

UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO

Coordenação de Engenharia Química/CCET

Trabalho de Conclusão de Curso - TCC



DEMETRIO MARQUES PEREIRA JUNIOR

**AVALIAÇÃO DE DEFEITOS DE CORROSÃO PARA A
ESTIMATIVA DE VIDA ÚTIL EM TUBULAÇÃO DE
TRANSPORTE DE MINÉRIO DE BAUXITA**

São Luís
2021

DEMETRIO MARQUES PEREIRA JUNIOR

**AVALIAÇÃO DE DEFEITOS DE CORROSÃO PARA A
ESTIMATIVA DE VIDA ÚTIL EM TUBULAÇÃO DE
TRANSPORTE DE MINÉRIO DE BAUXITA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Colegiado de Curso da Engenharia Química do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal do Maranhão, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Harvey Alexander Villa Vélez

São Luís
2021

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Diretoria Integrada de Bibliotecas/UFMA

Marques Pereira Junior, Demétrio.

AVALIAÇÃO DE DEFEITOS DE CORROSÃO PARA A ESTIMATIVA DE VIDA ÚTIL EM
TUBULAÇÃO DE TRANSPORTE DE MINÉRIO DE BAUXITA

/ Demétrio Marques Pereira Junior. - 2021.

66 f.

Coorientador (a): Bernardo Correia Rosario Fusco Pessoa.

Orientador (a): Harvey Alexander Villa Vélez.

Curso de Engenharia Química, Universidade Federal do
Maranhão, São Luís - MA, 2021.

1. Bauxita. 2. Dutos. 3. Estimativa de reparo. 4.
Integridade de dutos. 5. FIG. I. Alexander Villa Vélez,
Harvey. II.Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. HARVEY ALEXANDER VILLA VÉLEZ
Orientador – COEQ/CCET/UFMA

Prof. Dr. ROMILDO MARTINS SAMPAIO
DEEQ/CCET/UFMA

Eng. Sr. BERNARDO CORREIA ROSARIO FUSCO PESSOA
INTEGRIDADE DE DUTOS/ NORSK HYDRO-PA

22 de julho de 2021

DADOS CURRICULARES

Demetrio Marques Pereira Junior

NASCIMENTO 28/06/1997 – SÃO LUÍS / MA

FILIAÇÃO Demetrio Marques Pereira
Gizélia Ferreira Matos Pereira

2015/2021 Curso de Graduação
Engenharia Química - Universidade Federal do Maranhão

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a todos que em algum momento na minha vida me transformaram em algo melhor, ou incentivaram meu desenvolvimento a cada dia, em especial minha família, amo vocês.

AGRADECIMENTOS

Certamente, a conclusão dessa etapa é um grande momento em minha vida, e a felicidade é imensa em ter alcançado. Sobretudo, sou grato a Deus por ser meu guia, minha proteção, minha fonte de força e perseverança para os grandes desafios enfrentados ao longo desse caminho.

A minha mãe Gizélia Matos, por todos os momentos nos quais já pude dividir com você durante essa vida, é indescritível descrever em palavras o que você representa para mim, jamais tenha dúvidas do meu amor por ti e o quanto tem de você em cada grande conquista que alcancei e almejo cumprir.

Ao meu pai Demétrio Marques, por ser sustentáculo de todo esse crescimento que venho acumulando durante os anos, é uma responsabilidade nobre ser a primeira pessoa qual ensinou os passos da vida e como deveria preservar minha índole em qualquer lugar onde eu esteja, amo você.

As minhas doces irmãs Giselle Fernanda e Giovana Matos de corações gigantescos, amo vocês. Sou grato pelos sorrisos, o carinho, admito que fazem falta quando estão longe de casa, mas estou feliz pois significa também que estão buscando os seus sonhos, e torço profundamente para que alcancem cada um deles.

A minha namorada Nathalia Cristina por todo seu amor, paciência e todos nossos momentos juntos, com você ao meu lado conquistei e aprendi muito. Certamente, é uma pessoa que tem seu espaço em meu coração, eu te amo.

Ao meu orientador Harvey Villa, meu muito obrigado, longe de casa muitas coisas fazem muita falta, grande amigo! Você entende bem, e você foi uma pessoa que sempre procurou saber como eu estava em cada contato, momentos como esse ou de simples conversas estão guardados comigo, tenha a certeza de que você foi muito mais que um professor/orientador.

Aos meus amigos mais próximos de UFMA. Adones Almeida, Bruno João, Cairo Rafael, Ivo Chaves, Germano Lima (in memoriam), João Guilherme, Jules Mitoura, Ronaldo Maison e Valmichel Oliveira, que estiveram presentes nos momentos felizes, tristes e divertidos, e principalmente o apoio, ensinamentos e incentivo compartilhado todos estes anos.

Aos amigos de longa data Felipe Fernandes, Kallil Magalhães, Matheus Penna que mesmo distantes fisicamente buscaram formas de se manter por perto e participar desse desenvolvimento.

À UFMA por ser uma segunda casa quando estive em São Luís - MA e pela estrutura disponibilizada durante o percorrer das disciplinas do curso de engenharia química. Aos professores docentes os quais tive contato durante essa trajetória me proporcionaram o alcance de todos os aprendizados, em especial ao professor Dr. Romildo Martins que compõe a banca avaliadora, agradeço primeiramente o aceite do convite e gostaria de expor que tenho um respeito enorme pela sua pessoa.

Por fim, agradeço a oportunidade de estágio concedida pela Norsk Hydro Paragominas, local este onde foi muito bem acolhido, especialmente as áreas técnicas, operação e integridade, sem dúvidas obtive uma evolução nítida em todas minhas habilidades e aptidões. Em particular, ao Bernardo Pessoa, por se mostrar disponível para esclarecimento das dúvidas do presente trabalho proposto e como uma pessoa que inspira a buscar desafios maiores.

EPÍGRAFE

“... O respeito que você dá ao seu tempo é sempre do mesmo tamanho do seu sucesso.”

Vídeo: O tempo é finito por Thiago Nigro

PEREIRA JR., D.M. **Avaliação de defeitos de corrosão para a estimativa de vida útil em tubulação de transporte de minério de bauxita.** 2021. 66 f. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Química do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2021.

RESUMO

Os dutos são aplicados na indústria como forma de escoamento de fluidos entre fronteiras geograficamente distantes, apresentando ganhos ambientais, econômicos e de segurança. No entanto, os dutos estão sujeitos a defeitos que possam afetar a sua integridade. O objetivo deste estudo é estimar o tempo máximo de operação aceitável para um duto com a presença de defeito de corrosão antes que esse atinja a condição de risco de falha por ruptura. Foram considerados 30 defeitos reais existentes em um mineroduto de bauxita, obtidos após a identificação com o uso ferramentas de inspeção internas, PIG. Os dados gerados foram avaliados a partir dos procedimentos propostos pelas normas internacionais ASME B31G nível 1 e DNV-RP-F101 parte B, desenvolvidas com base em modelos analíticos semiempíricos que fornecem práticas recomendadas para avaliar tubulações que contêm corrosão para a determinação da pressão interna de falha em dutos. Também foi proposto o estudo sobre o crescimento do defeito, de forma a estimar a vida útil máxima desse sistema antes que seja necessário ser reparado. Os resultados indicaram que o modelo semiempírico proposto pela norma B31G possui valores mais conservadores, com valores médios de pressão de falha obedecendo a seguinte ordem: ASME B31G < ASME B31G modificado < DNV-RP-F101 defeito isolado < DNV-RP-F101 defeito complexo. A taxa de crescimento de corrosão obtida foi de 0,1732 mm/ano, e para erosão encontrou-se o valor de 0,6088 mm/ano. Para estimativa de vida útil dos dutos com a presença de defeitos, todos os 13 tubos com defeitos de erosão apresentaram falhas por pressão, sendo que 14 tubos com a presença de defeitos de corrosão falharam pelo mesmo critério de profundidade (80% e 85%), e os 3 defeitos restantes apresentaram comportamento atípico de falha por pressão para a norma proposto pela DNV-RP-F101. É importante destacar que a intervenção de todos estes defeitos mapeados passou por campanha de troca de tubos no terceiro trimestre do ano de 2020, logo estes não apresentam o risco de ruptura e danos ao ambiente ou as comunidades do entorno desse local.

Palavras-chave: Bauxita. Dutos. Estimativa de reparo. Integridade de dutos. PIG.

PEREIRA JR., D.M. **Evaluation of corrosion defects to estimate the useful life of bauxite ore transport pipelines.** 2016. 66 f. Graduate Work (Graduate in Chemical Engineering) – Curso de Engenharia do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2021.

ABSTRACT

The pipelines are applied in industry as a means of flowing fluids across geographically distant borders, presenting environmental, economic and safety gains. However, it is still subject to acquiring defects that can affect its integrity. The purpose of this study is to estimate the maximum acceptable operating time for a pipe with a corrosion defect before it reaches the risk of failure. Were considered 30 real defects existing in a bauxite pipeline, obtained after identification using internal inspection tools, PIG. The generated data were evaluated from the procedures proposed by the international standards ASME B31G level 1 and DNV-RP-F101 part B developed based on semi-empirical analytical models that provide best practices for the evaluation of pipes that contain corrosion, a study on the defect growth has also been proposed, making it possible to obtain the maximum service life of this system before it needs to be repaired. The results indicated that the semi-empirical model proposed by the B31G standard has more conservative values, the mean values of failure pressure obey the following order: ASME B31G < ASME B31G modified < DNV-RP-F101 single defect < DNV-RP-F101 complex defect. The corrosion growth rate obtained was 0.1732 mm/year and for erosion growth rate the value of 0.6088 mm/year. All 13 pipes with erosion defects fail due to pressure, 14 pipes with the presence of corrosion defects fail due to reaching the maximum defect depth limit (80% and 85%), the remaining 3 defects exhibited atypical pressure failure behavior to the standard proposed by DNV-RP-F101, all these mapped defects were maintained in the third quarter of 2020. Therefore, there is no risk of rupture and the possibility of damage to the environment or to the surrounding communities.

Keywords: Bauxite. PIG. Pipeline Integrity. Repair date. Slurry Pipeline.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mapa de infraestrutura dutoviária brasileira ano de 2017.....	21
Figura 2 – Foto da estação de bombeamento da Mineração Paragominas, Hydro.	24
Figura 3 – Instalação e abaixamento da tubulação do mineroduto.	25
Figura 4 – Mapa mostrando a rota do mineroduto de bauxita.....	26
Figura 5 – Causa de falhas em tubulações industriais nos EUA (2005 – 2019).	26
Figura 6 – Representação dos princípios do Magnetic Flux Leakage.....	29
Figura 7 – Representação das dimensões do defeito de corrosão em dutos.	31
Figura 8 – Canhão lançador de PIG, estação de bombeamento 2.	37
Figura 9 – Foto do PIG de limpeza magnética.	38
Figura 10 – Procedimento de estimativa de vida útil para o estudo proposto.....	39
Figura 11 – Pressão de operação primeiros 116 km do mineroduto	41
Figura 12 – Distribuição de defeitos ao longo do mineroduto.	42
Figura 13 – Perfil de espessura de parede do mineroduto para o 1º trecho.....	42
Figura 14 – Análise de pressão de falha modelo semiempírico ASME B31G para os defeitos de corrosão presentes no mineroduto	43
Figura 15 – Resultados do teste de hipótese t pareado B31G e B31G modificado, software Minitab.	44
Figura 16 – Análise de pressão de falha modelo semiempírico ASME B31G para os defeitos de erosão presentes no mineroduto.....	45
Figura 17 – Análise de pressão de falha modelo semiempírico DNV-RP-F101 para os defeitos de corrosão presentes no mineroduto.....	46
Figura 18 – Análise de pressão de falha modelo semiempírico DNV-RP-F101 para os defeitos de erosão presentes no mineroduto.	47
Figura 19 – Comparativo entre as pressões de falha para os defeitos de corrosão.	48
Figura 20 – Comparativo entre as pressões de falha para os defeitos de erosão.....	48
Figura 21 – Perfil de identificação dos defeitos de corrosão no mineroduto para o 1º trecho	50
Figura 22 – Perfil de identificação dos defeitos de erosão no mineroduto para o 1º trecho ...	51
Figura 23 – Perfil falha associado ao crescimento do defeito de corrosão log dist. 103049,6 m.	52
Figura 24 – Perfil falha associado ao crescimento do defeito de corrosão log dist. 73733,124 m.	53

Figura 25 – Tempo de vida útil máximo dos defeitos de corrosão.	53
Figura 26 – Perfil falha associado ao crescimento do defeito de erosão log dist. 68982,617 m.	54
Figura 27 – Tempo de vida útil máximo dos defeitos de erosão.....	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados de infraestrutura do sistema dutoviário do Brasil 2017.....	21
Tabela 2 – Principais minerodutos de longa distância do Brasil.....	22
Tabela 3 – Distribuição de tamanho de partícula no mineroduto.....	23
Tabela 4 – Resumo de informações PIG MFL.....	37
Tabela 5 – Resumo de informações PIG de limpeza.....	38
Tabela 7 – Propriedades mecânicas do aço API 5L X70 utilizadas.....	40
Tabela 8 – Especificações do sistema utilizadas.....	40
Tabela 6 – Base de dados: Defeitos extraídos do relatório de anomalias (Pipe Tally).....	41
Tabela 9 – Fator estimado de reparo para os defeitos de corrosão.....	45
Tabela 10 – Fator estimado de reparo para os defeitos de erosão.....	45
Tabela 11 – Correlação entre defeitos para estimativa do crescimento da corrosão.....	49
Tabela 12 – Correlação entre defeitos para estimativa do crescimento da erosão.....	50
Tabela 13 – Resumo dos valores de taxa de crescimento dos defeitos.....	51
Tabela 14 – Resumo da distribuição de realização dos reparos ao longo dos anos Apêndice A.....	55
Tabela 15 – Datas de falha para cada defeito conforme norma B31G modificada, critério de falha da atingido e o tipo manutenção sugerida.....	68

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
ASD	<i>Allowable Stress Design</i>
ASME	<i>American Society of Mechanical Engineers</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
DNV	<i>Det Norske Veritas</i>
FFP	<i>Fit For Purpose</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
MASL	Metros acima do nível do mar
MFL	<i>Magnetic Flux Leakage</i>
MPSA	Mineração Paragominas S.A.
PIG	<i>Pipeline Inspection Gauge</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área local de perda de metal no plano longitudinal
A_C	Área transversal do espécime de impacto Charpy
A_0	Área local de metal original = L_t
C_V	Energia absorvida por impacto com entalhe Charpy V
D	Diâmetro externo especificado do tubo
d	Profundidade da perda de metal
E	Módulo de elasticidade do aço
L	Comprimento da perda de metal
L_e	Comprimento efetivo = $L(\pi/4)$
M	Fator de ampliação de tensão protuberante
$MAOP$	Pressão de operação máxima permitida
MOP	Pressão máxima de operação
P_F	Pressão de falha estimada = $2S_F t/D$
P_O	Pressão de operação, pode ser igual a MAOP ou MOP
P_S	Pressão de operação segura = P_F/SF
S_F	Nível de estresse de falha estimado
S_{flow}	Estresse de fluxo
S_O	Tensão do arco na pressão operacional = $P_O D/2t$
S_{UT}	Resistência à tração final especificada na temperatura $\cong SMTS$
S_{YT}	Limite de elasticidade especificado na temperatura $\cong SMYS$
SF	Fator de segurança
$SMTS$	Resistência mínima à tração especificada em condições ambientais
$SMYS$	Limite de escoamento mínimo especificado nas condições ambientais
t	Espessura da parede do tubo
z	Termo da equação = L^2/Dt
z_e	Termo da equação = L_e^2/Dt

SUMÁRIO

FOLHA DE APROVAÇÃO	I
DADOS CURRICULARES	II
DEDICATÓRIA	III
AGRADECIMENTOS	IV
EPÍGRAFE	VI
RESUMO	VII
ABSTRACT	VIII
LISTA DE FIGURAS	IX
LISTA DE TABELAS	XI
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	XII
LISTA DE SÍMBOLOS	XIII
1 INTRODUÇÃO	18
2 OBJETIVOS	19
2.1 Objetivo geral	19
2.2 Objetivos específicos	19
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
3.1 Transporte dutoviário	20
3.1.1 MINERODUTO.....	22
3.2 Integridade de Dutos	26
3.2.1 GERENCIAMENTO DE AMEAÇAS/FALHAS A DUTOS.....	26
3.2.3 FERRAMENTA DE IDENTIFICAÇÃO DOS DEFEITOS (<i>IN-LINE INSPECTIONS</i>).....	28
3.3 Defeitos por corrosão	29
3.4 Métodos de análises de defeitos de corrosão	30
3.4.1 MODELOS ANALÍTICOS SEMIEMPÍRICOS.....	31
3.4.1.1 Modelo semiempírico ASME B31G.....	32
3.4.1.2 Modelo semiempírico ASME B31G modificado.....	33
3.4.1.3 Modelo semiempírico DNV RP-F101.....	34
4 METODOLOGIA	36
4.1 Aquisição de dados	36
4.1.1 PREPARAÇÃO DAS FERRAMENTAS.....	36
4.1.2 ACESSIBILIDADE NO MANUSEIO DAS FERRAMENTAS.....	36
4.1.3 CONDIÇÕES PARA OPERAÇÃO ADEQUADA DAS FERRAMENTAS.....	37
4.1.4 LIMPEZA DO DUTO.....	37
4.1.5 INSPEÇÃO PIG INSTRUMENTADO.....	38
4.1.6 ANÁLISE DE DADOS E RELATÓRIOS.....	39
4.1.7 FLUXOGRAMA DO PROCEDIMENTO DE ANÁLISE DE FALHA.....	39
4.2 Tratamento dos dados – Modelos analíticos semiempíricos	39

4.2.1 NÍVEL DE ANÁLISE B31G	40
4.2.2 NÍVEL DE ANÁLISE DNV-RP-F101	40
4.2.3 TAXA DE CRESCIMENTO DA PERDA DE METAL	40
4.2.4 ESTIMATIVA DE FALHA FUTURA.....	41
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
5.1 Entendimento do banco de dados.....	42
5.2 Análise dos modelos semiempíricos para pressão de falha	43
5.2.1 ASME B31G E B31G MODIFICADA.....	43
5.2.2 DNV-RP-F101 (PART B) DEFEITO ISOLADO E COMPLEXO	46
5.2.3 COMPARATIVO ENTRE OS MODELOS SEMIEMPÍRICOS ASME E DNV ...	47
5.3 Crescimento dos defeitos	49
5.4 Tempo máximo de vida útil de dutos com a presença de defeitos	51
5.4.1 DEFEITOS DE CORROSÃO	51
5.4.2 DEFEITOS DE EROSÃO.....	54
6 CONCLUSÃO.....	61
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	63
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64
APÊNDICE A.....	68

1 INTRODUÇÃO

Ao longo do tempo a extração de minérios tem proporcionado à sociedade avanços significativos por meio da conversão destes em materiais ou produtos de utilidade presentes em praticamente qualquer atividade humana na vida moderna.

Como conhecido, os minerais fazem parte dos recursos naturais, e geologicamente, encontram-se distribuídos de maneira escassa na crosta terrestre. Não obstante, os recursos mais acessíveis foram os primeiros a serem explorados. E com o processo natural da expansão dessa indústria, à medida que houvesse a expansão das frentes de lavra em locais ainda não explorados, a distância entre o fornecedor (mina) e o cliente (refinaria) aumentou a cada nova exploração iniciada.

Assim, a implantação das atividades de mineração em locais remotos, antigamente era considerada impraticável devido a premissas econômicas, principalmente ligadas a aspectos logísticos. Dessa forma, e como objeto de estudo central desse trabalho, a opção de transporte via dutos, demonstrou um crescimento considerável para essa aplicação.

Na engenharia, os dutos são aplicados como forma de escoamento de fluidos entre fronteiras geograficamente distantes. Isso ocorre devido a ganhos econômicos e por impactos positivos em segurança e confiabilidade desse sistema. Embora, durante sua vida útil esses sistemas estejam sujeitos a adquirir defeitos que possam afetar a sua integridade, e, por consequência podem ocasionar em um mecanismo de falha. Dentre estes defeitos, a redução de espessura de parede causada pela corrosão é um dos aspectos que mais afetam a integridade de dutos terrestres.

No presente trabalho serão considerados alguns defeitos de corrosão reais existentes em um mineroduto de bauxita, obtidos após a identificação a partir de ferramentas de inspeção internas (smart PIG). Adicionalmente, será proposta uma análise comparativa entre normas internacionais como a ASME B31G e DNV-RP-F101 desenvolvidas com base em modelos analíticos semiempíricos que fornecem práticas recomendadas para avaliar tubulações que contêm corrosão para a determinar a pressão interna de falha em dutos.

A partir dos resultados, é possível agir de forma preventiva na gestão de integridade desse importante ativo para indústria que possui esse sistema.

2 OBJETIVOS

Este estudo fornecerá informações sobre a estimativa de pressão de ruptura em um duto com a presença de defeitos de corrosão em seu interior. Esse diagnóstico permite obter parâmetros como o crescimento da corrosão associado a condição da operação e fluido em transporte. Trabalhos como estes são importantes, tendo em vista que é necessário desenvolver um maior controle sobre o planejamento de manutenção com caráter preventivo evitando que o duto esteja sobre risco de falha, quando em operação. Este estudo será aplicado em um processo de escoamento em uma indústria de minério de bauxita.

2.1 Objetivo geral

Estimar o tempo máximo de operação aceitável para um duto com a presença de defeito de corrosão antes que atinja a condição de risco de falha por ruptura.

2.2 Objetivos específicos

- Introduzir os conceitos e dados sobre o gerenciamento de integridade de dutos a partir de ameaças ou falhas.
- Apresentar os equacionamentos das principais normas internacionais utilizadas para o cálculo de estimativa da pressão de ruptura.
- Desenvolver a estimativa de falha do defeito de corrosão a partir do seu crescimento ao longo do tempo, para as condições de operação desse sistema atualmente.
- Examinar quando seria necessário intervir no reparo/troca do trecho desse sistema sem que este assuma condição de risco de ruptura.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Transporte dutoviário

Conforme a norma ABNT NBR 15280-1 (2009, p. 44), um duto é uma:

Designação genérica de instalação constituída por tubos ligados entre si, incluindo os componentes, destinada ao transporte ou transferência de fluidos, entre as fronteiras de unidades operacionais geograficamente distintas.

De acordo com esta definição, o Regulamento Técnico N° 2/2011 da ANP descreve que uma instalação de dutos terrestre é formada por uma sequência de tubos soldados entre si, incluindo os seus componentes (lançadores, recebedores, válvulas, flanges, conexões, juntas, estojos, entre outros) assim como seus complementos (suportes, sistema de proteção catódica, junta de isolamento elétrico, provadores de corrosão, instrumentação, entre outros). Dessa forma, entende-se por transporte dutoviário aquele efetuado no interior de um duto, sendo esse constituído de três elementos essenciais: os terminais, com os equipamentos de propulsão do produto; os tubos e as juntas de união.

Segundo Gandhi et al., (2016), à medida que uma sociedade se desenvolve em certa localidade os recursos ali cada vez mais são consumidos, sendo necessária a ampliação ou até mesmo exploração desses em outras localidades. Este cenário é a realidade presente em algumas indústrias de recursos não renováveis, como o caso da mineração e a indústria de petróleo e gás natural. Porém, antes que defina o modal de transporte utilizado para escoamento de determinado produto, muitos estudos são realizados, os quais exibem três aspectos que determinam a melhor escolha: ambientais, econômicos e de segurança.

Toffolo (2008) salienta que um sistema dutoviário apresenta uma série de vantagens sobre os outros meios de transportes, como uma maior flexibilidade e, eventualmente, menor custo de instalação, quando comparados ao custo de uma ferrovia ou rodovia. Assim como são um meio de transporte mais seguro, de alta confiabilidade e mais bem adequado para o transporte de grandes quantidades de matéria por longas distâncias (MANNERS, 2019).

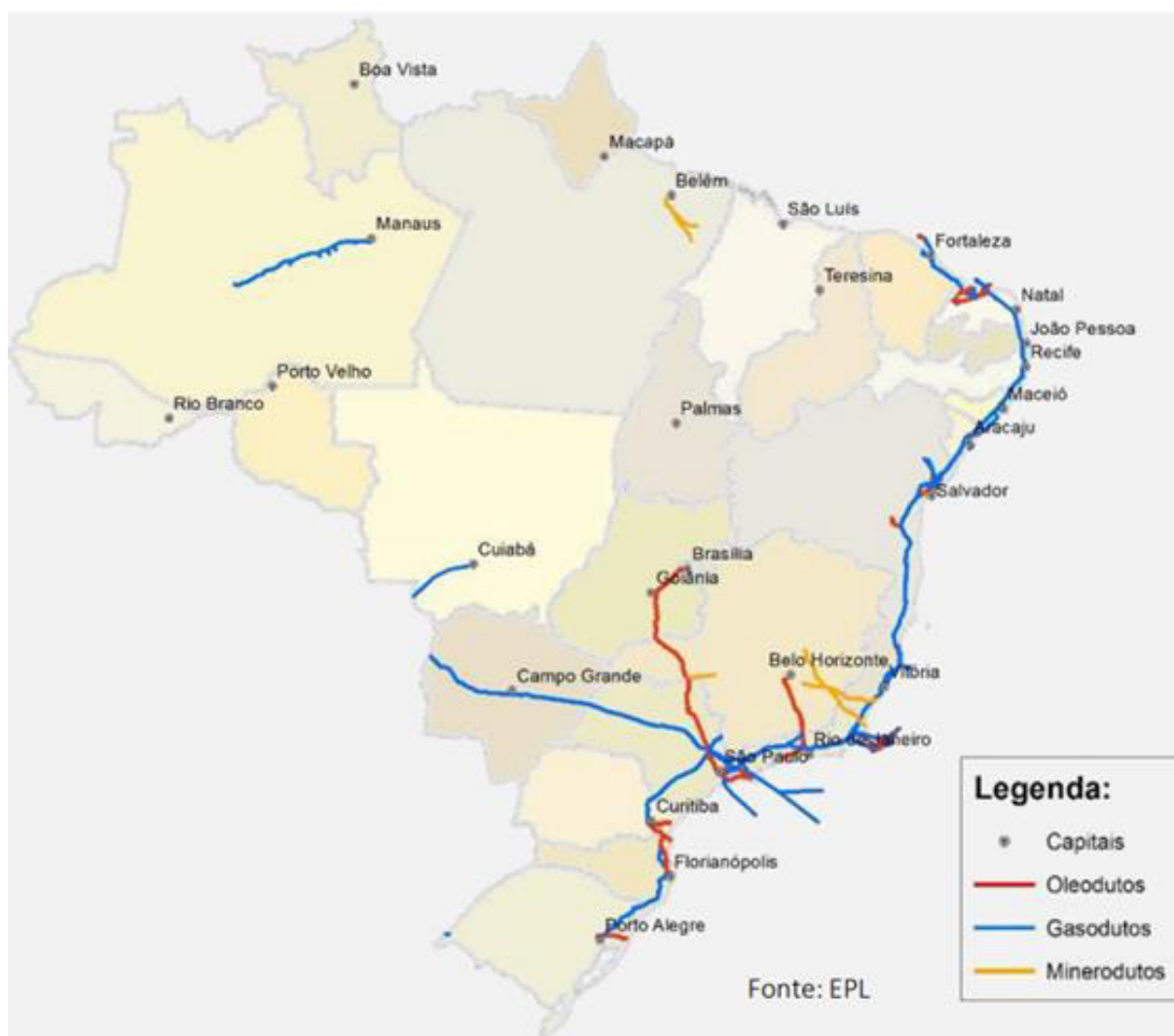
Vale ressaltar que não apenas em âmbitos econômicos esse modal de transporte tem vantagens, pois de acordo com Brandt (2010), ele possui elevada margem de segurança operacional e ambiental, sendo raros os registros de acidentes. Atualmente, no Brasil, conforme a Tabela 1, a extensão total da infraestrutura dutoviária é de cerca de 21 mil km, mais da metade da extensão, 54,7% são utilizadas para movimentação de gás, 37,5% para combustíveis e 7,9% para minérios.

Tabela 1 – Dados de infraestrutura do sistema dutoviário do Brasil 2017

Dutovias	Extensão	%
Totais	21.389 km	100
Gasodutos	11.696 km	54,7
Minerodutos	1.680 km	7,9
Oleodutos	8.013 km	37,5

Fonte: Adaptado Empresa de Planejamento e Logística (EPL) (2017).

O transporte de minério através de dutos ainda é pouco explorado no Brasil quando comparado ao mundo, mas a presença dessa estrutura vem se ampliando cada vez mais em todo território (Figura 1). Esse número de minerodutos tende a aumentar pelo fato de os depósitos brasileiros de minério se situarem em locais cada vez mais afastados dos portos, usinas e pontos de uso final.

Figura 1 – Mapa de infraestrutura dutoviária brasileira ano de 2017

Fonte: Observatório Nacional de Transporte e Logística (ONTL) (2017).

Conforme Silva (2017), a Tabela 2 apresenta os maiores minerodutos do Brasil, particularidades entre eles e ano de início de cada operação do sistema, o que comprova a relevância do emprego desse modal no transporte de minério e cada vez mais sua aplicação dentro do país.

Tabela 2 – Principais minerodutos de longa distância do Brasil

Empresa	Mineral	Capacidade (Milhões de tms/ano)	Extensão (km)	Diâmetro nominal (in)	Início da operação
Hydro	Bauxita	13,2	244	24	2006
Anglo – Minas –	Ferro	24,5	522	24 e 26	2014
Samarco Line #1	Ferro	15,5	398	18, 20 e 22	1977
Samarco Line #2	Ferro	8,5	400	16 e 14	2008
Samarco Line #3	Ferro	23	400	20 e 22	2014
Vale – Pico -VG	Ferro	7,5	5	12	2009
ValeFert (Fosfertil)	Fosfato	2	120	9	1978
ValeFert	Fosfato	0,9	14	6	1981
Imerys RCC	Caolin	1,2	159	14	2002
Imerys PPSA	Caolin	1,3	180	10	1996

Fonte: Silva (2017).

3.1.1 MINERODUTO

Segundo Chaves (2002), um mineroduto pode ser definido como o modo de transporte de sólidos granulares misturado com um líquido, em que normalmente o veículo de transporte é a água. De acordo com Gava (2016), o transporte de sólidos em suspensão na mineração pode ser por gravidade ou bombeamento - a principal forma de transporte para esse tipo de indústria.

Para autores como Vidal (2011), Gandhi *et al.* (2016), Luz e Lins (2018), o bombeamento é influenciado pela resistência dessas suspensões em se deformar ou fluir, quando submetidas à força de cisalhamento. O regime de operação normalmente é turbulento e cabe ressaltar que a velocidade da polpa deve impossibilitar a sedimentação do material sólido, que provocaria um leito fixo ou móvel, causando desgaste por erosão e entupimentos.

No estado do Pará, está em operação o primeiro mineroduto de suspensão de bauxita do mundo, que entrou em operação em 6 de fevereiro de 2007. Tem como de partida a Mineração Bauxita Paragominas, responsável pela extração da bauxita, beneficiamento e transporte do minério, localizada na cidade de Paragominas-PA, e termina na refinaria de produção de alumina ALUNORTE, situada no município de Barcarena-PA, perfazendo um percurso de 244 km de extensão com capacidade projetada de 14,5 milhões de toneladas secas por ano (MTA) e concentração da polpa de aproximadamente 50% (GANDHI *et al.*, 2016).

Segundo Brown e Heywood (1991), os atributos que geralmente são utilizados para caracterizar fisicamente as polpas são: a massa específica das fases constituintes (sólido e líquido) e da polpa, concentração de sólidos, distribuição granulométrica, forma e tamanho das partículas e a viscosidade da polpa.

Segundo o Wasp *et al.* (1977), o sistema de transporte de bauxita pode ser dividido em preparação de polpa, sistema de tubulação de polpa e sistema de desaguamento. Para adequar o mineroduto às condições de boa operação, o mineral lavrado passa pelo tratamento de beneficiamento, visando modificar a granulometria, a concentração relativa das espécies minerais presentes ou a forma, sem modificar a identidade química ou física dos minerais (LUZ; SAMPAIO; FRANÇA, 2010).

O minério de bauxita é triturado em um tamanho adequado para o transporte por dutos. A cominuição foi selecionada de modo que a pasta possa ser desidratada até 14% de umidade a um custo razoável na estação de desaguamento. Isso exige um tamanho de partícula com cerca de 6% retido na malha de 65 e entre 40 e 47% passante na malha de 325, conforme Tabela 3. Este tamanho das partículas é mais fino em comparação com o exigido para a refinaria de alumina (GANDHI *et al.*, 2016).

Tabela 3 – Distribuição de tamanho de partícula no mineroduto

Mesh Tyler	Abertura (µm)	Passante (%)
48	297	100
65	210	94,7
100	149	
150	105	
200	74	
270	53	
325	44	40 - 47
400	37	
	20	
	10	19 -25
	5	12-17

Fonte: Adaptado Orthor *et al.* (2009).

Segundo Chapman *et al.* (2009), normalmente minerodutos de longa distância e com perfil acentuado como é o caso do Brasil, utilizam bombas de deslocamento positivo devido às elevadas pressões e vazões de operação, com a desvantagem dos transientes hidráulicos e pulsações de pressão ao longo da linha. Estas bombas necessitam de uma pressão de sucção acima da altura de coluna de fluido disponível no tanque de estocagem, por este motivo, bombas centrífugas são instaladas a montante das bombas de deslocamento positivo (MARTINS, 2014).

Na MPSA, há quatro tanques de polpa agitada de 20 m de diâmetro por 24 m de altura alimentando duas bombas de carga de polpa. As bombas de carga fornecem a pressão de sucção necessária para seis bombas tipo pistão diafragma da linha principal. Cada uma das seis bombas principais GEHO TZPM 2000 foi projetada para uma vazão máxima de 356 m³/h e uma pressão máxima de descarga de 13,7 MPa (GANDHI *et al.*, 2016).

Figura 2 – Foto da estação de bombeamento da Mineração Paragominas, Hydro.



Fonte: Autor (2021).

O sistema de tubulação de polpa de bauxita é representado pela Figura 3, onde mostra a instalação e o abaixamento da tubulação do mineroduto na cava. O sistema de tubulação do mineroduto foi projetado conforme a norma ASME B31.11 - *Slurry transportation Piping Systems*. Esse sistema é constituído por tubos de aço API 5L-X70, com costura e diâmetro externo de 24 polegadas (609,6 mm). É usado para transportar a polpa para as instalações da Alunorte. A tubulação tem um revestimento externo de polietileno de alta densidade e de três camadas, que quando usado com um sistema de proteção catódica protegerá o tubo da corrosão externa (OTHOR *et al.*, 2009).

Conforme Gandhi *et al.* (2016) e Othor *et al.* (2009), o mineroduto foi projetado para permitir a capacidade de vazão para um máximo de 14,85 dMTA, para transportar concentrado de bauxita, a partir de uma altitude de 120 metros acima do nível do mar (MASL) no local da mina a 25 MASL no terminal de Barcarena. A espessura da parede do tubo é reduzida ao longo do tubo à medida que a pressão operacional no tubo diminui.

A espessura da parede é selecionada com base no cálculo da espessura da parede necessária para a pressão operacional máxima mais a tolerância à corrosão, e pode variar entre 7,9 mm e 15,9 mm (0,312 e 0,625 polegadas). Assim como a inclinação máxima do tubo é limitada a 15%, de modo a permitir o desligamento de duração limitada, devido ao fenômeno de sedimentação e o reinício do transporte no mineroduto (GANDHI *et al.*, 2016).

Figura 3 – Instalação e abaixamento da tubulação do mineroduto.

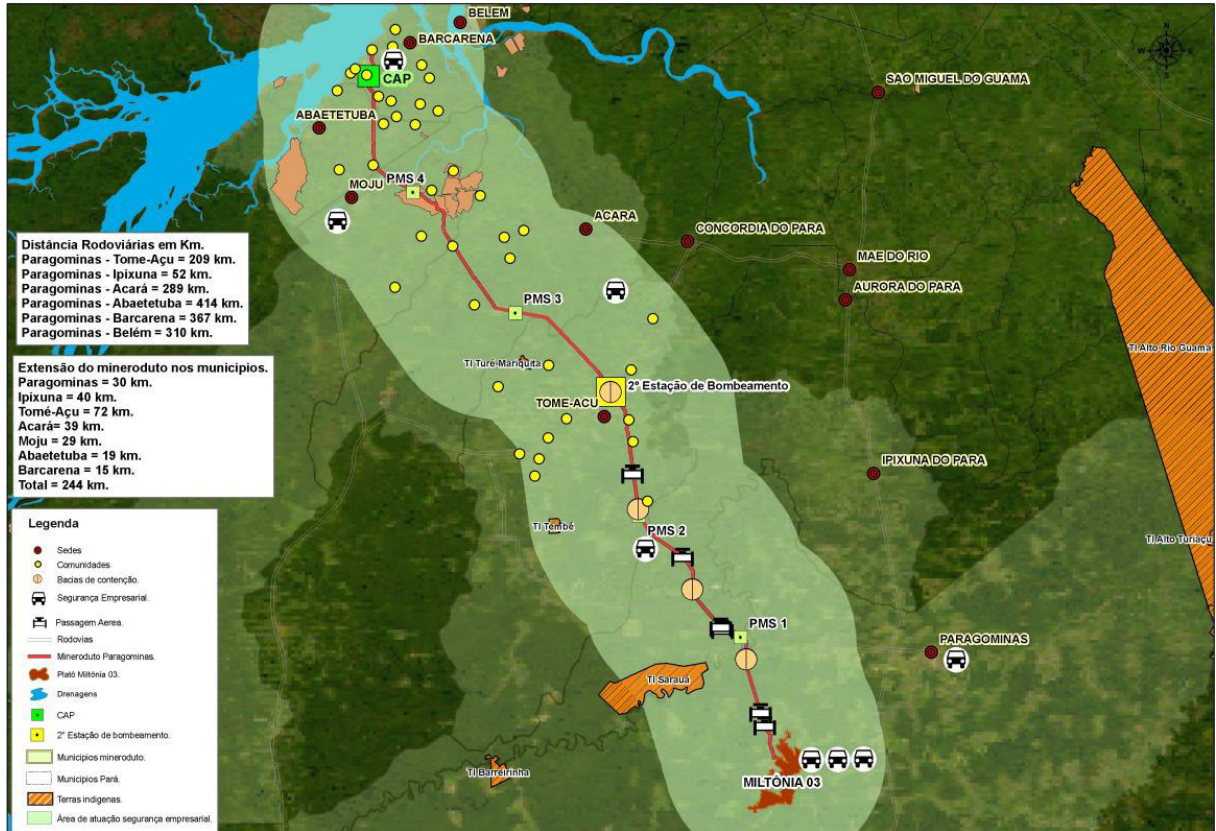


Fonte: Constran (2020).

A Figura 4 mostra a rota do mineroduto que passa por florestas tropicais, rios, rodovias, comunidades e territórios indígenas o que reforça ainda mais o controle de suas operações quanto a segurança e o meio ambiente. Atravessa quatro rios principais - Capim, Acara Mirim, Acara e Moju. Também atravessa as rodovias PA-256, 451, 252 e 151.

Ainda sobre a Figura 4 é possível destacar que o sistema de tubulação é projetado com um sistema de detecção de vazamento e cinco estações de monitoramento de pressão intermediária (PMS) em intervalos de cerca de 40 km para fornecer dados constantes de pressão da tubulação ao operador da tubulação. Os dados de pressão são transmitidos usando um sistema de cabo de fibra óptica. Existe a presença da 2.^a estação de bombeamento, que tem seis bombas tipo pistão diafragma com a mesma capacidade de fluxo e pressão da 1.^a estação.

Figura 4 – Mapa mostrando a rota do mineroduto de bauxita.



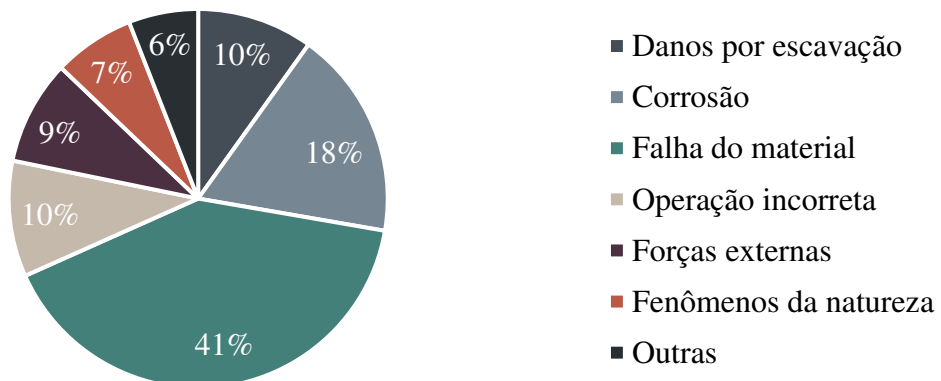
Fonte: Ministério Público Federal (2018).

3.2 Integridade de Dutos

3.2.1 GERENCIAMENTO DE AMEAÇAS/FALHAS A DUTOS

Para Tiratsoo (2019) “uma ameaça é qualquer coisa que cause danos”. No contexto das tubulações, defeitos por corrosão, danos por impacto de máquinas de escavação, movimento do solo, mudança organizacional, operação incorreta, e até mesmo roubo e crimes cibernéticos são consideradas ameaças a integridade da operação deste ativo, conforme exposto na Figura 5.

Figura 5 – Causa de falhas em tubulações industriais nos EUA (2005 – 2019).



Fonte: Tiratsoo (2019).

Para De Oliveira (2016) a integridade de um duto pode ser avaliada de forma quantitativa para condições de novo ou em serviço, neste último caso, a avaliação ocorre após a constatação de algum dano no duto. Essa análise de risco é definida como a identificação de propriedades materiais, elementos do sistema ou eventos que levam a danos ou perdas.

Ainda segundo De Oliveira (2016), o dano é uma transformação na microestrutura do material ou na geometria de um duto, gerada em decorrência da operação desse sistema. Já o defeito seria o dano crítico para as condições desejadas de operação do sistema, ou seja, quando o estado de dano acumulado põe em risco a funcionalidade da estrutura.

Oliveira (2016) apud Freire (2009) abordam que vários defeitos podem deteriorar um duto ao longo de sua vida útil, sendo a redução de espessura de parede causada por processo corrosivo, um dos mais decorrentes. Logo, a avaliação da resistência de dutos, com defeitos causados por corrosão, tem importância crescente. Isso devido a:

Motivos econômico-financeiros e ecológicos, as operadoras destas linhas precisam evitar que os dutos corroídos sofram rupturas, que impliquem em vazamentos de produto, interrupções forçadas de operação e danos ao meio ambiente. A prevenção de acidentes, representa uma economia considerável de recursos pois envolve também a preservação da integridade de pessoas (funcionários da operadora e terceiros), a preservação da imagem da operadora e a prevenção de danos materiais (patrimônio da operadora e de terceiros) (BENJAMIN, 2014).

O gerenciamento de ameaças está contido na estrutura de uma abordagem de gerenciamento de risco. Assim, um programa moderno de gerenciamento de integridade de dutos geralmente inclui inspeções regulares seguidas por avaliação de integridade e, se necessário, medidas de reparo e reabilitação (TIRATSOO, 2019).

A primeira etapa na identificação e avaliação das ameaças de um duto é definir e reunir os dados e informações necessários que caracterizam o duto e as ameaças potenciais (ASME, 2004). Esses dados incluirão operação de dutos, manutenção, patrulhamento, projeto, histórico operacional e falhas específicas. Os dados a serem coletados e integrados devem ser de qualidade e amplitude suficientes para que possam ser usados na identificação da ameaça e em qualquer avaliação de risco associada.

Ressalta-se que a qualidade e a consistência dos dados podem ser questões significativas, e coletar os dados corretos é essencial (API, 2013). A indisponibilidade dos dados corretos, ou de baixa qualidade, não são uma justificativa para a exclusão de uma ameaça (DRAKE *et al.*, 2012). Identificar ameaças é apenas parte do processo, e a chave do sucesso é como o sistema de gestão opera na prática (TIRATSOO, 2019).

3.2.3 FERRAMENTA DE IDENTIFICAÇÃO DOS DEFEITOS (*IN-LINE INSPECTIONS*)

Os dutos normalmente não são acessíveis para inspeção externa, pois estão em condição enterrada ou submersa. Logo, para avaliar se uma tubulação é adequada para o propósito (*Fit For Purpose*) implica examinar todo o duto, sua circunferência completa e seu comprimento total. Uma alternativa conhecida para esse fim é a utilização de equipamentos PIG (*Pipeline Inspection Gauge*) sendo inseridos no duto, viajam por toda a sua extensão, empurrados pela própria vazão do produto (CORDEIRO, 2008; TIRATSOO, 2019).

Estes são projetados para realizar várias tarefas no interior de um duto os quais não seriam possíveis de se obter por outro método de inspeção. As tarefas seriam: limpeza, calibração, separação de produtos, avaliação geométrica e identificação de perda de espessura (MAZZINI, 2009).

Segundo Cordeiro (2008), os PIGs capazes de identificar a perda de espessura também são classificados como PIGs instrumentados, sendo utilizados para detecção e o dimensionamento dos defeitos. Estes funcionam a partir de dois princípios, *Magnetic Flux Leakage* (MFL) ou por ultrassom. Ambos têm a capacidade de identificar pequenos defeitos como pites, trincas ou perda de espessura.

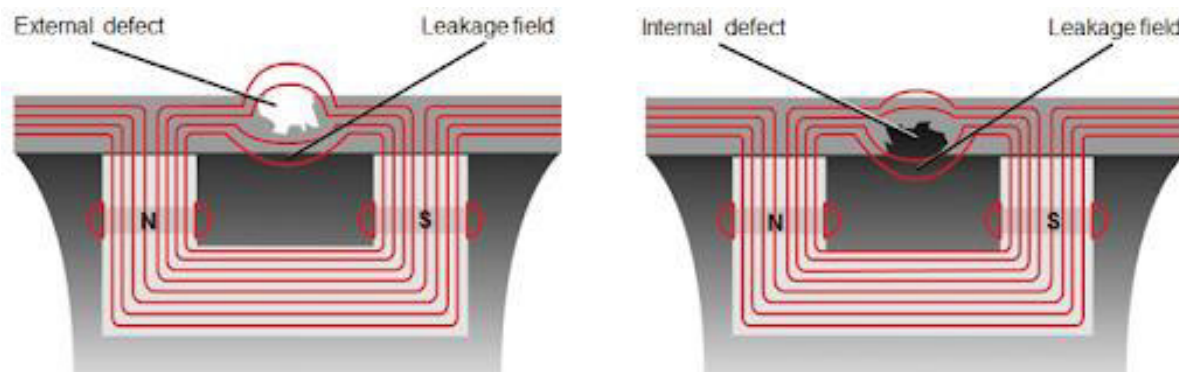
Os dados utilizados são oriundos de um PIG com princípio de funcionamento via *Magnetic Flux Leakage*, que consiste na fuga do campo magnético ao passar por uma área corroída, Figura 6.

Conforme exposto no estudo de Curvelo (2016):

O princípio de funcionamento desse é através de um campo magnético qual é gerado na parede do duto por ímãs montados no PIG. Caso existam descontinuidades como a corrosão, o fluxo magnético vai deixar de ser uniforme e passará a ter um “campo de fuga”, que é o escapamento do campo para fora da peça. Para a medição dos valores de campo magnético são utilizados sensores do tipo Hall. Esses sensores conseguem detectar bem uma corrosão, mas não conseguem identificar se ela é interna ou externa. Para isso servem os sensores discriminadores. Se o sensor Hall detectar corrosão e o sensor discriminador não detectar nada, então trata-se de uma corrosão externa. Caso o sensor discriminador também detecte a corrosão, então se trata de uma corrosão interna.

A corrosão é um dos principais problemas que surgem em um duto após algum tempo de operação, PIGs de inspeção para detecção de corrosão são muito utilizados e servem para identificar quais regiões da tubulação estão possivelmente necessitando de reparo. A estimativa da pressão de ruptura de um defeito de corrosão será tão mais precisa quanto melhor for a caracterização do defeito quanto às suas dimensões (CROUCH; SMITH, 2001).

Figura 6 – Representação dos princípios do Magnetic Flux Leakage.



Fonte: IOV Asia (2021).

3.3 Defeitos por corrosão

Os dutos, assim como outras estruturas, se deterioram com o tempo, e em particular, um dano importante em tubos de aço é a corrosão. Essa é a deterioração que geralmente ocorre em um material metálico. É devido à ação química ou eletroquímica do meio ambiente, aliada ou não a esforços mecânicos (WOLYNEC, 2003).

A destruição, causada pela interação físico-química entre o material e o seu meio operacional, representa alterações indesejáveis sofridas pelo material, tais como a perda de suas principais qualidades como elasticidade, ductibilidade, resistência mecânica, tornando assim a ferramenta inadequada para o uso (GENTIL, 2011).

Esse mecanismo da corrosão pode ser classificado como: eletroquímica e química. A principal diferença está na ocorrência do deslocamento de elétrons que só ocorre na corrosão eletroquímica. Para dutos, é notada a ocorrência apenas da corrosão eletroquímica e como exemplos tem-se: corrosão em água ou soluções aquosas; corrosão atmosférica; corrosão pelo solo (processo corrosivo observado em dutos enterrados) (DE ARAÚJO, 2012).

Em geral, os dutos geralmente recebem duas formas de proteção. Um revestimento externo representa a forma primária de proteção, enquanto a proteção catódica é a forma secundária, está projetada para proteger a superfície externa do duto, enterrado ou submerso (LOUREIRO, 2005).

Os tipos mais comuns de corrosão que podem ocorrer em dutos enterrados são (GENTIL, 2011):

- Corrosão por pitch devido às não homogeneidades do material;
- Corrosão sob tensão induzida por cloreto ou por sulfato;

- Corrosão por aeração diferencial que ocorre pelas diferenças de concentração de oxigênio no solo adjacente ao tubo, nas diferentes regiões;
- Corrosão induzida por microrganismos, sob condições anaeróbicas, por bactéria redutora de sulfato e bactéria produtora de ácido;
- Corrosão galvânica por correntes parasitas.

Destaca Loureiro (2005), que estes defeitos por corrosão não afetam o duto igualmente em toda a extensão e que a corrosão não cresce à mesma taxa. Logo, para garantir a sua integridade, deve-se detectar esses defeitos e avaliar se são significativos ou não evitando a falha. No passado comumente isto levava a paradas não programadas e reparos dos dutos.

3.4 Métodos de análises de defeitos de corrosão

Segundo Cordeiro (2008), os métodos para avaliar a resistência de um duto podem ser analíticos, semiempíricos, empíricos e numéricos. Dessa forma, a análise de tensões e deformações da mecânica dos sólidos é frequentemente utilizada para aproximações em reproduzir um problema físico (HIBBELER; KIANG, 2015). No caso dos dutos, devido ao trabalho em condição pressurizada, as paredes oferecem pequena resistência à flexão, sendo possível considerar os esforços internos que atuam nas paredes como tangente à superfície do tubo.

Segundo Beer e Johnston (1989) e Cordeiro (2008), para saber a pressão de operação segura de um tubo deve se utilizar é a tensão circunferencial (equação 1), que é o dobro da longitudinal (equação 2). Essa mesma tensão é utilizada na formulação dos métodos analíticos semiempíricos, isolando o termo da pressão, e substituindo o valor da tensão circunferencial pela tensão de escoamento do material do tubo, conforme a equação 3, podendo ainda ser adicionado um fator de segurança.

$$\sigma_{circ} = \frac{PD}{2t} \quad (1)$$

$$\sigma_{long} = \frac{PD}{4t} \quad (2)$$

$$P = \sigma_y \frac{2t}{D} \quad (3)$$

3.4.1 MODELOS ANALÍTICOS SEMIEMPÍRICOS

Segundo Cabral (2007), alguns métodos existentes para avaliação de defeitos de corrosão em dutos utilizam conceitos da mecânica da fratura, que com a incorporação de informações empíricas como ensaios práticos (teste de ruptura), resultam em expressões analíticas. Se aplicadas dentro de seus limites de validação, essas expressões permitem estimar a pressão de ruptura de dutos com defeitos.

Para a proposta desse trabalho, dentre os diversos modelos encontrados na literatura, foram escolhidos o ASME B31G (*American Society of Mechanical Engineers*), ASME B31G Modificado ou também conhecido como 0.85dL e DNV RP F101 (*Det Norske Veritas Recommended Practice RP-101 Corroded Pipelines*).

A formulação dos modelos é baseada nos critérios da equação NG-18 *Surface Flaw Equation*. Este cálculo foi apresentado por Kiefner e Duffy, em 1971, no relatório *Summary or Research to Determine the Strength of Corroded Areas in Line Pipe* (KIEFNER; DUFFY, 1971).

A equação descreve uma relação entre a tensão de fluxo no cilindro pressurizado e o tamanho do defeito:

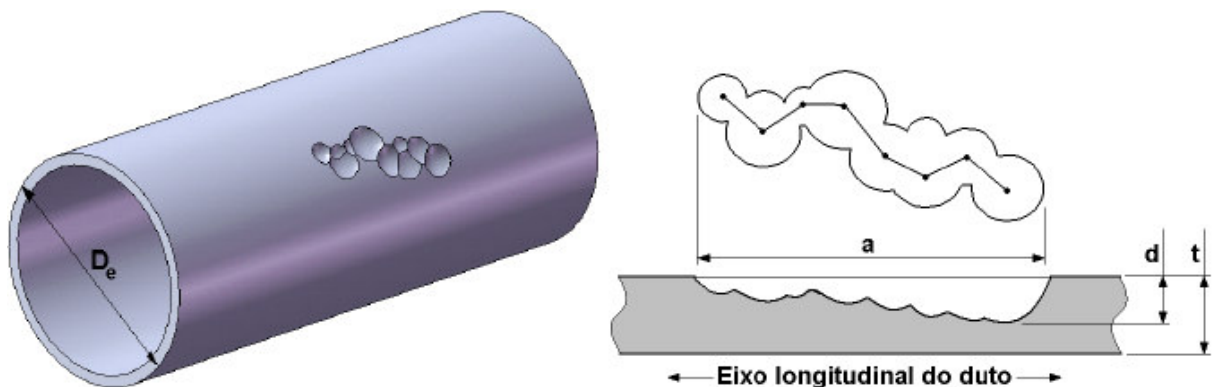
$$\sigma_{rup} = \sigma_{flow} \cdot f_R \quad (4)$$

O fator de redução é obtido pela seguinte equação:

$$f_R = \frac{1 - \alpha \cdot \frac{A}{A_0}}{1 - \alpha \cdot \left(\frac{A}{A_0}\right) M^{-1}} \quad (5)$$

O fator de dilatação foi criado para considerar a deformação em forma de bolha na tensão circunferencial aplicada na região corroída, Figura 7.

Figura 7 – Representação das dimensões do defeito de corrosão em dutos.



Fonte: Cordeiro (2008).

3.4.1.1 Modelo semiempírico ASME B31G

Segundo Squarcio (2009), Ferraz (2007) e Amaral (2011), dentre outros autores, o método que apresenta resultados mais conservadores é o modelo semiempírico ASME B31G, que, no entanto, pode ser bastante antieconômico pela remoção de vários dutos ainda em perfeitas condições de operação. Esse método avalia dutos submetidos apenas à pressão interna, considerando a geometria da corrosão em formato parabólico e a tensão de falha em função apenas da tensão de escoamento do material do duto.

Este método de avaliação de defeito foi incluído nas normas ASME B31.4 e ASME B31.8 e descrito em detalhes no documento ANSI/ASME B31G – 1984 *Manual for Determining the Remaining Strength of Corroded Pipelines*, o qual foi revisado e reeditado como ASME B31G 2012 (ASME, 1991; 2004; 2012; 2019).

O emprego deste método está limitado às seguintes condições:

- Dutos construídos segundo as normas ASME B31.4, ASME B31.8 e ASME B31.11;
- Dutos, com corrosão, fabricados com aço carbono ou aços de alta resistência de baixa liga, do tipo ASTM A 53, A 106, A 381, API 5LX e API 5L;
- Corrosão no corpo do duto, com contornos relativamente suaves que não cause elevada concentração de tensão;
- Não pode ser aplicado para corrosão em soldas longitudinais ou circunferenciais, áreas afetadas termicamente, danos mecânicos como “*gouges*” e “*grooves*” e defeitos de fabricação na chapa de aço;
- Duto sujeito apenas a carregamento de pressão interna;
- Defeitos de corrosão com perda de espessura compreendida entre 10% e 80% da parede do duto.

As considerações feitas para a sua aplicação são as seguintes:

- A tensão circunferencial no defeito no instante da ruptura é igual à tensão de escoamento média (S_{flow}) sendo calculada da seguinte forma: $S_{flow} = 1,1 \cdot SMYS$.
- O defeito é considerado curto se $L \leq 20Dt$, e longo se $L > 20Dt$.
- Para defeitos considerados longos, o fator de dilatação M assume um valor muito grande, tendendo para infinito.

O modelo ASME B31G considera a forma irregular do defeito de corrosão, como perfil em forma parabólica. A partir do perfil parabólico, tem-se a área de perda de metal definida para defeitos curtos. Quando o comprimento do defeito aumenta, a representação parabólica da

área de perda de metal se torna menos precisa. Entretanto, para defeitos longos a ASME B31G considera a área de perda de metal como um perfil retangular (TORO, 2014).

Substituindo as equações tem-se as expressões da pressão de ruptura para o caso de defeitos curtos e longos assim como o fator de dilatação (M):

$$M = (1 + 0,8z)^{1/2} \quad (6)$$

Pressão de ruptura para defeitos curtos ($L \leq 20Dt$):

$$S_F = S_{flow} \left[\frac{1 - 2/3 (d/t)}{1 - 2/3 (d/t)/M} \right] \quad (7)$$

Pressão de ruptura para defeitos longos ($L > 20Dt$):

$$S_F = S_{flow}(1 - d/t) \quad (8)$$

3.4.1.2 Modelo semiempírico ASME B31G modificado

Esta versão modificada do método ASME B31G foi proposta por Kiefner e Vierth (1989), como resultado do Projeto PR 3-805 do Pipeline Research Committee da AGA com o Instituto Battelle (KIEFNER; VIETH, 1989).

O modelo ASME B31G modificado foi desenvolvido porque o modelo B31G apresentava resultados excessivamente conservadores. O fator de dilatação foi modificado para obter valores mais exatos e uma pressão de falha menos conservadora. Também apresentaram uma nova geometria para o defeito corrosão, com formato entre o parabólico e retangular (TORO, 2014).

As principais diferenças entre a versão modificada e original da ASME B31G são as seguintes:

- A área do material perdido equivale a $0,85 dL$, ou seja, $\alpha = 0,85$;
- A tensão de escoamento média é dada por: $\sigma_{flow} = SMYS + 69 MPa$;
- Aplicável para defeitos de corrosão com perda de espessura compreendida entre 20% e 80% da parede do duto, inclusive na região do cordão de solda do tipo SAW.
- O defeito é classificado como curto se $L \leq 50Dt$ e longo se $L > 50Dt$.

Substituindo as equações tem-se as expressões da pressão de ruptura para o caso de defeitos curtos e longos assim como o fator de dilatação (M):

Pressão de ruptura para defeitos curtos ($L \leq 50Dt$):

$$M = (1 + 0,6275z - 0,003375z^2)^{1/2} \quad (9)$$

Pressão de ruptura para defeitos longos ($L > 50Dt$):

$$M = 0,032z + 3,3 \quad (10)$$

$$S_F = S_{flow} \left[\frac{1 - 0,85(d/t)}{1 - 0,85(d/t)/M} \right] \quad (11)$$

3.4.1.3 Modelo semiempírico DNV RP-F101

A norma DNV-RP-F101 exibe instruções baseadas na experiência de 4 anos de uso, resultantes de uma parceria *entre British Gas Technology e Det Norske Veritas* (DNV), e o patrocínio de 11 empresas/organizações internacionais, incluindo a Petrobras, para dutos corroídos sujeitos a pressão interna e pressão interna combinada com tensões de compressão longitudinal (FERRAZ, 2007; LOUREIRO, 2005).

O resultado deste estudo gerou o documento publicado em 1999, chamado DNV RP-F101 (VERITAS, 2010). As recomendações foram desenvolvidas através de extensivos testes laboratoriais em escala real, precisamente 138 testes de ruptura em dutos, considerando defeitos reais e usinados, e análises por simulações numéricas através do método dos elementos finitos, considerando formas de corrosão longitudinal e circunferencial. Foram considerados também defeitos de corrosão internos e externos, interação de defeitos de formato complexo.

A recomendação apresenta duas formas de avaliação da corrosão, chamadas parte A e parte B. O primeiro, aplica-se na formulação de fatores parciais de segurança baseados nas incertezas associadas ao dimensionamento do defeito, geometria do tubo e das propriedades dos materiais. O segundo é baseado no conceito de tensões admissíveis, aplicado a um fator de segurança, esse igual ao de projeto no valor da pressão de falha obtido pelo método (CORDEIRO, 2008).

O método não pode ser aplicado para as seguintes condições:

- Dutos que não sejam fabricados com aço carbono;
- Aços com grau superior ao X80;
- Defeitos não suaves, do tipo trinca;
- Corrosão combinada com trinca;

- Defeitos de perda de espessura provocados por danos mecânicos (“*gouges*”);
- Defeitos de fabricação em soldas;
- Defeitos com perda de espessura maior que 85% da parede do duto;
- Em materiais em que a temperatura de transição seja acima da temperatura de operação;
- Defeitos cuja largura seja maior que seu comprimento.

4 METODOLOGIA

Para um efetivo desenvolvimento dos objetivos e uma estrutura consistente de análise e argumentação, o presente estudo consiste em uma pesquisa de análise de dados e adota-se para tratamento de resultados uma abordagem quantitativa dos resultados obtidos, que visa analisar comparativamente normas para a determinação da pressão de ruptura em dutos a partir de defeitos de corrosão.

Nesse sentido, a metodologia do trabalho baseou-se na estruturação lógica de duas etapas para o posterior desenvolvimento dos resultados:

1. Aquisição de dados;
2. Tratamento de dados.

4.1 Aquisição de dados

A maneira pela qual foi possível obter-se os dados para o duto foi através de uma inspeção interna em seu interior, conforme apresentado no item “Ferramenta de identificação dos defeitos (*in-line inspections*)”. Todavia, antes da inspeção, uma tubulação deve ser verificada para determinar se está pronta para ser inspecionada. Isso aborda as questões de limpeza, acessibilidade, negociabilidade, propulsão, preparação de ferramentas, trabalho *in loco*.

4.1.1 PREPARAÇÃO DAS FERRAMENTAS

As ferramentas foram preparadas nas instalações do fornecedor. A preparação também incluiu calibrações e outros procedimentos necessários antes da inspeção. Após esta etapa, as ferramentas serão transportadas para o local, onde quer que o duto esteja.

4.1.2 ACESSIBILIDADE NO MANUSEIO DAS FERRAMENTAS

Para a realização do procedimento de limpeza o PIG, foi introduzido na tubulação, portanto, os pontos de acesso, chamados lançadores e receptores, devem estar disponíveis (Figura 8). As geometrias devem estar adequadas, e atenção deve ser dada para pontos que tenham a presença de acidentes ou fluxos conectados ao duto principal, como by-pass.

Figura 8 – Canhão lançador de PIG, estação de bombeamento 2.



Fonte: Autor (2021).

4.1.3 CONDIÇÕES PARA OPERAÇÃO ADEQUADA DAS FERRAMENTAS

As ferramentas vêm com suas próprias especificações de uso (Tabela 4). Logo, precisaram ser operadas dentro dessas especificações para coletar dados com a mais alta qualidade possível. Parâmetros como velocidade de inspeção, pressões, temperaturas e geometrias disponíveis são importantes e devem estar na faixa indicada de operação.

Tabela 4 – Resumo de informações PIG MFL

Parâmetros	PIG MFL
Faixa de velocidade [m/s]	0,1 - 5
Pressão máx. de operação [kgf /cm ²]	153
Pressão mín. de operação [kgf /cm ²]	30,6
Nível de magnetização [kA/m]	10 - 30
Faixa de temperatura [°C]	0 - 50
Comprimento [m]	0,829 - 1,384

Fonte: Autor (2021).

4.1.4 LIMPEZA DO DUTO

Na coleta dos dados, a superfície interna do tubo deve estar o mais limpa possível. Para isso, qualquer coisa aderida ao tubo, como por exemplo detritos, incrustações, cera; devem ser removidas. Esse procedimento permite que os sensores do PIG instrumentado não sejam danificados ou impedidos de coletar os dados de inspeção corretamente.

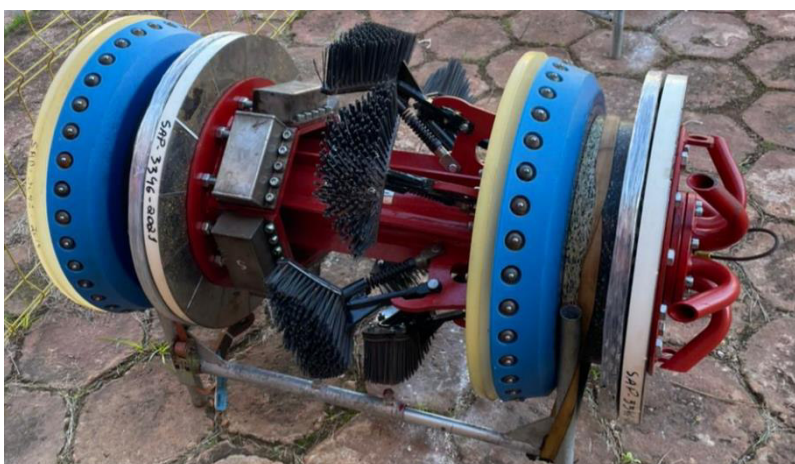
Tabela 5 – Resumo de informações PIG de limpeza

PIG	Peso [kg]	Comprimento [m]	Placa de medição [uni.]	Disco guia [uni.]	Disco de selagem [uni.]	Escova [uni.]	Magnético [uni.]
Placa calibradora	175	1,088	1	4	3	0	0
Limpeza magnética	235	1,003	0	4	2	6	6

Fonte: Autor (2021).

Os instrumentos de limpeza utilizados foram um PIG do tipo placa calibradora, normalmente feita em alumínio, a qual indica evidência de obstruções geométricas a partir de amassamentos na placa.

Posteriormente, o PIG de limpeza magnética formado por um conjunto de escovas de aço sobre molas que raspam a superfície interna do duto, proporcionando a remoção dos detritos aderidos à superfície do duto, foi empregado. Este também possui ímãs em sua superfície que tem por finalidade atrair partículas ferrosas, indicadas na (Figura 9).

Figura 9 – Foto do PIG de limpeza magnética.

Fonte: Autor (2021).

4.1.5 INSPEÇÃO PIG INSTRUMENTADO

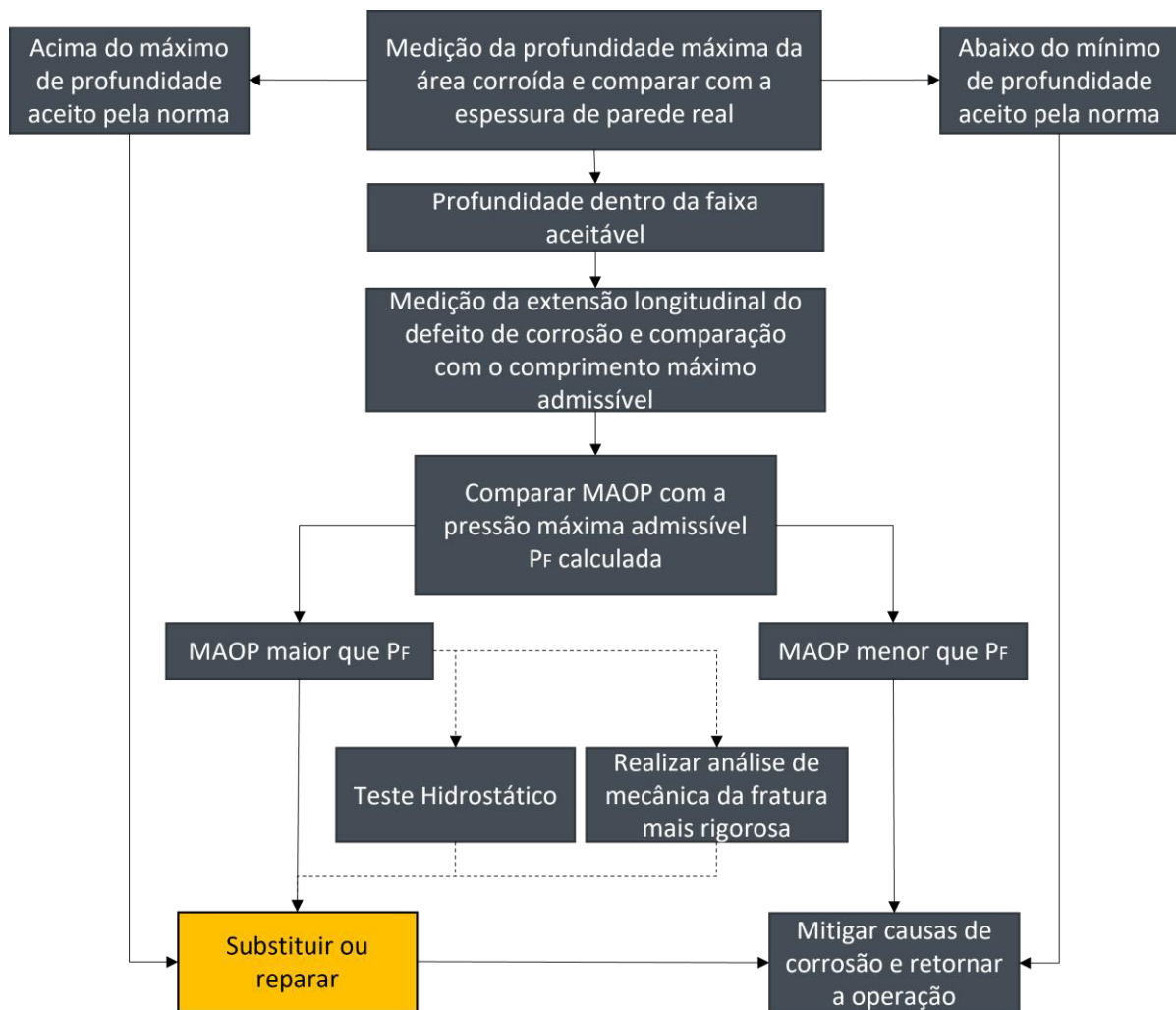
A ferramenta MFL foi finalmente preparada e verificada antes de iniciado o processo de inspeção instrumentada ter seu início. Caracterizam-se as anomalias através do princípio de vazamento de fluxo. À medida que a ferramenta se movimenta através da linha, os defeitos que rompem este campo aplicado são registrados por sensores. Tais medições foram analisadas para estimar o defeito geométrico e a severidade.

4.1.6 ANÁLISE DE DADOS E RELATÓRIOS

Os dados coletados foram então analisados. Com base nesses dados, o fornecedor de ILI preparou um relatório sobre as descobertas. Este relatório veio nos formatos, impresso, eletrônico ou pronto para inclusão em um software de gerenciamento de integridade de dutos.

4.1.7 FLUXOGRAMA DO PROCEDIMENTO DE ANÁLISE DE FALHA

Figura 10 – Procedimento de estimativa de vida útil para o estudo proposto.



Fonte: Adaptado Tiratsoo (2019)

4.2 Tratamento dos dados – Modelos analíticos semiempíricos

Para a proposta desta pesquisa dentre os diversos modelos encontrados na literatura, os utilizados para a avaliação são o ASME B31G (*American Society of Mechanical Enginners*),

ASME B31G Modificado ou também conhecido como 0.85dL e DNV RP F101 (*Det Norske Veritas Recommended Practice RP-101 Corroded Pipelines*) parte B.

4.2.1 NÍVEL DE ANÁLISE B31G

De acordo com a norma ASME (2012), adotou-se a avaliação de Nível 1, que consiste em um cálculo baseado em medições únicas da profundidade máxima e extensão axial da perda de metal, aplicado aos modelos semiempíricos B31G e B31G modificado.

4.2.2 NÍVEL DE ANÁLISE DNV-RP-F101

A abordagem utilizada da DNV-RP-F101 foi a parte B, baseada no formato projeto de tensão permitida. A pressão de falha (capacidade) do defeito de corrosão é calculada e essa pressão de falha é multiplicada por um único fator de uso com base no fator do projeto original. Não foram consideradas incertezas associadas ao dimensionamento do defeito de corrosão.

Para a avaliação das pressões de ruptura foram considerados os requisitos referentes a um defeito único e um defeito com forma complexa, onde foram realizados os cálculos a partir do uso do software Microsoft Excel, seguindo os procedimentos descritos pelas normas. Alguns parâmetros utilizados nas formulações estão dispostos na Tabelas 7 e Tabela 8.

Tabela 6 – Propriedades mecânicas do aço API 5L X70 utilizadas

Especificação de aço	Grade	SMYS (MPa)	SMTS (MPa)
API 5L	X70	482	565

Fonte: ASME (2019).

Tabela 7 – Especificações do sistema utilizadas

Diâmetro externo [m]	Extensão [km]	Revestimento externo	Fator de segurança
0,6096	244	Polietileno tripla camada (3LPE)	0,8

Fonte: Autor (2021).

4.2.3 TAXA DE CRESCIMENTO DA PERDA DE METAL

As taxas de crescimento de corrosão foram utilizadas para as tomadas de decisão de integridade. O modelo determinístico adotado foi o de taxa de crescimento de corrosão linear. Este estima a profundidade de um defeito de corrosão ao longo do tempo, assumindo um comportamento linear para as taxas de crescimento de corrosão, segundo Vanaei *et al.* (2017).

Conforme observado na Tabela 6, existe a presença de defeitos de erosão, que foram avaliados como uma corrosão de grande comprimento.

O modelo avalia a taxa de crescimento de corrosão determinada a partir de dois conjuntos de dados de inspeção. Para o trabalho proposto as datas de campanha de inspeção avaliadas foram entre 18/02/2017 e 03/09/2019, referentes as últimas campanhas realizadas. Os dados utilizados foram todos os pontos referentes a defeitos encaminhados nos relatórios dos fornecedores nas duas datas destacadas. De acordo com a equação a seguir:

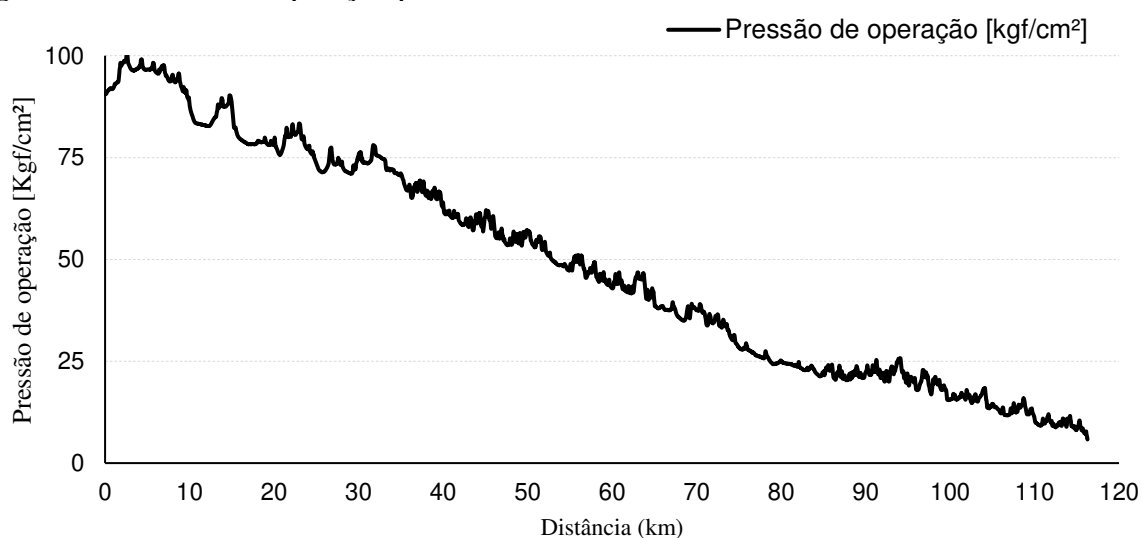
$$\text{Taxa de perda de metal} = \frac{d_{T_2} - d_{T_1}}{\Delta t} \quad (11)$$

Desta forma, a avaliação dessa taxa de crescimento do defeito foi proposta com base em correlação direta, um mesmo defeito localizado na mesma posição nos dois anos de inspeção, distanciamento máximo da localização do defeito igual a 10 mm entre os anos e 100 mm.

4.2.4 ESTIMATIVA DE FALHA FUTURA

Para a estimativa de vida útil ambos os defeitos foram combinados, devido a ocorrência dos dois fenômenos simultaneamente no trecho estudado. Somente a ASME B31G modificada e DNV-RP-F101 para defeitos complexos foram utilizadas. O gatilho de falha foi mantido, quando P_F é igual ou maior que P_O/SF ou o limite de profundidade do defeito regido por cada norma (80% e 85%). A Figura 11 representa o gradiente hidráulico de pressão.

Figura 11 – Pressão de operação primeiros 116 km do mineroduto



Fonte: Autor (2021).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Entendimento do banco de dados

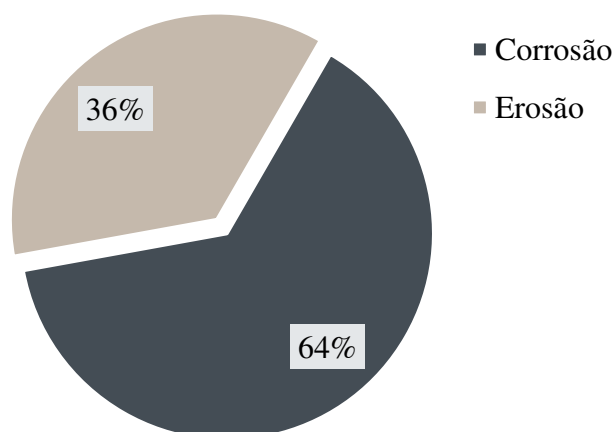
A Tabela 6 mostra os 30 pontos alvo do estudo proposto no trabalho. Para o melhor entendimento desta, a primeira coluna do banco de dados refere-se ao “*log dist. [m]*”, equivalente a localização do defeito na trajetória do duto. Suas respectivas coordenadas geográficas também são expostas no *Pipe Tally*, porém as informações não foram representadas devido ao sigilo da companhia.

Em seguida, a coluna “*event*” aponta o tipo do defeito indicado a partir do perfil registrado pelo instrumento PIG; a coluna “*j. number*” representa o número da junta a montante ao defeito identificado. Para encontrar o valor real das juntas deve-se dividir o valor apontado por 10. A coluna “*t (as built)*”, “*t (ut)*” e “*o’ clock*” representam a espessura nominal, espessura real e o ângulo formado a partir da identificação do defeito (assume-se como 12h o ângulo 0°), respectivamente,.

Logo após, na sequência, tem-se a profundidade do defeito em porcentagem, e valor absoluto, a espessura restante do duto, dimensões do defeito em comprimento e largura, superfície do defeito, se interna ou externa e altura da tubulação na localização indicada. Por fim, os valores mínimos de espessura de parede, em cada um dos 4 quadrantes da tubulação (posição 12, 3, 6 e 9).

A quantidade de 30 pontos selecionados para o estudo tenta replicar a proporção total dos defeitos presentes no mineroduto (Figura 12). Esse valor não foi exposto em magnitude devido a aspecto de preservação de informações.

Figura 12 – Distribuição de defeitos ao longo do mineroduto.



Fonte: Autor (2021).

Tabela 8 – Base de dados: Defeitos extraídos do relatório de anomalias (*Pipe Tally*)

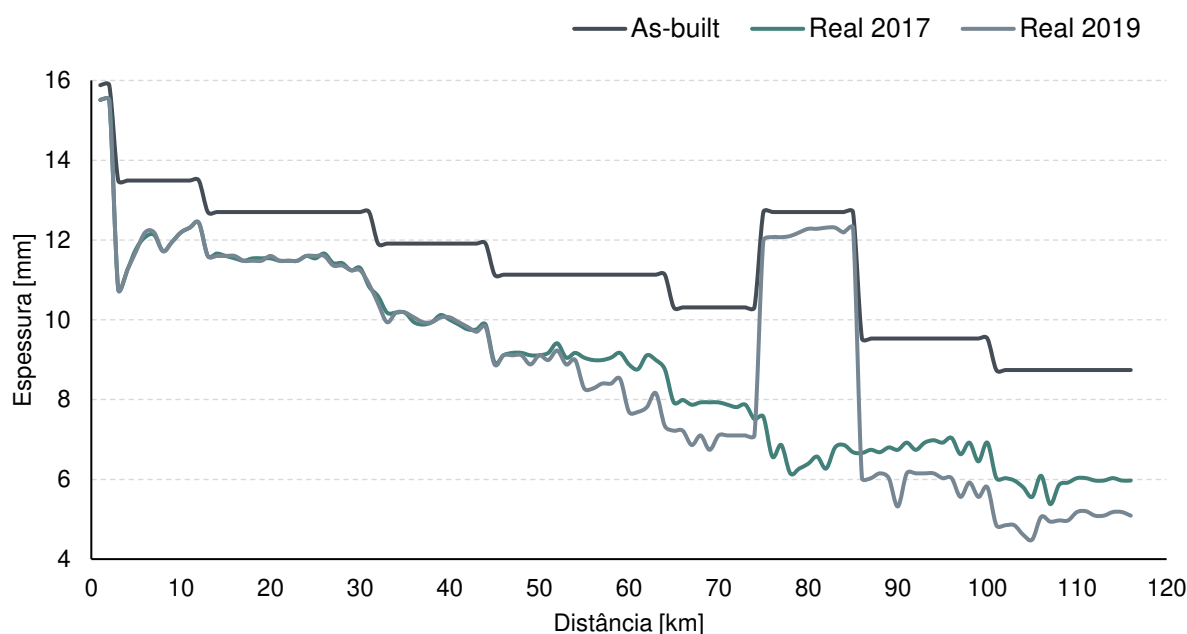
log dist. [m]	event	j. number	t (as built) [mm]	t (ut) [mm]	o'clock [°]	depth [%]	abs. depth [mm]	rem. t [mm]	length [mm]	width [mm]	surf. loc.	height [m]	min. t 12:00 [mm]	min. t 03:00 [mm]	min. t 06:00 [mm]	min. t 09:00 [mm]
67159,407	Erosion	55860	10,31	7,69	113	44	3,38	4,31	12252	726	INT	38,874	7,98	6,46	4,2	6,5
68982,617	Erosion	57350	10,31	7,34	101	48	3,52	3,82	11788	868	INT	34,213	7,7	6,5	4,05	6,45
68994,433	Erosion	57360	10,31	7,45	107	48	3,58	3,87	12249	795	INT	34,796	7,71	6,41	3,91	6,43
69030,117	Erosion	57390	10,31	7,45	101	43	3,2	4,25	12249	905	INT	34,93	7,71	6,5	4,29	6,01
69176,511	Erosion	57510	10,31	7,57	125	34	2,57	5	12296	598	INT	52,312	7,55	7,02	4,97	7,21
69420,249	Erosion	57710	10,31	7,34	118	44	3,23	4,11	12202	718	INT	27,603	7,68	6,59	4,05	6,27
69749,254	Corrosion	57970	10,31	7,22	140	13	0,94	6,28	14	15	INT	31,456	7,64	6,44	4,32	6,47
69749,956	Erosion	57980	10,31	7,34	122	42	3,08	4,26	12300	613	INT	31,478	7,89	6,59	4,32	6,6
70862,28	Erosion	58900	10,31	7,34	145	44	3,23	4,11	10992	383	INT	32,252	7,81	6,49	4,1	6,54
71529,743	Erosion	59450	10,31	7,45	119	49	3,65	3,8	12251	682	INT	32,049	7,76	6,5	3,86	6,42
71542,016	Erosion	59460	10,31	7,57	139	47	3,56	4,01	12278	460	INT	32,608	8,13	6,69	3,93	6,61
72476,914	Erosion	60250	10,31	7,22	138	45	3,25	3,97	12310	438	INT	27,532	7,66	6,6	3,94	6,56
72537,731	Erosion	60300	10,31	7,1	112	45	3,19	3,9	12277	598	INT	27,917	7,68	6,1	3,91	6,46
72940,328	Corrosion	60620	10,31	7,34	302	25	1,84	5,5	12	22	EXT	46,677	7,8	7	4,14	6,79
73088,232	Erosion	60750	10,31	7,69	143	47	3,61	4,08	12280	398	INT	35,538	8,16	7	4,12	6,86
73733,124	Corrosion	61280	10,31	7,34	303	12	0,88	6,46	28	62	EXT	47,158	7,74	7	3,85	6,49
88099,859	Corrosion	73760	9,53	6,15	106	18	1,11	5,04	85	117	EXT	52,058	6,92	5,04	3,43	5,02
88456,633	Corrosion	74050	9,53	6,15	163	45	2,77	3,38	64	160	EXT	47,778	6,93	5,02	3,5	5,02
91585,853	Corrosion	76640	9,53	7,63	169	52	3,97	3,66	48	99	EXT	33,098	6,95	5,07	3,39	5,09
92078,709	Corrosion	77050	9,53	6,27	159	47	2,95	3,32	74	232	EXT	33,491	6,8	5,16	3,52	5,15
101334,404	Corrosion	84690	8,74	5,09	155	30	1,53	3,56	102	266	EXT	28,29	5,52	4,51	2,96	4,48
101958,35	Corrosion	85200	8,74	4,97	164	31	1,54	3,43	103	153	EXT	20,665	5,48	4,46	2,8	4,5
102204,682	Corrosion	85400	8,74	4,97	161	41	2,04	2,93	236	236	EXT	28,229	5,53	4,73	3,12	4,69
102663,3	Corrosion	85790	8,74	4,97	166	36	1,79	3,18	193	155	EXT	34,766	5,47	4,53	2,94	4,53
102974,709	Corrosion	86040	8,74	4,97	166	35	1,74	3,23	57	149	EXT	23,298	5,48	4,64	3,02	4,62
102974,873	Corrosion	86040	8,74	4,97	170	35	1,74	3,23	18	55	EXT	23,285	5,48	4,64	3,02	4,62
103049,6	Corrosion	86090	8,74	5,09	161	43	2,19	2,9	127	203	EXT	24,678	5,53	4,68	3,05	4,57
103049,751	Corrosion	86100	8,74	5,18	161	44	2,28	2,9	66	207	EXT	24,703	5,32	4,64	3,03	4,69
109504,846	Corrosion	91370	8,74	5,18	167	32	1,66	3,52	194	391	EXT	20,869	5,67	4,75	3,17	4,78
112181,358	Corrosion	93550	8,74	5,09	164	32	1,63	3,46	82	150	EXT	34,207	5,66	4,32	2,94	4,26

Fonte: Autor (2021).

O primeiro aspecto a ser considerado é sobre o parâmetro t , espessura de parede da tubulação. O duto em estudo foi comissionado em 2007, logo são 14 anos de operação contínua do sistema.

Para as análises de pressão de ruptura, é de suma importância não utilizar a espessura *as-built* da tubulação, mas sim a espessura real registrada pelo equipamento PIG, devido a condição original estar modificada. A Figura 13 expõe a condição de deterioração da espessura de parede do sistema ao longo do tempo para o primeiro trajeto, devido a fatores como granulometria do material transportado, parâmetros operacionais e uso de inibidores de corrosão nesse sistema.

Figura 13 – Perfil de espessura de parede do mineroduto para o 1º trecho.



Fonte: Autor (2021).

Nota-se o comportamento decrescente da espessura da tubulação à medida que a distância aumenta devido a algumas premissas de projeto do sistema, como o aspecto financeiro. Esse efeito também ocorre sobre a variável pressão conforme apresentado na Figura 11. Dessa forma a espessura *as-built* do mineroduto foi adequada de forma a permitir um ganho financeiro, diminuindo o custo com o aço API 5L X70 em tubos de menor espessura equivalente a queda de pressão.

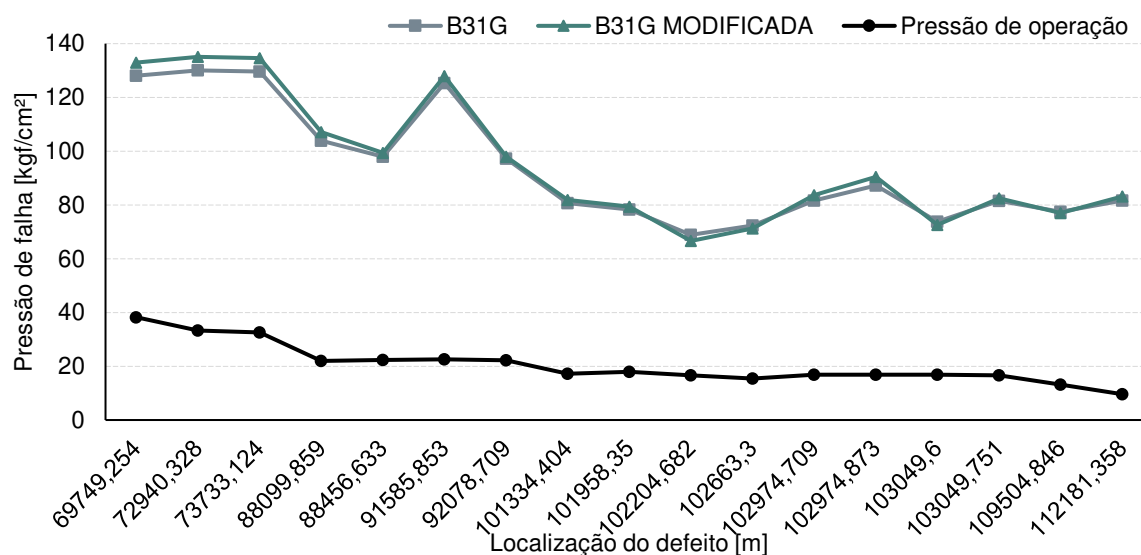
Sobre o trecho do km 74 ao 86, destaca-se que foi realizado uma troca da tubulação original existente antes da campanha de inspeção realizada em 2019, justamente alvo de risco como o estudo apresentado. Os pontos destacados como base na tabela de dados para o trabalho compreendem a espessura de parede real do duto em 2019, do km 67 ao 112.

5.2 Análise dos modelos semiempíricos para pressão de falha

5.2.1 ASME B31G E B31G MODIFICADA

A análise de pressão de falha em um duto destina-se a entender qual a capacidade máxima da tubulação de operar com segurança a partir da presença de defeitos. A Figura 14 apresenta o comportamento da avaliação dos defeitos por corrosão conforme os procedimentos B31G e B31G modificado. Todos os defeitos de corrosão estudados apontaram características de defeitos curtos ($z \leq 20$ para B31G e $z \leq 50$ para B31G modificado), devido ao comprimento médio dos defeitos ser de aproximadamente 88,4 mm.

Figura 14 – Análise de pressão de falha modelo semiempírico ASME B31G para os defeitos de corrosão presentes no mineroduto

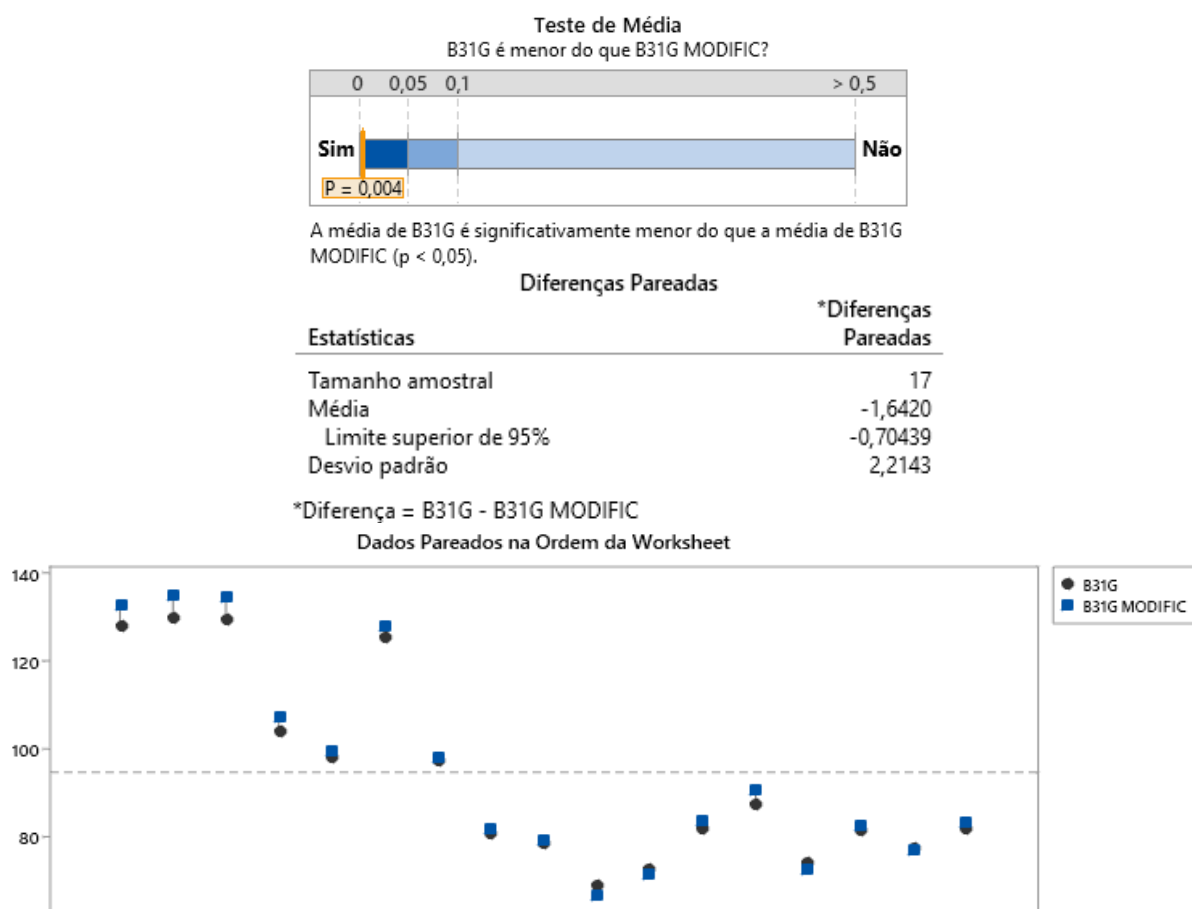


Fonte: Autor (2021).

É perceptível a proximidade visual entre ambas as estimativas, isso devido ao modelo B31G considerar para defeitos curtos um perfil em forma parabólica, quando o comprimento do defeito aumenta, a representação parabólica da área de perda de metal se torna menos precisa. Para defeitos longos a representação é aproximada para um retângulo. Somente para os defeitos de corrosão foi observado tal comportamento.

Apesar de visualmente os pontos estarem próximos, o teste de hipótese t pareado que examina a diferença média entre as observações dependentes para determinar se elas são significativamente diferentes, apontou diferença estatística para um intervalo de confiança de 95% e tamanho amostral de 17 defeitos de corrosão. Em média, o valor de pressão de ruptura para B31G modificada é 1,642 kgf/cm² maior que a avaliação B31G (Figura 15).

Figura 15 – Resultados do teste de hipótese t pareado B31G e B31G modificado, realizado com o *software* Minitab.



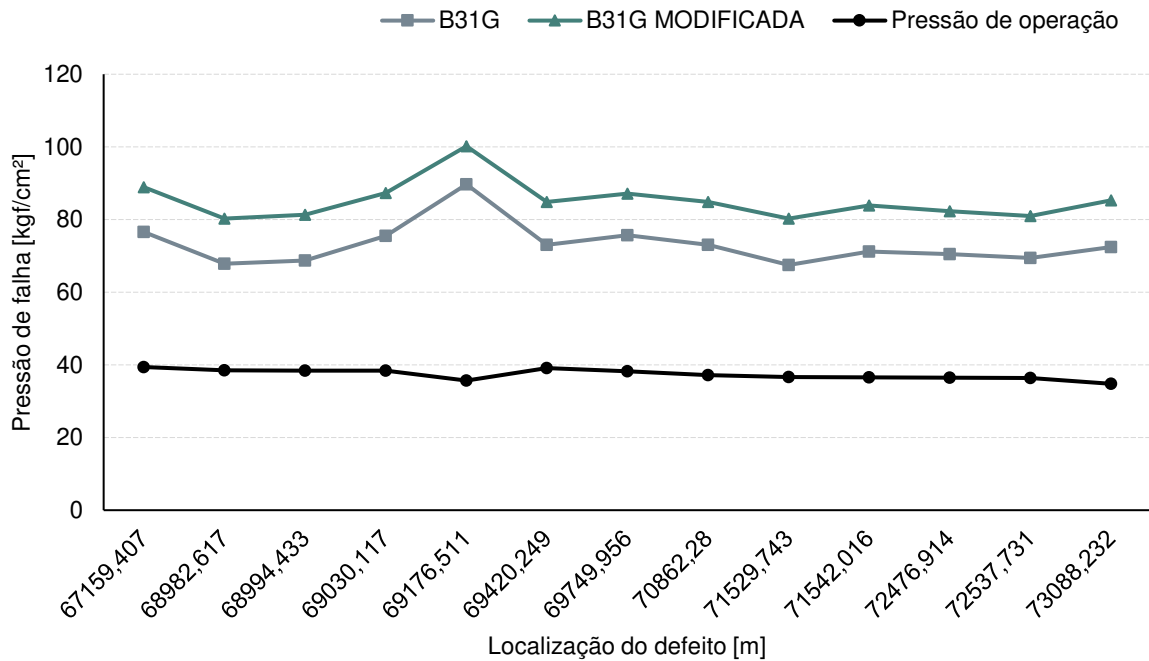
Fonte: Autor (2021).

Para os defeitos de erosão estudados, a Figura 16, apresenta características de defeitos longos para todos os pontos ($z > 20$ para B31G e $z > 50$ para B31G modificado), devido ao comprimento médio desses defeitos ser de aproximadamente 12,13 m.

Assim, é possível identificar a divergência de estimativa da pressão de falha entre os equacionamentos. Primeiro, devido à dimensão do defeito ser maior, o que desfavorece a aproximação de perfil parabólico para B31G, tornando-o menos preciso. Segundo, devido ao modelo semiempírico B31G modificado ter duas principais modificações, uma na tensão de fluxo e outra no fator de dilatação, ambas visando a obtenção de valores mais precisos de pressão de falha e menos conservadores.

Conforme a norma o critério de aceitação de falha se dá quando a relação profundidade sobre espessura (d/t) é maior que 80%, ou quando a pressão de operação é equivalente à pressão de ruptura (Figuras 14 e 16). Essa condição não é atingida, logo estão reprovados, sem risco de falha.

Figura 16 – Análise de pressão de falha modelo semiempírico ASME B31G para os defeitos de erosão presentes no mineroduto



Fonte: Autor (2021).

Esse mesmo ponto de vista é evidenciado pelo valor do ERF, conforme apresentado na Tabela 9 para defeitos de corrosão e na Tabela 10 para defeitos de erosão. O fator estimado de reparo (ERF) é a razão entre o *MAOP* e P_F . A pressão máxima de operação admissível deve ser sempre menor que a pressão de falha admissível onde se encontra a corrosão, caso contrário, poderá ocorrer a ruptura do duto.

Tabela 9 – Fator estimado de reparo para os defeitos de corrosão

	Defeito de Corrosão																
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
B31G	0,37	0,32	0,31	0,26	0,29	0,22	0,28	0,27	0,29	0,30	0,27	0,26	0,24	0,28	0,26	0,21	0,15
B31G MOD.	0,36	0,31	0,30	0,26	0,28	0,22	0,28	0,26	0,28	0,31	0,27	0,25	0,23	0,29	0,25	0,21	0,14

Fonte: Autor (2021).

Tabela 10 – Fator estimado de reparo para os defeitos de erosão

	Defeitos de Erosão												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
B31G	0,64	0,71	0,70	0,64	0,50	0,67	0,63	0,64	0,68	0,64	0,65	0,65	0,60
B31G MOD.	0,55	0,60	0,59	0,55	0,45	0,58	0,55	0,55	0,57	0,54	0,55	0,56	0,51

Fonte: Autor (2021).

Do ponto de vista da integridade, este método é confiável, dado não ter havido nenhuma falha de dutos devido à corrosão quando sua forma de avaliação foi empregada. Porém, devido

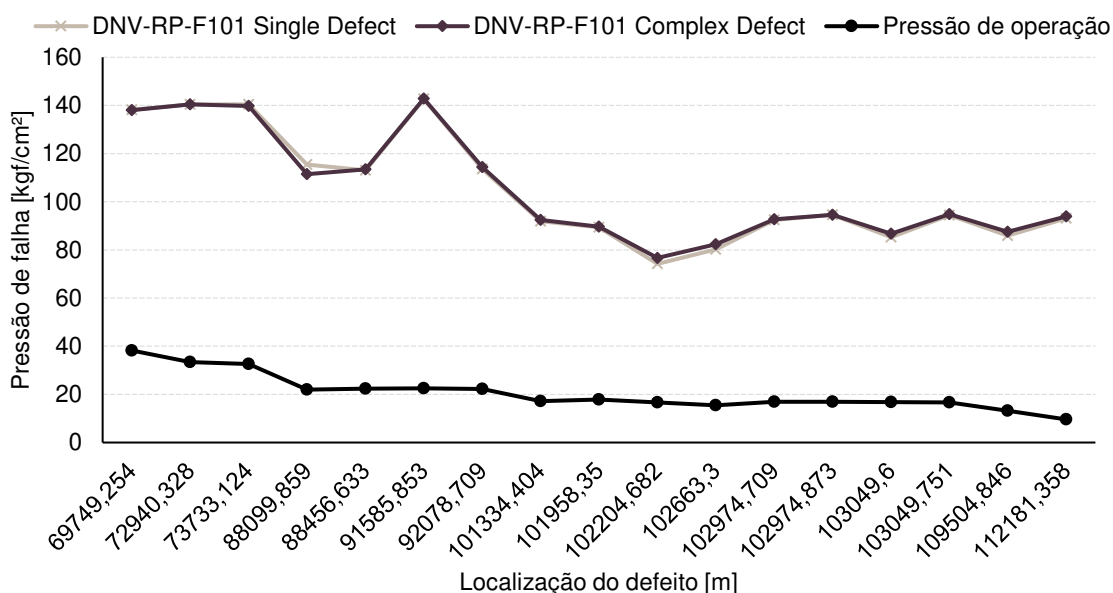
ao conservadorismo inerente aos equacionamentos há indícios de reparos realizados de forma desnecessária em tubulações, o que do ponto de vista de custo é um aspecto importante, devido à frequência.

5.2.2 DNV-RP-F101 (PART B) DEFEITO ISOLADO E COMPLEXO

A segunda alternativa para avaliação é a norma DNV-RP-F101, que calcula a pressão de falha baseada no fator de projeto original. O valor adotado para o fator de segurança foi de 0,72, obtido a partir da multiplicação do valor indicado pela norma (0,9) vezes o valor do fator de segurança utilizado no projeto do mineroduto (0,8).

A Figura 17, retrata o mesmo comportamento de sobreposição para defeitos isolados e complexos de corrosão, similar ao exposto na Figura 14. Para defeitos isolados é utilizado o valor de profundidade absoluta do defeito (*abs. depth*), enquanto, para defeitos complexos o valor utilizado é o de profundidade média do defeito, obtido a partir do comprimento do defeito. Devido aos defeitos de corrosão estudados serem curtos a divergência entre valores torna-se imperceptível.

Figura 17 – Análise de pressão de falha modelo semiempírico DNV-RP-F101 para os defeitos de corrosão presentes no mineroduto



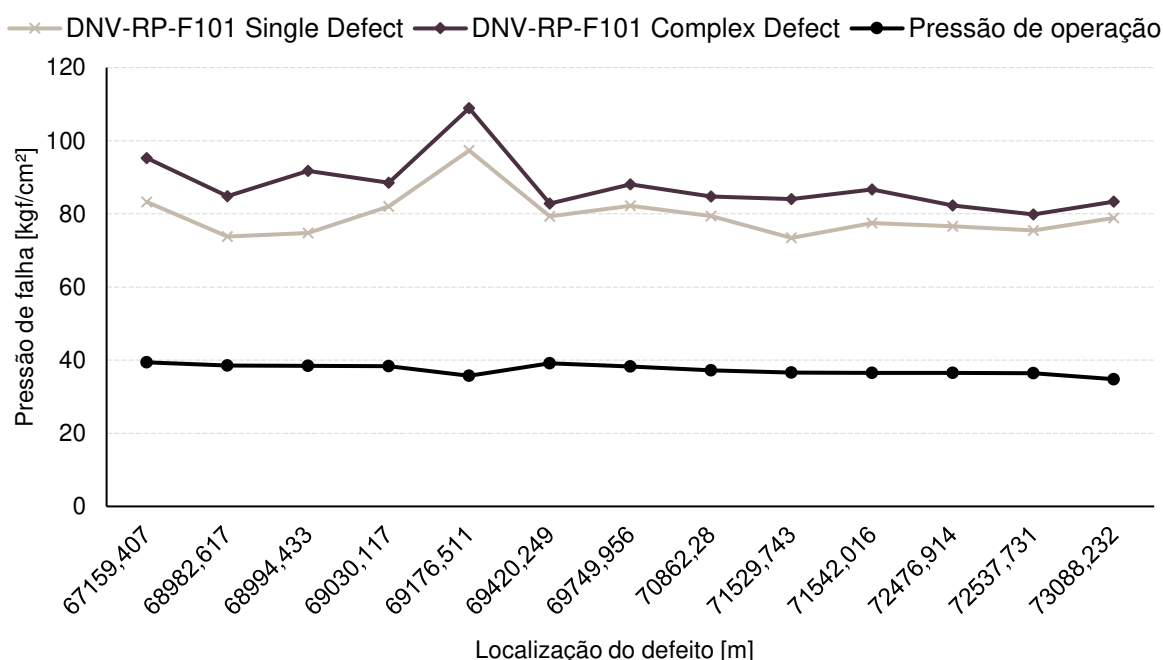
Fonte: Autor (2021).

Destaca-se que os valores de pressão de ruptura estimados para defeitos de corrosão, com base no modelo semiempírico DNV-RP-F101 são menos conservadores, quando comparados ao modelo semiempírico ASME B31G.

Para a avaliação dos defeitos de erosão, devido o comprimento total do defeito ser maior, comprimento médio de 12,132 m, neste foi possível estimar diferença entre os valores de profundidade utilizados, ocasionando o distanciamento entre as linhas, em magnitude o valor médio seria na ordem de 8,25 kgf/cm² de diferença, Figura 18.

Com respeito ao critério de aceitação de falha, para norma DNV, a única alteração se deveu à relação profundidade pela espessura (d/t) ser maior que 85%, ou, igualmente a norma ASME, quando a pressão de operação é equivalente à pressão de ruptura, ambos estados não são atingidos, logo estão reprovados, sem risco de falha.

Figura 18 – Análise de pressão de falha modelo semiempírico DNV-RP-F101 para os defeitos de erosão presentes no mineroduto.

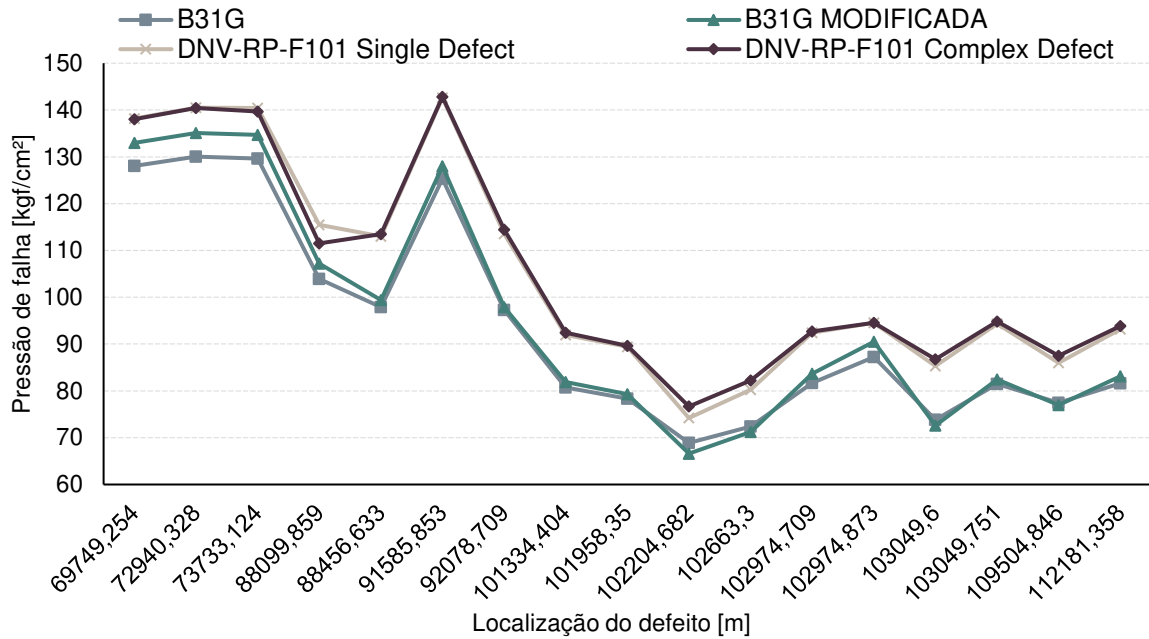


Fonte: Autor (2021).

5.2.3 COMPARATIVO ENTRE OS MODELOS SEMIEMPÍRICOS ASME E DNV

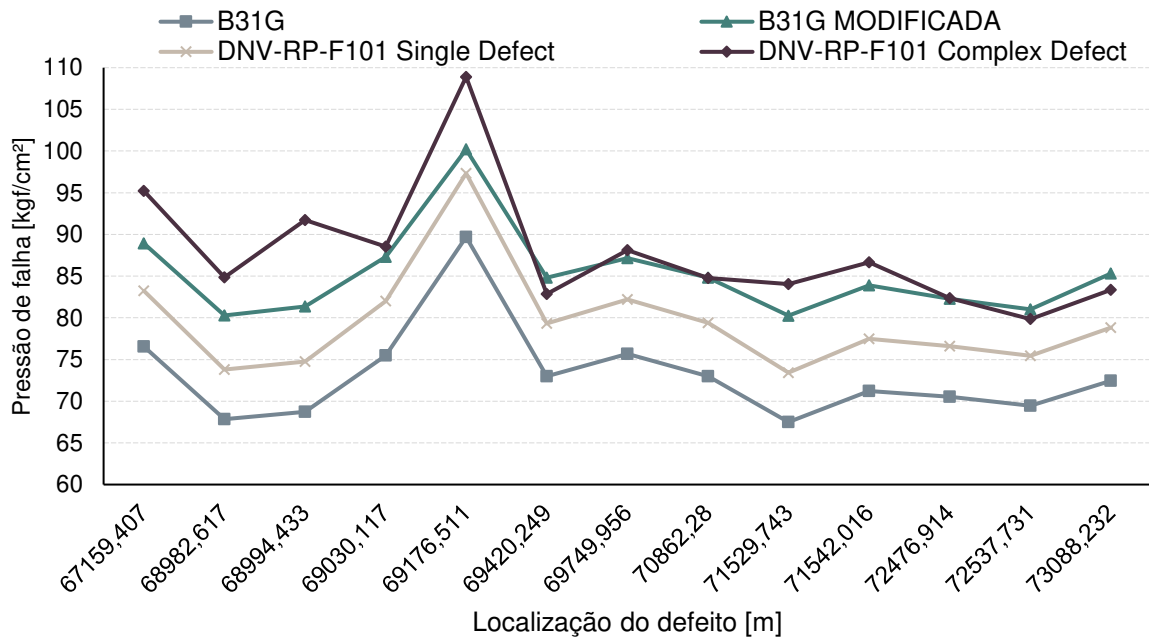
As Figuras 19 e 20 resumem o exposto nas duas análises anteriores, em um único gráfico, onde é possível observar o comportamento para a pressão de falha. Em ordem seria ASME B31G < ASME B31G modificado < DNV-RP-F101 defeito isolado < DNV-RP-F101 defeito complexo.

Figura 19 – Comparativo entre as pressões de falha para os defeitos de corrosão.



Fonte: Autor (2021).

Figura 20 – Comparativo entre as pressões de falha para os defeitos de erosão.



Fonte: Autor (2021).

Isso devido ao surgimento de cada uma dessas estimativas, como traz o referencial teórico desse estudo. O modelo semiempírico B31G foi o primeiro a ser proposto para estimativa de pressão de falha em tubulações, sendo conservador e simplificado. Em seguida, todos os demais surgiram como forma de adequar parâmetros do equacionamento, ou até mesmo a mudança de parâmetros para a avaliação, como a substituição SMYS para SMTS para

o modelo proposto pela DNV. Todas essas alterações visam quebrar o conservadorismo das estimativas.

De forma resumida, o princípio básico da mecânica da fratura é que, a resistência do material ao fraturamento na presença de um defeito está relacionada ao tamanho do defeito e a uma propriedade inerente do metal chamada tenacidade. Quanto maior a resistência do material, maior será a pressão que pode ser tolerada antes que a falha ocorra.

Além disso, quanto maior o defeito, menor a pressão em que ocorrerá um vazamento ou ruptura. Parece óbvio, mas formam a base da mecânica da fratura como determinação da resistência real de tubos contendo defeitos, princípio de ambos os modelos. A mesma classificação das estimativas de pressão de falha foram observadas em outros trabalhos utilizados como referência como o de Timachev e Bushinskaya (2010), Amaral (2011), Toro (2014) e Fernandes (2019), que apontam valores de pressão de falha menores para o procedimento ASME.

5.3 Crescimento dos defeitos

Para a obtenção das taxas de crescimento dos defeitos, a correlação entre os pontos é um fator muito importante. Dessa forma, contrapôs os dois relatórios de dados referente às inspeções realizadas no mineroduto em 2019 e 2017, buscando correlacionar um defeito mapeado na mesma localização nos anos descritos, para que os aspectos de profundidade e espessura remanescente de parede na posição 06h pudessem ser avaliados.

Em suma, esse seria o comportamento esperado, porém não é o que acontece, principalmente por conta dos reparos e trocas realizadas entre uma inspeção e outra. De forma simples ao realizar uma intervenção em um trecho, se está alterando sua configuração reportada no último relatório emitido, pois o tubo novo pode ter dimensões diferentes, impactando no espaçamento no processo de soldagem, assim diretamente proporcional a nova localização do defeito reportada na campanha seguinte. A calibração e incerteza de medição do equipamento utilizado também são fatores a serem considerados.

Tabela 11 – Correlação entre defeitos para estimativa do crescimento da corrosão

Correlação	Defeito do estudo encontrado	Taxa de corrosão da região [mm/ano]
Direta	0	0,2315
10 mm de distância	0	0,1398
100 mm de distância	1	0,1732

Fonte: Autor (2021).

Para os defeitos de corrosão, o último cenário observou correlação para um único defeito que estava espaçado 15 mm do valor reportado entre os anos, conforme a Tabela 11.

Para os defeitos de erosão, todos os cenários mostraram correlação, sendo que para a correlação direta o valor de taxa foi o maior obtido. Considerando 10 mm de distância os 3 defeitos encontrados apresentaram em média 2 mm de diferença do valor reportado na última inspeção. De acordo com a Tabela 12, para o último cenário essa diferença foi de 11 mm.

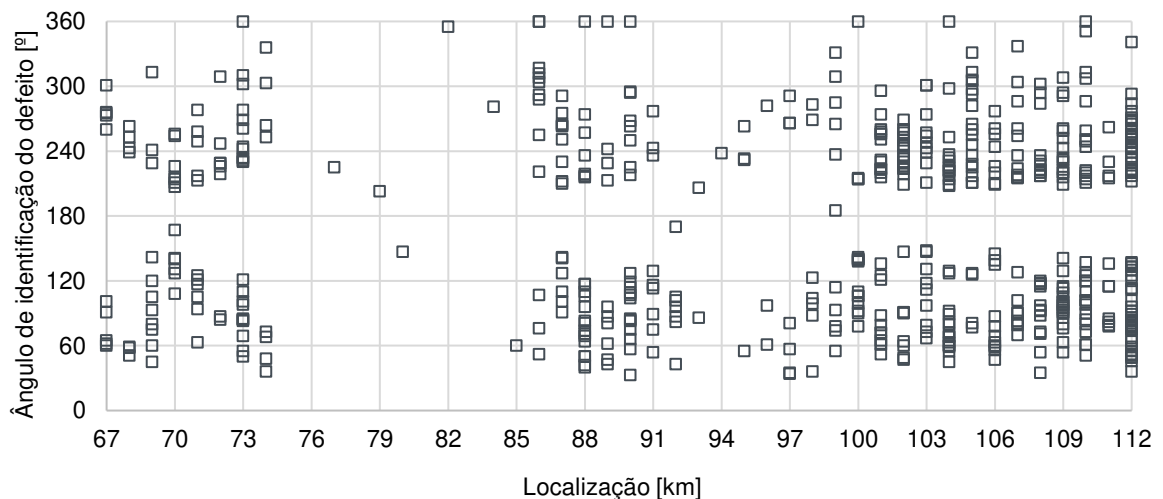
Tabela 12 – Correlação entre defeitos para estimativa do crescimento da erosão

Correlação	Defeito do estudo encontrado	Taxa de erosão da região [mm/ano]
Direta	1	0,6940
10 mm de distância	3	0,6287
100 mm de distância	10	0,6088

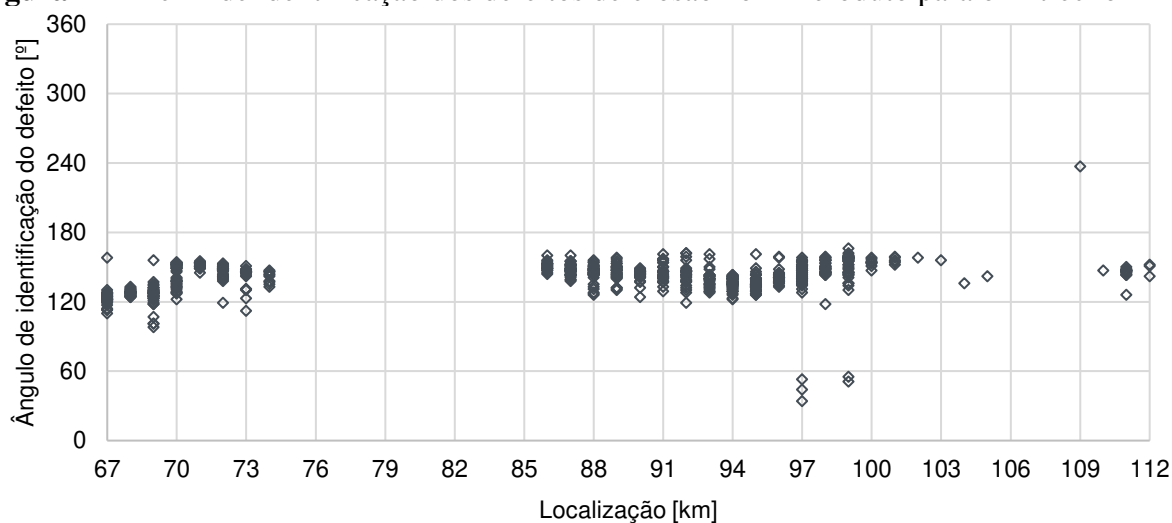
Fonte: Autor (2021).

Para o mineroduto em estudo ambos os defeitos ocorrem de forma combinada como exposto nas Figuras 21 e 22. A região aponta a ocorrência de defeitos de corrosão de forma aleatória em várias posições horárias do segmento de tubulação estudado, enquanto para a erosão foram concentrados pontos preferencialmente na posição 6h devido ao comportamento de leito móvel da polpa em bombeamento. Esse aspecto corrobora para medida de ambos em conjunto, como única taxa de perda de metal.

Figura 21 – Perfil de identificação dos defeitos de corrosão no mineroduto para o 1º trecho



Fonte: Autor (2021).

Figura 22 – Perfil de identificação dos defeitos de erosão no mineroduto para o 1º trecho

Fonte: Autor (2021).

5.4 Tempo máximo de vida útil de dutos com a presença de defeitos

5.4.1 DEFEITOS DE CORROSÃO

Para a estimativa do tempo máximo de operação em um duto com a presença de defeitos, a pressão de ruptura foi avaliada a partir do crescimento do defeito. Os valores utilizados estão resumidos na Tabela 13. A taxa de crescimento de corrosão utilizada para a estimativa da data do reparo será o valor 0,0144 mm/mês e para erosão o valor de 0,0507 mm/mês, visto que estes apresentam as mesmas configurações apenas de forma deslocada no tubo e estarem no mesmo número de solda a montante.

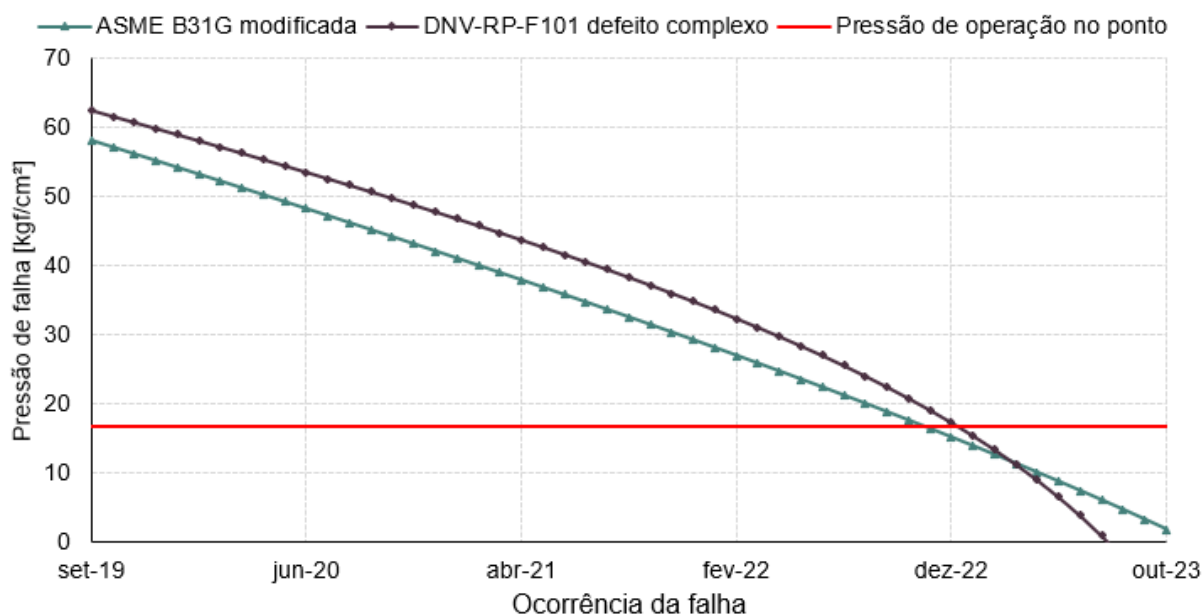
Tabela 13 – Resumo dos valores de taxa de crescimento dos defeitos

Taxa de crescimento de corrosão	Taxa de crescimento de erosão	Total	Unidade
0,1732	0,6088	0,782	mm/ano
0,0144	0,0507	0,0651	mm/mês

Fonte: Autor (2021).

A Figura 23 apresenta como exemplo o perfil da pressão de falha para o defeito de corrosão localizado na *log. dist* 103049,6 m. Para esse defeito específico, o critério de falha em ambos foi o limite máximo de profundidade do defeito, 80% para B31G modificada e 85% para a DNV-RP-F101, onde as curvas indicam um comportamento de falha alcançado em julho de 2022 para B31G, e outubro de 2022 para a DNV. Esse comportamento foi replicado em 14 dos 17 defeitos de corrosão avaliados.

Figura 23 – Perfil falha associado ao crescimento do defeito de corrosão log dist. 103049,6 m.



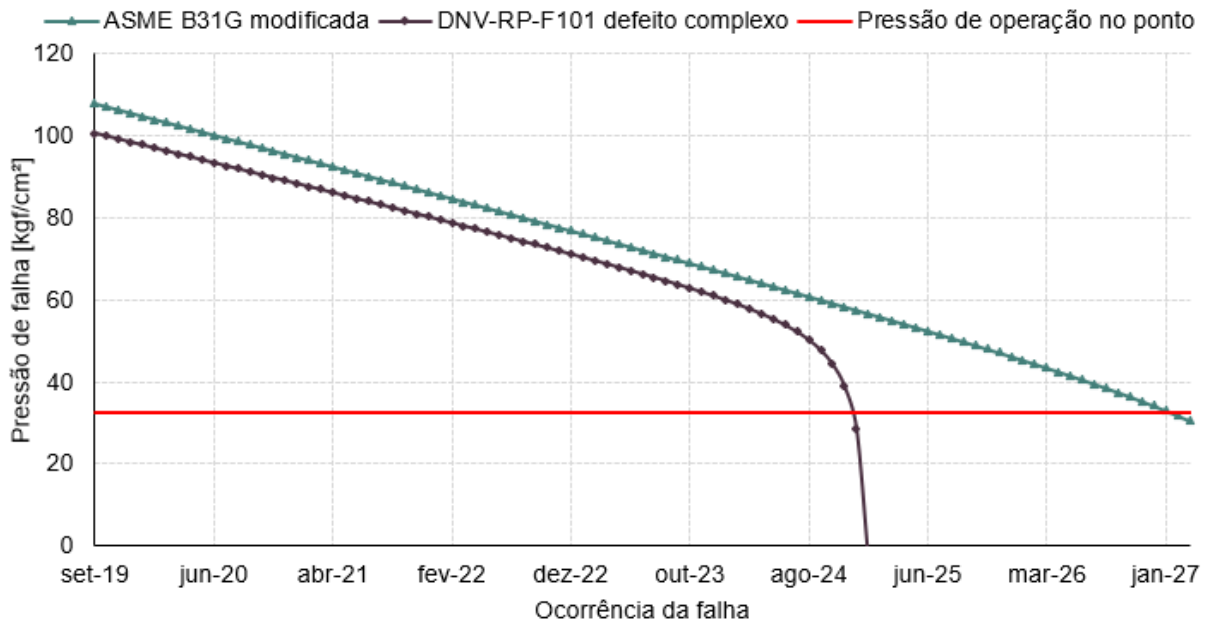
Fonte: Autor (2021).

Com respeito aos 3 defeitos de corrosão restantes, estes apresentaram o comportamento de falha por alcance do limite máximo de profundidade do defeito de 80% para B31G modificada e falha por pressão para a DNV.

Visualmente é possível perceber que a ocorrência da falha está espaçada 26 meses (janeiro/2027 a novembro/2024), o que certamente implicaria em um reparo não oportuno para o defeito no *log dist.* 73733,124 m (Figura 24).

O porquê desse comportamento não foi bem elucidado conforme exclusões da DNV, visto que não foi encaixado em nenhum dos critérios listados, muito pelo contrário por apresentar parâmetros diferentes à faixa de 138 ensaios realizados para a garantia da norma. Outros dois pontos seriam características desses três defeitos em particular divergirem dos defeitos de corrosão estudados. Conforme a Tabela 6, estes apresentam porcentagem de profundidade do defeito abaixo de 20% e comprimento médio de 42,3 mm. Não foi encontrado em outras literaturas aplicações similares em dimensão desses defeitos, propriedade do aço X70 e condições do duto.

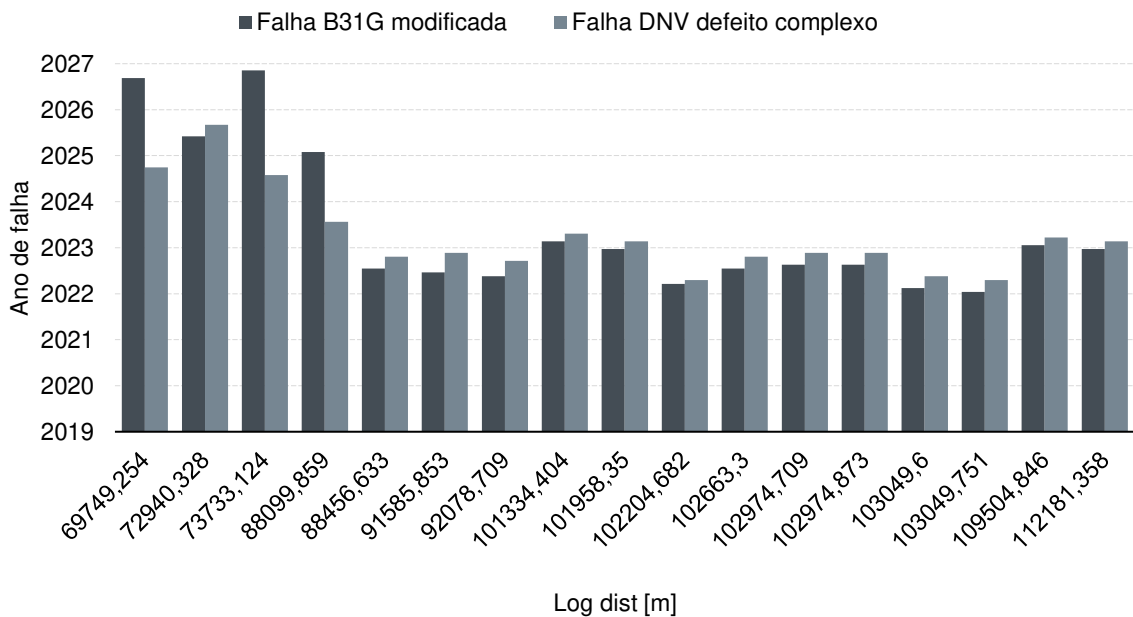
Figura 24 – Perfil falha associado ao crescimento do defeito de corrosão log dist. 73733,124 m.



Fonte: Autor (2021).

Contudo, a estimativa de tempo máximo de operação para os dutos com a presença de defeitos de corrosão é resumida na Figura 25. Com exclusão dos 3 defeitos anteriormente mencionados a diferença entre os modelos resume-se a três meses de diferença para o risco de falha, segundo os limites máximos para a profundidade do defeito recomendado para cada uma das normas.

Figura 25 – Tempo de vida útil máximo dos defeitos de corrosão.

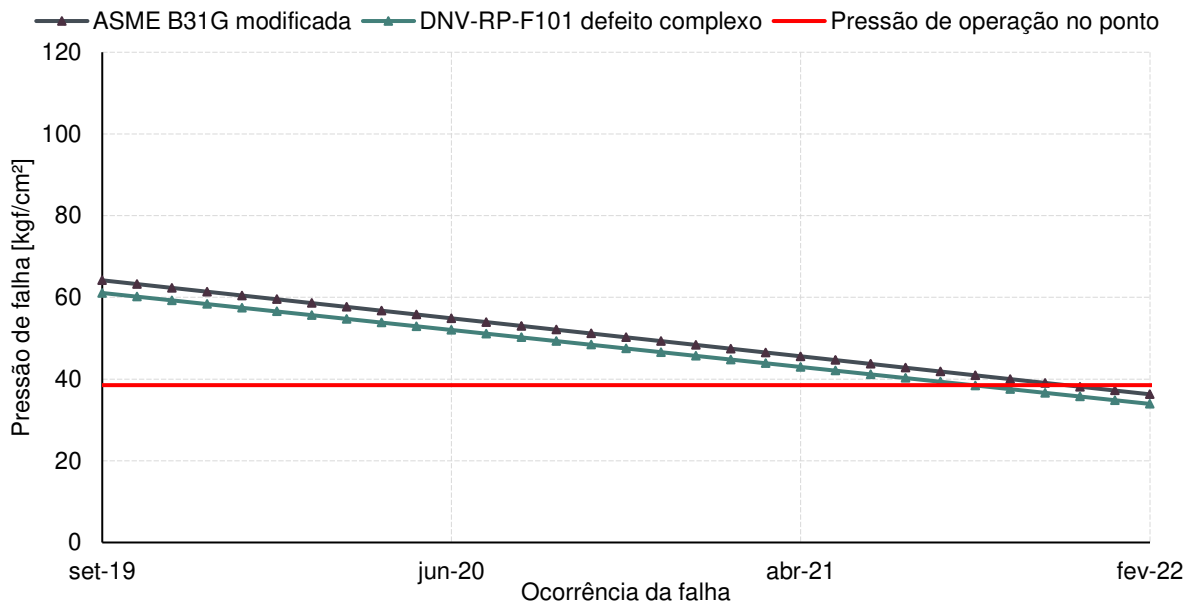


Fonte: Autor (2021).

5.4.2 DEFEITOS DE EROSÃO

Todos os defeitos de erosão apresentaram falha por pressão para ambas as normas, e dada as dimensões dessas anomalias seus tempos de troca são atingindo mais rapidamente que os defeitos de corrosão. A Figura 26 expõe o perfil de falha associado ao crescimento do defeito *log dist.* 68982,617 m.

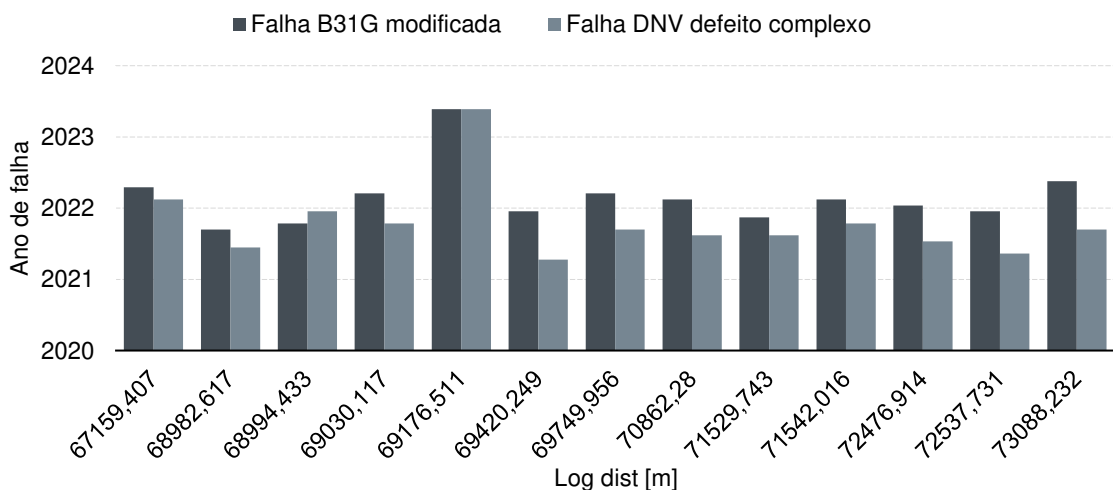
Figura 26 – Perfil falha associado ao crescimento do defeito de erosão *log dist.* 68982,617 m.



Fonte: Autor (2021).

Analogamente, para estimativa de tempo máximo para os defeitos de corrosão, a Figura 27 aponta a diferença de quatro meses entre os modelos para o risco de falha.

Figura 27 – Tempo de vida útil máximo dos defeitos de erosão.



Fonte: Autor (2021).

Por fim, é importante destacar que aqui seria o limite desse estudo proposto, principalmente devido ao setor responsável por esse duto acertar com as demais áreas envolvidas quando seria o melhor momento para realizar tais manutenções, considerando os aspectos técnicos aqui expostos, a possibilidade de parada do escoamento desse sistema e as condições climáticas adequadas para a realização da atividade, bem como, o levantamento dos recursos necessários, sejam eles financeiros ou que envolvam pessoas e máquinas.

Tabela 14 – Resumo da distribuição de realização dos reparos ao longo dos anos

Ano	Quantidade de reparos
2021	1
2022	18
2023	7
2024	0
2025	2
2026	1
2027	1

Fonte: Autor (2021).

Ademais, ressalta-se um último ponto, a intervenção de todos estes 30 defeitos mapeados no estudo passou por campanha de troca de tubos no terceiro trimestre do ano de 2020, totalizando 54 km de tubos substituídos em um momento considerado adequado pela empresa. Logo, estes não apresentam mais o risco de ruptura, sem a possibilidade de danos ao ambiente e nem às comunidades do entorno desse local.

6 CONCLUSÃO

Os conceitos associados ao gerenciamento de integridade de dutos, ao que tange parte dos aspectos técnicos ligados a manutenção nesse sistema, foram apresentados primeiramente de forma qualitativa com exposição das definições de ameaças, danos e risco a integridade e confiabilidade dessa operação. Adicionalmente, foram considerados a importância de não somente identificar e avaliar ameaças, pois estas são apenas parte do processo, o que permite uma longa vida útil para o duto e minimização de possibilidade de falhas e como o sistema de gestão funciona na prática.

De forma quantitativa, o trabalho retratou como seria em escala reduzida a dinâmica de avaliações realizadas por um time de integridade que monitora um empreendimento de 244 km como o exposto no estudo e uma totalidade de mais de 5000 anomalias reportadas pelas ferramentas de inspeção assim como monitoramentos realizados em campo. Esse diagnóstico de fato é de suma importância para a garantia do funcionamento da empresa ao longo prazo, mas é somente um dentre outros vários aspectos avaliados com outras instâncias antes de um planejamento de campanha de troca e reparos. Destaca-se como principais fatores de aspectos ambientais, recursos, oportunidade de ação e capital financeiro necessário.

A recomendação prática proposta pela normativa ASME, apresenta assim como em outras literaturas examinadas valores, mais conservadores, o que se deve ao momento quando foi publicada, que envolveu simplificações associadas aos seus equacionamentos. Apesar disso, do ponto de vista da integridade, este método é confiável dado o fato de nenhuma falha de dutos devido à corrosão ter ocorrido usando sua forma de avaliação. Porém, o custo de seguir uma estimativa de reparo regida por esse aponta um valor alto de investimento, devido aos frequentes reparos realizados.

Quanto aos valores obtidos pela DNV-RP-F101, os mesmos apresentaram menor conservadorismo, e valores maiores para a pressão de ruptura, o que era esperado dado as modificações nos seus equacionamentos. Os modelos obedecem à ordem ASME B31G < ASME B31G modificado < DNV-RP-F101 defeito isolado < DNV-RP-F101 defeito complexo para os valores médios de pressão de ruptura. Os resultados obtidos para a taxa de crescimento dos defeitos de corrosão foram de 0,0144 mm/mês e para erosão 0,0507 mm/mês.

Contudo, para a estimativa da data do reparo, foram utilizados os modelos B31G modificado e DNV-RP-F101 defeito complexo. Para os defeitos de corrosão observou-se a diferença entre os modelos de três meses, para o risco de falha. Para os defeitos de erosão a diferença apontada entre os modelos foi de quatro meses de diferença para o risco.

Por fim, o trabalho estima que seriam realizados: um reparo ainda em 2021, 18 em 2022, 7 em 2023, 2 em 2025, 1 em 2026 e 1 em 2027. Todavia, é importante destacar que a manutenção de todos 30 defeitos mapeados no estudo passara por campanha de troca de tubos no terceiro trimestre do ano de 2020, totalizando 54 km de tubos substituídos por um novo, o que evita o risco de ruptura.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Em função dos estudos aqui apresentados, existem algumas possibilidades que poderiam ter sido exploradas para contribuir para futuros melhoramentos e extensões desse trabalho aplicado para o contexto de um mineroduto de bauxita. Destaca-se:

1. Estudo comparativo dos modelos semiempíricos aqui expostos avaliados por simulação por elementos finitos e teste de ruptura com dutos reais após suas trocas, como forma de elucidar o mecanismo de falha por ruptura em tubos com a presença de defeitos de corrosão e erosão combinadas em um mineroduto;
2. Estudar o comportamento da norma DNV-RP-F101 para defeitos de pequenas dimensões, menores que 50 mm de comprimento e profundidade menor que 15%;
3. Avaliar modelos empíricos, semiempíricos e científicos para esclarecer o comportamento de desgaste maior por erosão, principalmente quando este assume regime de leito móvel no interior da tubulação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT. NBR 15280-1: **Dutos terrestres parte 1**: Projeto. Rio de Janeiro: 75 p. 2009.
- AMARAL, R. S. **Análise de segurança de dutos com defeitos de corrosão**. 2011.
- ASIA, I. **Magnetic flux leakage detector for subsea pipelines**. 2021. Disponível em: <http://iovasia.com/inline-magnetic-flux-leakage-detector/>. Acesso em: 06 jun. 2021.
- ASME. **Manual for determining the remaining strength of corroded pipelines**. 1991.
- ASME. **Gas Transmission and Distribution Piping Systems**: ASME Code for Pressure Piping, B31. 8. American Society of Mechanical Engineers, 2004.
- ASME. **Manual for Determining the Remaining Strength of Corroded Pipelines: A Supplement to ASME B31 Code for Pressure Piping: an American National Standard**. American Society of Mechanical Engineers, 2012. 0791834484.
- ASME. **Pipeline Transportation Systems for Liquids and Slurries**: ASME Code for Pressure Piping, B31.4. American Society of Mechanical Engineers, 2019.
- BEER, F. P.; JOHNSTON, E. R. **Resistência dos materiais**. McGraw-Hill São Paulo, 1989. 0074500384.
- BENJAMIN, A. **Avaliação Estrutural de Dutos Corroídos**: Notas de Aulas – Volume I. Dutos Submetidos Apenas a Carregamento de Pressão. Rio de Janeiro. 2014.
- BRANDT, W. **Mineroduto Ferrous Minas Gerais, Rio de Janeiro e Espírito Santo**. Meio Ambiente. EIA–Estudo de Impactos Ambientais. *Ferrous Resources* do Brasil SA Nova Lima: Brandt Meio Ambiente, 2010.
- BROWN, N. P.; HEYWOOD, N. I. **Slurry Handling**: Design of solid-liquid systems. Springer Science & Business Media, 1991. 1851666451.
- CABRAL, H. L. D. **Desenvolvimento de ferramentas computacionais para modelagem e análise automática de defeitos de corrosão em dutos**. 2007. Universidade Federal de Pernambuco.
- CHAPMAN, J. P.; LIMA, R.; PINTO, D.; VIDAL, A. **Slurry pipeline technology—an overview**. 2009.
- CHAVES, A.; LEAL FILHO, L. **Tratamento de minérios**: Rio de Janeiro, CETEM/MCT 2002.
- CONSTRAN. **Contratos**: Constran. 2020. Disponível em: <http://www.constran.com.br/contratodetalhes.php?idcontrato=49#prettyPhoto>.
- CORDEIRO, A. L. R. **Aplicação dos Métodos FORM e SORM para Avaliação de Dutos Corroídos**. Diss. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, 2008.

CROUCH, A.; SMITH, M. **In-Line Measurement Resolution and the Calculation of Remaining Pipe Strength**. OnePetro. 2001.

CURVELO, E. V. J. R. d. J. **Estudo Para Projeto De Módulo Discriminador De Um Pig Mfl**. 56, 2016.

DE ARAÚJO, A. A. J. P. U. C. D. R. D. J.-R. **Gerenciamento de falhas por corrosão em dutos**. 2012.

DE OLIVEIRA, J. J. M. **ANÁLISE E REPARO EM DUTOS CORROÍDOS** Um estudo de caso para reparo por dupla calha. 2016.

DRAKE, J. A.; HERETH, M. L.; MARTIN, D. B.; BOSS, T. D. et al. Integrity Management Continuous Improvement. **American Society of Mechanical Engineers**. 437-443. 2012.

(EPL), E. d. P. e. L. S. A. **Dutoviário**. 2017. Disponível em: <<https://www.ontl.epl.gov.br/dutoviario>>. Acesso em: 28 jun. 2020.

FEDERAL, M. P. **Processo nº 32308-15.2010.4.01.3900**. PARÁ, P. d. R. n. E. d. 2018.

FERRAZ, U. S. **Resistência Estrutural de Dutos Corroídos sobre Pressão Interna e Externa**. Diss. Tese de doutorado, Departamento de Engenharia Oceânica, COPPE/UFRJ Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2007.

FERNANDES, T. M. **Uma avaliação numérica de métodos semiempíricos de cálculo de pressão de falha de dutos corroídos**. BS thesis. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2019.

FREIRE, J. L. d. **Engenharia de Dutos**. Rio de Janeiro: ABCM – Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânica 2009.

GANDHI, R.; WESTON, M.; TALAVERA, M.; BRITTES, G. P. et al. Design and operation of the world's first long distance bauxite slurry pipeline. In: **Essential Readings in Light Metals**: Springer, 2016. p. 75-80.

GANDHI, R. L.; NORWOOD, J.; CHE, Y. Cross-country bauxite slurry transportation. In: **Essential Readings in Light Metals**: Springer, 2016. p. 70-74.

GAVA, M. d. C. **Análise Energética de Projetos de Sistemas de Bombeamento de Polpas de Minério de Ferro Mediante Simulação Computacional**. p. Dissertações dos alunos do mestrado em Engenharia da Energia, 2016. Disponível em: <<https://www.ufsj.edu.br/portal2repositorio/File/mestradoenergia/Dissertacoes/2014/Dissertacao%20-%20Marcilene.pdf>>. Acesso em: 01 jul. 2020.

GENTIL, V. J. R. d. J. E. L. **Corrosão**. 4ªed. 2011.

HIBBELER, R. C.; KIANG, T. **Structural analysis**. Pearson Prentice Hall Upper Saddle River, 2015. 0133942848.

INSTITUTE, A. P. **Managing Systems Integrity for Hazardous Liquid Pipelines**: American Petroleum Institute Washington, DC 2013.

KIEFNER, J.; DUFFY, A. **Summary of research to determine the strength of corroded areas in line pipe**. Battelle Columbus Laboratories, 1971.

KIEFNER, J. F.; VIETH, P. H. **A modified criterion for evaluating the remaining strength of corroded pipe**. Battelle Columbus Div., OH (USA). 1989.

LOUREIRO, S. **Aplicação de Método de Elementos Finitos na Previsão de Reparos de Dutos com Material Compósito**. Diss. tese de doutorado COPPE/UFRJ–Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2005.

LUZ, A. B. d.; LINS, F. A. F. **Introdução ao tratamento de minérios**. In: CETEM/MCTIC, 2018.

LUZ, A. B. d.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. Tratamento de minérios. 2010.

MANNERS, G. **The geography of energy**. Routledge, 2019. ISBN-0429556152.

MARTINS, S. A. **Comparativo entre sistemas de bombeamento de polpa de minério de ferro com diferentes granulometrias**. 2014.

MAZZINI, C. E. J. P. d. g., **Departamento de Engenharia Mecânica**. Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória. Comparação de métodos de inspeção de integridade de dutos: método PIG e CIS/DCVG. 2009.

ONTL. **Infraestrutura dutoviária brasileira**. 2017. Disponível em: <https://ontl.epl.gov.br/paineis-analiticos/painel-do-anuario-estatistico/arquivos-para-download/mapas/>. Acesso em: 28 Jun. 2020.

OTHON, O.; BABOSA, E.; EDVAN, F.; BRITTES, G. et al. **Bauxite slurry pipeline: start-up operation**. 2009.

SILVA, C. C. **Métodos de inspeção de tubulações de transporte de minério: o caso da integridade de dutos**. 2017.

SQUARCIO, R. M. F. **Análise da confiabilidade de oleodutos corroídos utilizando o Método de Monte Carlo: um estudo de caso**. 2009.

TIMASHEV, S.; BUSHINSKAYA, A. Practical methodology of predictive maintenance for pipelines. Pp. 329-338. 2010.

TIRATSOO, J. **Managing Pipeline Threats**. 2019.

TOFFOLO, R. V. B. **Estudo comparativo dos aços microligados API-5L-X60 e API-5L-X70, usados para confecção de tubos, quanto à tenacidade à fratura**. 2008.

TORO, R. J. N. **Pressão de ruptura de dutos contendo defeitos de corrosão**. Universidade de São Paulo. 2014.

VANAELI, H.; ESLAMI, A.; EGBEWANDE, A. J. I. J. o. P. V.; PIPING. **A review on pipeline corrosion, in-line inspection (ILI), and corrosion growth rate models.** 149, p. 43-54, 2017. VERITAS, D. N. Recommended practice—RP-F101 corroded pipelines. 2010.

VIDAL, A. M. **Estudo de bombeamento de partículas grossas.** 2011.

WASP, E. J.; KENNY, J. P.; GANDHI, R. L. **Solid--liquid flow:** slurry pipeline transportation. [Pumps, valves, mechanical equipment, economics]. Ser. Bulk Mater. Handl.; (United States), 1, n. 4, 1977.

WOLYNEC, S. **Técnicas Eletroquímicas em Corrosão Vol. 49.** Edusp, 2003. 8531407494.

APÊNDICE A

Tabela 15 – Datas de falha para cada defeito conforme norma B31G modificada, critério de falha da atingido e o tipo manutenção sugerida

Log dist. [m]	Falha por B31G mod.	Critério da Falha	Intervenção
67159,407	jul-22	Falha por pressão	Troca
68982,617	dez-21	Falha por pressão	Troca
68994,433	jan-22	Falha por pressão	Troca
69030,117	jun-22	Falha por pressão	Troca
69176,511	ago-23	Falha por pressão	Troca
69420,249	mar-22	Falha por pressão	Troca
69749,254	dez-26	80% Profundidade / Pressão	Reparo / Troca
69749,956	jun-22	Falha por pressão	Troca
70862,28	mai-22	Falha por pressão	Troca
71529,743	fev-22	Falha por pressão	Troca
71542,016	mai-22	Falha por pressão	Troca
72476,914	abr-22	Falha por pressão	Troca
72537,731	mar-22	Falha por pressão	Troca
72940,328	out-25	80% Profundidade / 85% Profundidade	Reparo / Troca
73088,232	ago-22	Falha por pressão	Troca
73733,124	mar-27	80% Profundidade / Pressão	Reparo / Troca
88099,859	jun-25	80% Profundidade / Pressão	Reparo / Troca
88456,633	dez-22	80% Profundidade / 85% Profundidade	Reparo / Troca
91585,853	nov-22	80% Profundidade / 85% Profundidade	Reparo / Troca
92078,709	out-22	80% Profundidade / 85% Profundidade	Reparo / Troca
101334,404	jul-23	80% Profundidade / 85% Profundidade	Reparo / Troca
101958,35	mai-23	80% Profundidade / 85% Profundidade	Reparo / Troca
102204,682	ago-22	80% Profundidade / Pressão	Reparo / Troca
102663,3	dez-22	80% Profundidade / 85% Profundidade	Reparo / Troca
102974,709	jan-23	80% Profundidade / 85% Profundidade	Reparo / Troca
102974,873	jan-23	80% Profundidade / 85% Profundidade	Reparo / Troca
103049,6	jul-22	80% Profundidade / 85% Profundidade	Reparo / Troca
103049,751	jun-22	80% Profundidade / 85% Profundidade	Reparo / Troca
109504,846	jun-23	80% Profundidade / 85% Profundidade	Reparo / Troca
112181,358	mai-23	80% Profundidade / 85% Profundidade	Reparo / Troca

Fonte: Autor (2021).