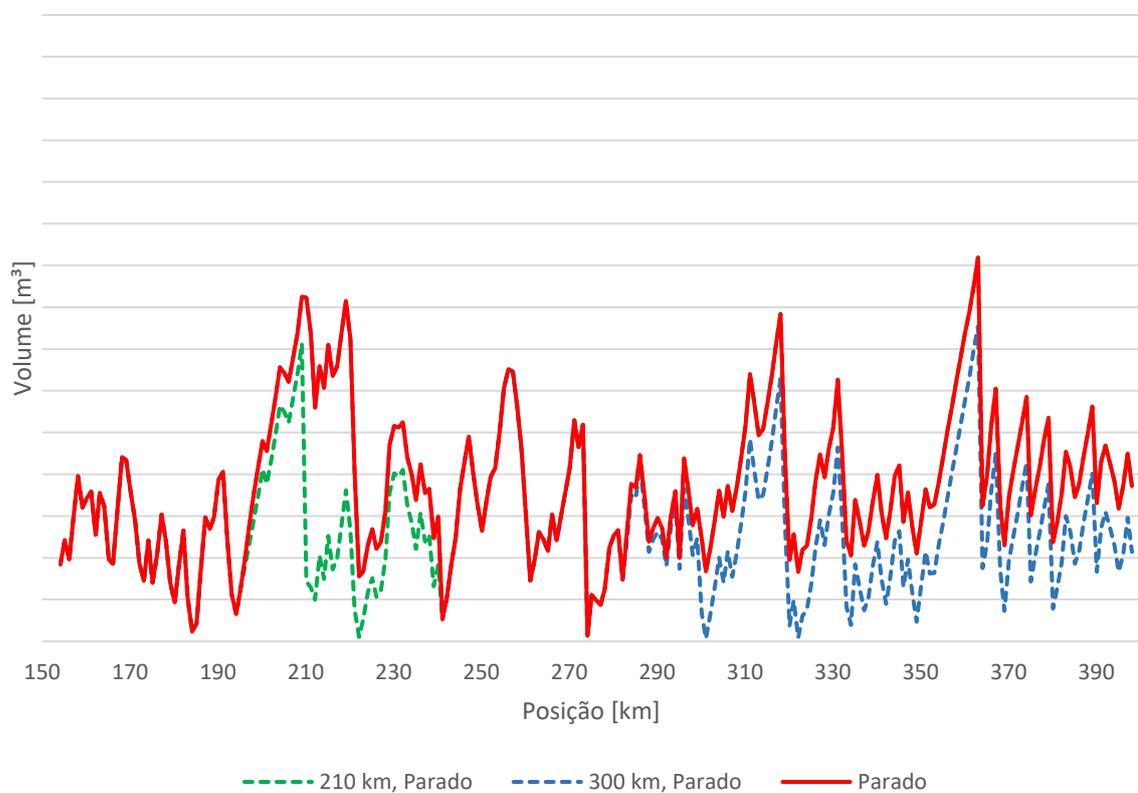


Figura 22: Cenários de ruptura da Seção 2 inoperante: válvulas nas posições 210 km e 300 km.
Fonte: Pesquisa Direta (2022).

Na Figura 22, foram comparados os cenários de ruptura, fora de operação, nas condições de controle e válvula nas posições 210 e 300 km. Diante disso, é evidente que houve redução do volume de vazamento, ainda que a amplitude seja menor do que a Seção 1. Contudo, assim como na Figura 19, existem regiões que são pouco influenciadas pelas EVs como os trechos de 150 a 200 km e 240 a 280 km.

Analisando cada caso, temos que a curva “210 km, Parado” demonstra redução moderada próximo à sua zona de influência (200 a 240 km), além de quase não interferir nos demais trechos da tubulação. Por outro lado, “300 km, Parado” influencia uma região de maior extensão (290 a 400 km), uma vez que atua na retenção de pressões estáticas a montante, mas ainda assim representa pouca amplitude em relação ao cenário de controle.

O comportamento descrito pode ser justificado por conta da presença de duas Estações de Válvulas na Seção 2, de modo que a maior parte do potencial de retenção de material já seria desempenhado pelas estações operantes. Dessa forma, corrobora com a hipótese de que os ganhos para o processo são contínuos, porém em gradientes menores. A Figura 23 exemplifica novos cenários.

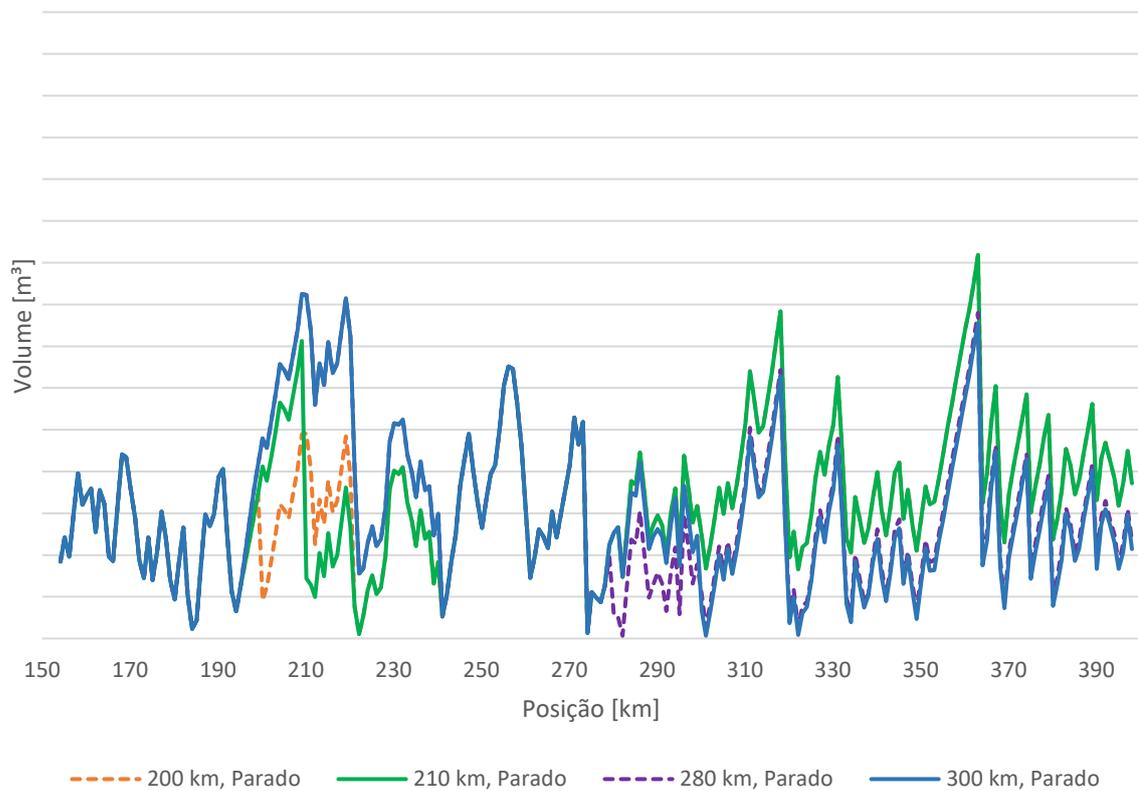


Figura 23: Cenários de ruptura da Seção 2 com válvulas nas posições 200, 210, 280 e 300 km.
Fonte: Pesquisa Direta (2022).

Em seguida, a Figura 23 compara o desempenho das válvulas nos quatro cenários propostos para a Seção 2. Portanto, a partir da comparação destes é possível identificar que as válvulas nas posições de 200 e 280 km ainda registram melhorias para o modelo.

A partir da análise individual dos casos, pode-se dizer que a curva “200 km, Parado” tem comportamento coincidente à “210 km, Parado” exceto pelo trecho de 190 a 220 km em que desempenha reduções mais constantes e melhor desempenho em sua posição de origem. Por outro lado, a curva “280 km, Parado” representa uma performance melhor do que “300 km, Parado”, uma vez que antecipa a retenção de material a jusante, implicando em resultados ligeiramente melhores. A Figura 24 exemplifica melhor este comentário.

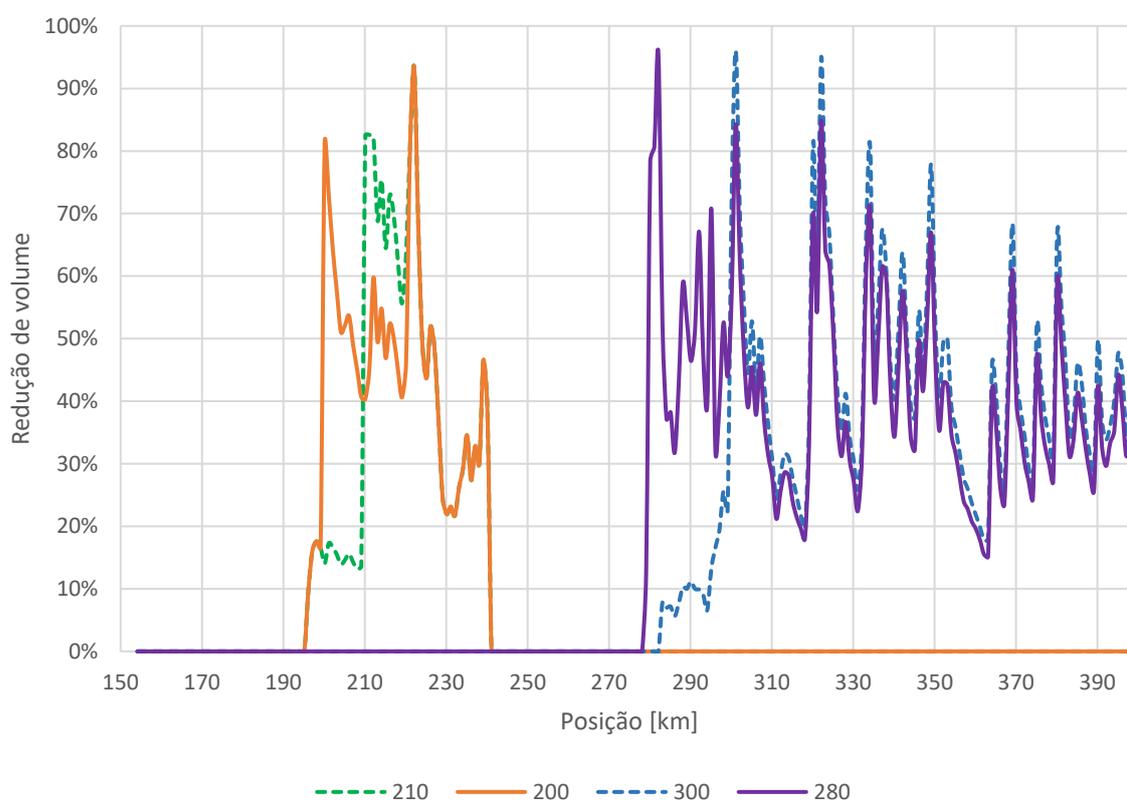


Figura 24: Redução do volume de vazamento para as condições de válvulas nas posições de 200, 210, 280 e 300 km.

Fonte: Pesquisa Direta (2022).

Portanto, a Figura 24, assim como a Figura 21, representa os ganhos relativos das válvulas nas posições mencionadas. Contudo, apesar da semelhança entre os gráficos citados, é importante mencionar que as variações absolutas, em volume de vazamento, são muito diferentes para cada uma das seções e não é possível representá-las por meio de valores relativos.

Logo, analisando as curvas “210” e “200” é interessante pontuar que o comportamento de redução de volume foi similar ou equivalente entre as duas, pelo fato de que os ganhos mais

significativos correspondem às respectivas zonas de influência. Por outro lado, Em relação às curvas “280” e “300” pode-se dizer que o desempenho da primeira é superior ao da segunda, uma vez que, entre as posições de 280 a 300 km, há uma grande variação entre as duas curvas, ao passo que a segunda performa números maiores nos trechos em sequência.

Após a análise do comportamento da Seção 2 foi constatado que o desempenho das válvulas foi razoavelmente similar em cada um dos casos, de forma que eleger o cenário de melhor contingência torna-se uma tarefa difícil, uma vez que não foram adotados outros critérios de avaliação para o processo de decisão.

Por exemplo, supondo que a região entre as posições 190 a 210 km fosse adotada com crítica para o projeto, o melhor cenário de mitigação dos riscos seria o posicionamento de uma EV na posição de 200 km. Dessa forma, a redução do volume de vazamento seria maximizada no local de interesse em detrimento da região de 210 a 220 km e vice-versa. Portanto, a decisão de qual localização selecionar, entre as posições de 200 e 210 km, deveria envolver outros parâmetros de avaliação do que apenas a redução do volume.

4.4.3 Otimização dos resultados

Em seguida, com base nas análises discutidas anteriormente, foi proposta uma última avaliação combinando a inclusão de uma nova válvula na tubulação com a redução do tempo de detecção de vazamento, assim verificando outras oportunidades de melhoria em condições reais de operação.

Para isso, foi realizada uma simulação de ruptura da Seção 1, para o duto operante, incluindo uma EV na posição 50 km (melhor desempenho obtido) com o tempo de detecção de 600 s. Em seguida, os resultados foram comparados com os comportamentos do mineroduto em condições normais de operação, com e sem válvula na posição 50 km, uma vez que estes cenários possibilitam visualizar os efeitos do tempo de reação. A Figura 25 exemplifica este comentário.

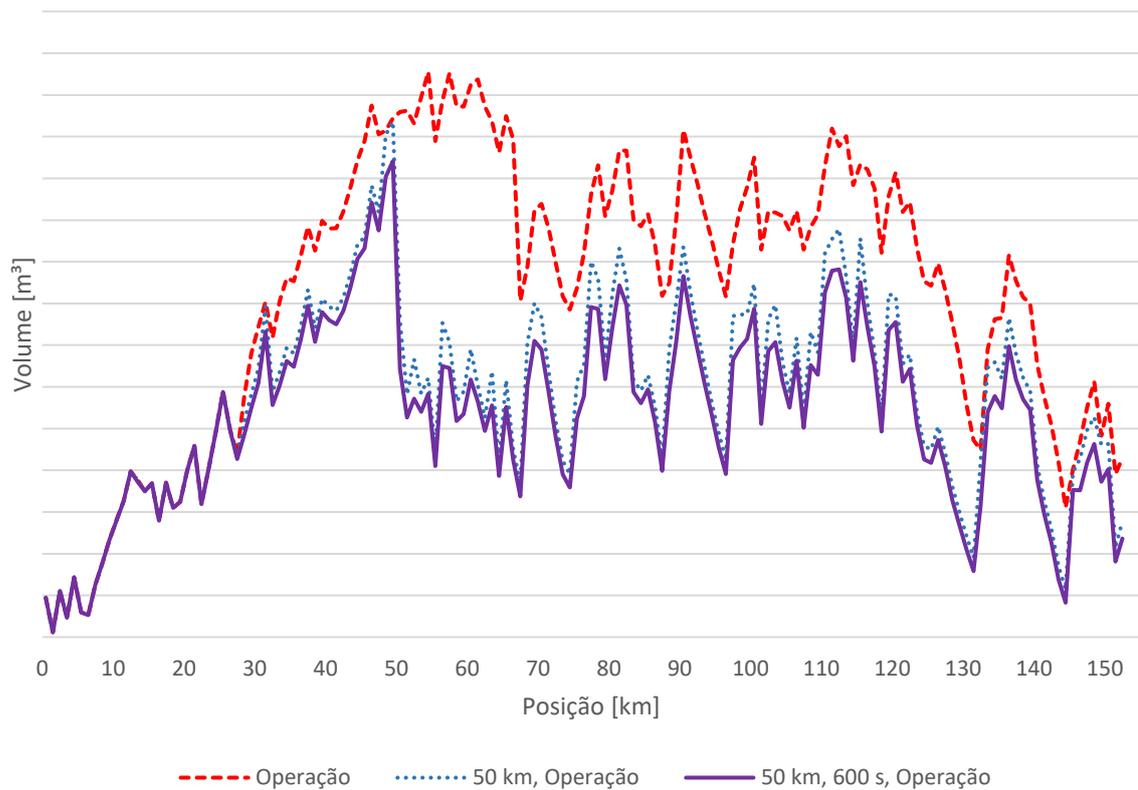


Figura 25: Cenários de ruptura da Seção 1 em operação: controle, válvula na posição 50 km, detecção de 600 s e válvula na posição 50 km.

Fonte: Pesquisa Direta (2022).

Logo, a Figura 25 compara cenários de ruptura, em operação, nas condições já mencionadas. Diante disso, é evidente que houve redução do volume de vazamento quando combinada a instalação de uma nova EV na posição 50 km com a redução no tempo de detecção. Assim, como nas análises anteriores, o trecho de 0 a 30 km não é influenciado por estas condições.

Portanto, é possível concluir que, ainda que os cenários já discutidos desempenhem um papel relevante para a redução do volume de vazamento, quando o duto está inoperante, é possível incrementar estes ganhos com a redução do tempo de detecção de vazamento. Ou seja, mesmo na presença de novas EVs, evitar o bombeamento durante acidentes é uma estratégia a ser considerada.

4.5 Considerações

Por fim, uma vez discutidos todos os cenários propostos para o trabalho, é importante que algumas considerações sejam feitas acerca dos resultados apresentados para um melhor alinhamento com diferentes leitores.

Primeiramente, é interessante pontuar que um dos principais objetivos deste trabalho foi demonstrar o potencial de utilização da ferramenta LIQSIM. O *software* em questão permite a observação do comportamento de diversos cenários de acidente permitindo quantificar o volume derramado. Desse modo, fornece informações cruciais para operadores logísticos de dutos sobre os possíveis riscos e a necessidade de ações mitigatórias de impactos.

Em relação aos resultados obtidos, é nítido que cada uma das seções se comporta de maneira distinta, principalmente por conta da diferente disponibilidade de válvulas. Mas, de modo geral, a instalação de novas EVs e a redução do tempo de detecção impactam positivamente na redução de volume de vazamento. Por outro lado, os potenciais de ganhos vão reduzindo gradativamente ao passo que são incluídas novas estações, como o caso da Seção 2.

Diante disso, é importante ressaltar que, por mais que os resultados relativos demonstrem reduções significativas no volume final, é necessário que os valores absolutos calculados sejam criteriosamente analisados. Isso se dá, uma vez que inúmeros outros aspectos devem ser considerados além do desempenho de cada EV. Dentre eles, podem ser citados os riscos de implementação; criticidade; impactos ambientais; infraestrutura da estação; regiões de travessias de rios, rodovias ou povoados; bem como os custos e a viabilidade financeira do empreendimento.

Ou seja, implementar uma nova estação de válvula na tubulação não é uma decisão simples. Por conta disso, a discussão dos resultados é de caráter informativo, a fim de demonstrar possíveis oportunidades de melhorias por meio de simulações simplificadas de um modelo. Dessa forma, o objetivo final não é definir uma recomendação para empresas do ramo, mas sim explorar os recursos disponíveis no mercado.

5 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

5.1 Conclusão

É inegável que a utilização de minerodutos possibilita grandes escoamentos de produção por longas distâncias. Por conta disso, é importante que existam recursos para a mitigação de impactos ambientais e produtivos em caso de acidentes. Portanto, este trabalho teve como objetivo simular e analisar o cenário de ruptura de um mineroduto fictício com o intuito de verificar o comportamento das Estações de Válvulas, além de demonstrar os potenciais proporcionados pelo *software* LIQSIM.

Inicialmente, foi identificada a necessidade de um pós-tratamento dos dados para a melhor visualização e interpretação das análises. Diante disso, constatou-se que os maiores volumes de vazamento estão concentrados em regiões de vales ou de baixas altitudes, uma vez que tendem a receber o material escoado de locais mais elevados, caracterizando-se como pontos de interesse para o trabalho.

Em seguida, quando analisada a retirada de válvulas do sistema, nas condições mencionadas, há um grande incremento no volume de vazamento de determinadas regiões, uma vez que o papel de retenção e bloqueio da polpa não foi desempenhado. Este comportamento foi corroborado quando incluído novas EVs no modelo, de modo que o acréscimo de estações proporcionou um aumento considerável na redução do volume derramado, atingindo valores superiores a 60%. Contudo, este crescimento na redução tende a ser cada vez menor até o patamar máximo de desempenho, na condição de duto fora de operação.

Outra importante percepção foi a influência do tempo de detecção do vazamento, tendo em vista que respostas ágeis e ações mitigatórias contribuem com a redução do volume bombeado durante a ocorrência de acidente. Ou seja, melhorar os sistemas de detecção pode impactar nos desempenhos atingidos. Este efeito também pode ser associado com a inclusão de estações de válvulas para a otimização dos resultados, ampliando as zonas de influência com uma rápida atuação na interrupção das bombas.

Por fim, é interessante ressaltar que os cenários discutidos representam apenas oportunidades de melhorias identificadas. Contudo, não foram avaliados critérios como o risco operacional nem a viabilidade financeira. Portanto, é interessante que o estudo do

comportamento do vazamento seja correlacionado com outros fatores e parâmetros para tornar o processo decisório mais assertivo.

5.2 Recomendações

Uma vez apresentados e discutidos os resultados, foram identificadas novas abordagens para trabalhos futuros. A partir da verificação das seguintes características será possível obter um melhor detalhamento do modelo proposto e cálculos de pressão mais coerentes com a realidade:

- Revisão da curva característica das bombas centrífugas adaptadas para a operação com polpa de minério de ferro;
- Cálculo de uma bomba centrífuga equivalente às bombas de deslocamento positivo, comumente utilizadas neste tipo de operação;
- Comparação dos resultados anteriores e das análises acima para verificar a influência do cálculo correto de pressão no volume de vazamento;
- Utilização de *softwares* mais atuais, disponíveis no mercado, para o cálculo do volume de vazamento;
- Análise de custos e riscos sobre a implementação de novas Estações de Válvulas com critérios objetivos.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- ABULNAGA B. E. **Slurry Systems Handbook**. Nova Iorque: McGraw-Hill, 2002. 629 p.
- AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **ASME B31.4 - 2012**: pipeline transportation systems for liquids and slurries. Nova Iorque: American Society Of Mechanical Engineers, 2012. 113 p.
- ANGLO AMERICAN. **Mineroduto do Sistema Minas-Rio Conta Com Mais de 133 Mil Toneladas de Aço e 44 Mil Tubos**. 2014. Disponível em: <https://brasil.angloamerican.com/pt-pt/imprensa/noticias/year2014/18-12-2014>. Acesso em: 16 jan. 2023.
- BETINOL, R. G.; NAVARRO, L. R. **Slurry Pipeline Design Approach**. In: RIO PIPELINE, 2009, Rio de Janeiro. 2009.
- CABRERA, V. R. **Slurry Pipelines**: theory, design and equipment. World Mining, p. 56-64, jan. 1979; p. 59-65, mar. 1979.
- CHAPMAN, J. P. et al. **Slurry Pipeline Technology**: an overview. In: RIO PIPELINE CONFERENCE AND EXPOSITION, 2009, 2009, Rio de Janeiro. Technical Paper. Rio de Janeiro: IBP, 2009.
- CHAVES, A. P. *et al.* **Teoria e Prática do Tratamento de Minérios**: bombeamento de polpa e classificação. 4. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012. 301 p. 1 v.
- COELHO, C. F.; MORALES, G. **Comparação de Modais de Transporte para escoamento de Minério**: indicadores de sustentabilidade. In: CONGRESSO NACIONAL DE EXCELÊNCIA EM GESTÃO, 8, 2012.
- COSTA, M. L. O. **Estudo do Torque de Acionamento e Vida Útil de um Projeto de Válvulas Industriais**. 2009. 112 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009
- CRESWELL, J. W. **Projeto de Pesquisa**: métodos qualitativo, quantitativo e misto. 5. ed. Porto Alegre: Penso, 2021. 222 p.
- DET NORSKE VERITAS BRAZIL. **LIQSIM**: pipeline accident simulation user's guide. 2011.
- ESTADO DE MINAS (Minas Gerais). **Semad Determina Série de Medidas à Anglo American por Rompimento de Mineroduto**. 2018. Disponível em:

https://www.em.com.br/app/noticia/gerais/2018/03/15/interna_gerais,944471/semad-determina-serie-de-m. Acesso em: 05 jan. 2023.

FIGUEIRA JÚNIOR, E. A. **Estudo e Concepção de Rotores de Disco para Bombeamento de Fluidos Abrasivos**. 2017. 118 f. Tese (Doutorado) - Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.

FORSMAN, C. MORIN, J. **World Valve: development of an outdated valve range**. 2004. 84 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ergonomic Design and Production Engineering Program, Department Of Human Work Sciences, Luleå University Of Technology, North Plymton, 2005.

GIL, A.C. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2022. 186 p.

GIL, A.C. **Métodos e Técnicas de Pesquisa Social**. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2019. 230 p.

GOMES, H. A. **Dimensionamento de Mineroduto**. 2012. 67 f. Monografia (Especialização) - Curso de Especialização Engenharia de Recursos Minerais, Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

HARRISON, M. J. **Severe Service Ball Valves for High Pressure Slurry Pipelines**. In: RIO PIPELINE CONFERENCE AND EXPOSITION 2009, 2009, Rio de Janeiro. Technical Paper. Rio de Janeiro: IBP, 2009.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. **Mineração em Números: 1º semestre de 2021**. Brasil, 2021. 2 p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. **Setor Mineral: 1º trimestre 2021**. Brasil, 2021. 27 p.

MARCONI, M. de A.; LAKATOS, E. M. **Fundamentos de Metodologia Científica**. 9. ed. São Paulo: Atlas, 2021. 354 p.

MARTINSON, J. **Leak Detection and Other Intelligence Software for Slurry Pipelines**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON HYDROTRANSPORT, 18, 2010, Rio de Janeiro. Bedfordshire: BHR Group Limited, 2010. p. 395-406.

MATTIOLI, G. G. **Avaliação da Corrosão Interna em Minerodutos Brasileiros Para Transporte de Minério de Ferro**. 2016. 192 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.

MELO, L. D. de; CONCEIÇÃO, C. D. da; FERREIRA NETO, J. A.; ALEXANDRINO, J. S.; COTTA, J. A. de O. **O Rompimento do Mineroduto em Santo Antônio do Grama/MG: impactos socioambientais na perspectiva da mídia nacional.** Research, Society And Development, [S.L.], v. 10, n. 16, 17 dez. 2021.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral. **Boletim do Setor Mineral 2020.** Brasília, 2021. 28 p.

PEREIRA, S. de Á. C. **O Mercado de Minério de Ferro.** 2012. 47 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Minas, Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

RIBEIRO, P. C. C.; FERREIRA, K. A. **Logística e Transportes: uma discussão sobre os modais de transporte e o panorama brasileiro.** In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 22, 2002, Curitiba, 2002.

SALGADO, O. R.; CHAVES, A. P. **Transporte de Sólidos por Dutos.** Aspectos teóricos e equipamentos envolvidos. Metalurgia-ABM, v. 44, n. 370, p. 904-11, set. 1988.

SAMPAIO, D. A., BRANDÃO, P. R. G. **Rheological Properties of Iron Ore Concentrates Produced by Samarco Mineração S.A. (Samarco) and Their Effect on The Potential of Plug Formation of the Pipeline.** In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON HYDROTRANSPORT, 16, 2004, Santiago. Papers presented at Hydrotransport. 16th International Conference. Bedfordshire: BHR Group Limited, 2004. 231-243.

SILVA, C. C. e. **Métodos de Inspeção de Tubulações de Transporte de Minério: o caso da integridade de dutos.** 2017. 70 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.

SKOUSEN, P. L. **Valve Handbook.** McGraw-Hill, 2004. 434 p.

TORRES, A. S. G. **Inertização de Minerodutos para Mitigação de Sua Corrosão Interna.** 2021. 81 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2021.

VIDAL, A. M. **Estudo de Bombeamento de Partículas Grossas.** 2011. 78 f. Monografia (Especialização) - Curso de Especialização em Engenharia de Recursos Minerais, Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.