



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

JOÃO LUCAS AUSTREGÉSILO NEPOMUCENO

**INVESTIGAÇÃO COMPUTACIONAL DO FATOR DE NEPO PARA
PREVISÃO DE PRESSÃO DE FALHA DE DUTOS CURVOS COM DEFEITOS
INTERNOS DE CORROSÃO**

Recife

2023

JOÃO LUCAS AUSTREGÉSILO NEPOMUCENO

**INVESTIGAÇÃO COMPUTACIONAL DO FATOR DE NEPO PARA
PREVISÃO DE PRESSÃO DE FALHA DE DUTOS CURVOS COM DEFEITOS
INTERNOS DE CORROSÃO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de concentração: Simulação e Gerenciamento de Reservatórios de Petróleo.

Orientador: Prof. Dr. Renato de Siqueira Motta.

Coorientadora: Prof.^a Dr.^a Silvana Maria Bastos Afonso da Silva

Recife

2023

Catálogo na fonte
Bibliotecário Gabriel Luz, CRB-4 / 2222

N441i Nepomuceno, João Lucas Austregésilo.
Investigação computacional do fator de Nepo para previsão de pressão de falha de dutos curvos com defeitos internos de corrosão / João Lucas Austregésilo Nepomuceno, 2023.
72 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Renato de Siqueira Motta.
Coorientadora: Profa. Dra. Silvana Maria Bastos Afonso da Silva.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Recife, 2023.
Inclui referências.

1. Engenharia civil. 2. Dutos curvos. 3. Defeito de corrosão. 4. Pressão de falha. 5. Método dos elementos finitos. 6. Fator de Lorenz. 7. Fator de Nepo. I. Motta, Renato de Siqueira (Orientador). II. Silva, Silvana Maria Bastos Afonso da (Coorientadora). III. Título.

624 CDD (22. ed.)

UFPE

BCTG / 2023 - 264

JOÃO LUCAS AUSTREGÉSILO NEPOMUCENO

**INVESTIGAÇÃO COMPUTACIONAL DO FATOR DE NEPO PARA PREVISÃO
DE PRESSÃO DE FALHA DE DUTOS CURVOS COM
DEFEITOS INTERNOS DE CORROSÃO**

Dissertação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, Área de Simulação e Gerenciamento de Reservatórios de Petróleo.

Aprovada em 23/08/2023

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Renato de Siqueira Motta – UFPE

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Silvana Maria Bastos Afonso da Silva – UFPE

BANCA EXAMINADORA

participação por videoconferência
Prof. Dr. Tiago Ancelmo de Carvalho Pires de Oliveira (examinador interno)
Universidade Federal de Pernambuco

participação por videoconferência
Dr. Júlio Tenório Pimentel (examinador externo)
Universidade Federal de Pernambuco

participação por videoconferência
Prof. Dr. José Maria Andrade Barbosa (examinador externo)
Universidade Federal de Pernambuco



Emitido em 29/08/2023

APROVACAO DA BANCA Nº 196/2023 - PPGEC (11.65.18)

(Nº do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO)

(Assinado digitalmente em 01/09/2023 09:53)

JOSE MARIA ANDRADE BARBOSA

PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR

DEMEC (11.65.55)

Matrícula: ###646#8

(Assinado digitalmente em 30/08/2023 10:09)

RENATO DE SIQUEIRA MOTTA

PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR

DEPECA (11.65.60)

Matrícula: ###504#4

(Assinado digitalmente em 29/08/2023 16:51)

SILVANA MARIA BASTOS AFONSO DA SILVA

PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR

DEPECA (11.65.60)

Matrícula: ###236#3

(Assinado digitalmente em 29/08/2023 15:54)

TIAGO ANCELMO DE CARVALHO PIRES DE
OLIVEIRA

PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR

DEPECA (11.65.60)

Matrícula: ###946#1

Visualize o documento original em <http://sipac.ufpe.br/documentos/> informando seu número: **196**, ano: **2023**, tipo: **APROVACAO DA BANCA**, data de emissão: **29/08/2023** e o código de verificação: **de989dce92**

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Aos meus professores orientadores, Renato Motta e Silvana Bastos, por me apoiarem e me guiarem pelos últimos seis anos e meio, nos quais fui aluno pesquisador no grupo de pesquisa PadMec.

A todos os integrantes do grupo de pesquisa PADMEC por todas as orientações, trocas de conhecimentos e contribuições na minha pesquisa e jornada acadêmica.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, por compartilharem, pacientemente, seus conhecimentos e ensinamentos, contribuindo imensuravelmente na minha especialização como engenheiro civil e como pesquisador.

Aos meus amigos que cativo desde a escola, por todos os momentos de felicidade e descontração, pelas sessões online de RPG, pelas risadas, e pela compreensão considerando minha frequente indisponibilidade devido aos meus estudos. Um obrigado especial a Arthur Ferreira, Caio Cavalcanti, Marcelo Navarro e Reinaldo Lira.

Aos meus amigos Felipe Filgueiras, Gabriel Machado, Luciana Bezerra, Matheus Paraiso, Rayanne Sena e Victor Takeshi pelo companheirismo e pelo apoio aos meus estudos.

A Victor Martorelli por ser um irmão para mim desde que éramos crianças, por nossos momentos que podemos voltar a ser crianças bobas jogando *Mario Party*. Por me dar espaço para ser eu mesmo e deixar de lado, momentaneamente, o mundo caótico que nos rodeia.

A Celeste Campelo, por escolher todos os dias estar comigo, me apoiando, amando, acolhendo e me fazer acreditar em mim. Por ouvir todas as minhas ideias loucas de livros e jogos que nunca terminei, mas que são importantíssimos para mim. Por ter paciência no meu processo de desenvolvimento pessoal e profissional. O companheirismo, o amor e a gratidão que sinto por você me motivou e me motiva a continuar lutando.

À minha família, por darem todo o apoio que vocês puderam, por me aguentar nessa bagunça que foi o isolamento social, por me orientar em todas as minhas dúvidas. Agradeço especialmente pelo carinho, amor e paciência.

RESUMO

Nesta pesquisa foi investigada a variação de pressões de falha de dutos curvos e retos com defeito internos de corrosão, em função de seus parâmetros geométricos. A aplicação de dutos curvos é vasta, ocorrendo majoritariamente na solução logística perante obstáculos físicos. Alguns estudos já foram realizados previamente comparando resultados de pressões de falha obtidos via Método dos Elementos Finitos (MEF) com os obtidos pelo Coeficiente de Lorenz (LC) e indícios encontrados apontaram para possíveis melhorias ao fator. Foram realizadas modelagens e análises via MEF através do software PIPEFLAW, desenvolvido pelo grupo PadMec da UFPE, que foi modificado para automatizar o processo de encurvamento de dutos e de modelagem e análise de múltiplos casos em sequência. Estudos paramétricos, considerando o diâmetro externo da seção transversal, o comprimento, a profundidade e a largura do defeito, foram conduzidos, visando encontrar alguma relação com a previsão do Fator Alvo (TF), que indica a razão entre as pressões de falha de dutos curvos e retos. Inicialmente, foram modelados 40 casos discretizados, 10 para cada variável avaliada, provendo os primeiros indícios de quais parâmetros seriam relevantes. Foram produzidos mais 120 casos aleatórios para a realização de regressões lineares e logarítmicas, que apontaram para a profundidade do defeito (d) como o parâmetro de maior relevância para a previsão do TF para casos Intrados. Foram então produzidos 100 casos discretizados variando a profundidade do defeito e o raio relativo do duto, e foram feitas 5 novas propostas, intituladas Fator de Nepo (NF), para melhorar a previsão do TF, das quais a última apresentou Raíz do Erro Quadrático Médio (RMSE) igual a $34.5e^{-3}$ e Erro Percentual Absoluto Médio (MAPE) igual a 1.0%, contrastando com os resultados do LC que apresentou RMSE igual a 1.8 e MAPE igual a 20%. Tais resultados reforçam a possibilidade da correlação entre o parâmetro profundidade do defeito e a previsão do TF.

Palavras-chave: dutos curvos; defeito de corrosão; pressão de falha; método dos elementos finitos; fator de Lorenz; fator de Nepo.

ABSTRACT

In this research, the variation of failure pressures of curved and straight pipelines with internal corrosion defects was investigated, considering their geometric parameters. The application of curved pipes is extensive, mainly in logistic solutions when facing physical obstacles. Some studies have already been conducted comparing failure pressure results obtained through the Finite Element Method (FEM) with those obtained by the Lorenz Coefficient (LC), and the findings indicated potential improvements to the factor. Modeling and analysis were performed using FEM through the PIPEFLAW software, developed by the PadMec group at UFPE, which was modified to automate the pipe bending process, and the modeling and analysis of multiple cases in sequence. Parametric studies were conducted, considering the external diameter of the cross-section, length, depth and width of the defect, aiming to find an interrelation with the Target Factor (TF), which indicates the ratio between failure pressures of curved and straight pipes. Initially, 40 discretized cases were modeled, 10 for each evaluated variable, providing initial indications of relevant parameters. Additional 120 random cases were generated for linear and logarithmic regressions, which indicated that the defect depth (d) was the most relevant parameter for predicting the TF for Intrados cases. Subsequently, 100 discretized cases were generated, varying the defect depth and pipe relative radius, and 5 new proposals, called Nepo Factor (NF), were made to improve the prediction of TF. The last proposal showed a Root Mean Square Error (RMSE) of $34.5e^{-3}$ and Mean Absolute Percentage Error (MAPE) of 1.0%, contrasting with the results of the LC, which presented an RMSE of 1.8 and MAPE of 20%. These results reinforce the possibility of a correlation between the defect depth parameter and the prediction of TF.

Keywords: curved pipes; corrosion defect; failure pressure; finite element method; Lorenz factor; Nepo factor.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Malha dutoviária brasileira	13
Figura 2 – Danos socioambientais de um acidente de duto.....	14
Figura 3 – Defeitos de corrosão em um duto	15
Figura 4 – Seção transversal de um duto sob efeito de ovalização	16
Figura 5 – Duto com Defeito Extrados.....	17
Figura 6 – Duto com Defeito Intrados.....	17
Figura 7 – Cargas de colapso e de instabilidade x pressão interna.....	22
Figura 8 – Fluxograma da metodologia utilizada.....	29
Figura 9 – Elemento hexaédrico de oito nós.	31
Figura 10 – Transição de malha nas regiões próximas ao defeito.....	32
Figura 11 – $\frac{1}{4}$ de Malha de um duto reto.....	33
Figura 12 – Parâmetros geométricos de um defeito simples de corrosão	34
Figura 13 – Defeito real vs. defeito idealizado.....	34
Figura 14 – Condições de Contorno	35
Figura 15 – Distribuição de tensões ao longo da seção transversal.	39
Figura 16 – Algoritmo para Análise de Casos Aleatórios	43
Figura 17 – Fator de Ajuste via AEF e LC.....	46
Figura 18 – Fator de ajuste em função do raio relativo	47
Figura 19 – Distribuição de tensões de von Mises para configurações reta e curva	48
Figura 20 – Gráficos de Parâmetros vs. TF	49
Figura 21 – Previsão do TF Extrados em Função da Largura do Defeito	51
Figura 22 – Previsão do TF Intrados em Função de D_e/t	52
Figura 23 – Previsão do TF Intrados em Função do Comprimento do Defeito	52
Figura 24 – Previsão do TF Intrados em Função da Profundidade do Defeito	53
Figura 25 – Comparação de Fatores para Casos Extrados	54
Figura 26 – Comparação de Fatores para Casos Intrados	55
Figura 27 – Razão $NF1/TF$	56
Figura 28 – Razão $NF2/TF$	57
Figura 29 – Razão $NF3/TF$	58
Figura 30 – Sobreposição de $NF3$ e TF	59
Figura 31 – Razão $NF4/TF$	59
Figura 32 – Sobreposição de $NF4$ e TF	60
Figura 33 – Razão $NF5/TF$	61

Figura 34 – Sobreposição de NF5 e TF	62
Figura 35 – Razão LC/TF	62

LSITA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros materiais do modelo.....	32
Tabela 2 – Variação da pressão entre os métodos de LF e AEF	45
Tabela 3 – Pressões de falha dos 60 modelos.....	46
Tabela 4 – Dados Geométricos do Duto.....	48
Tabela 5 – Resultados da Regressão Linear Extrados.....	50
Tabela 6 – Resultado da Regressão Linear Intrados.....	51
Tabela 7 – Resultados da Regressão Logarítmica Extrados.....	53
Tabela 8 – Resultados da Regressão Logarítmica Intrados.....	53
Tabela 9 – Resultados das Otimizações das Propostas 1 e 2.....	56
Tabela 10 – Resultados de otimizações das propostas de 1 a 4.....	57
Tabela 11 – Resultado de otimização de propostas de 1 a 5	60

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AEF	Análise dos Elementos Finitos
d	Profundidade do defeito
D_e	Diâmetro externo da seção transversal
E	Módulo de elasticidade
FR	<i>Front fillet radius</i>
H_0	Hipótese nula
H_A	Hipótese alternativa
k_i	Coefficientes do Fator de Nepo
L	Comprimento do duto
l	Comprimento do defeito
LF	Fator de Lorenz
MAPE	Erro percentual absoluto médio
MEF	Método dos Elementos Finitos
MMQ	Método dos mínimos quadrados
MSE	Erro quadrático médio
NF	Fator de Nepo
PF	Pressão de falha
R^2	Coefficiente de determinação
R^2_a	Coefficiente de determinação ajustado
R_b	Raio médio de curvatura
R_m	Diâmetro médio da seção transversal
RMSE	Raiz do erro quadrático médio
t	Espessura da parede
TF	Fator alvo
TR	<i>Top fillet radius</i>
V_D	Variável dependente
V_I	Variável independente
w	Largura do defeito

LISTA DE SÍMBOLOS

α	Ângulo da posição do defeito
β	Coefficiente de regressão linear
ε_u	Deformação última
ε_y	Deformação de escoamento
ρ	Raio relativo
σ_u	Tensão última
σ_y	Tensão de escoamento

SUMÁRIO

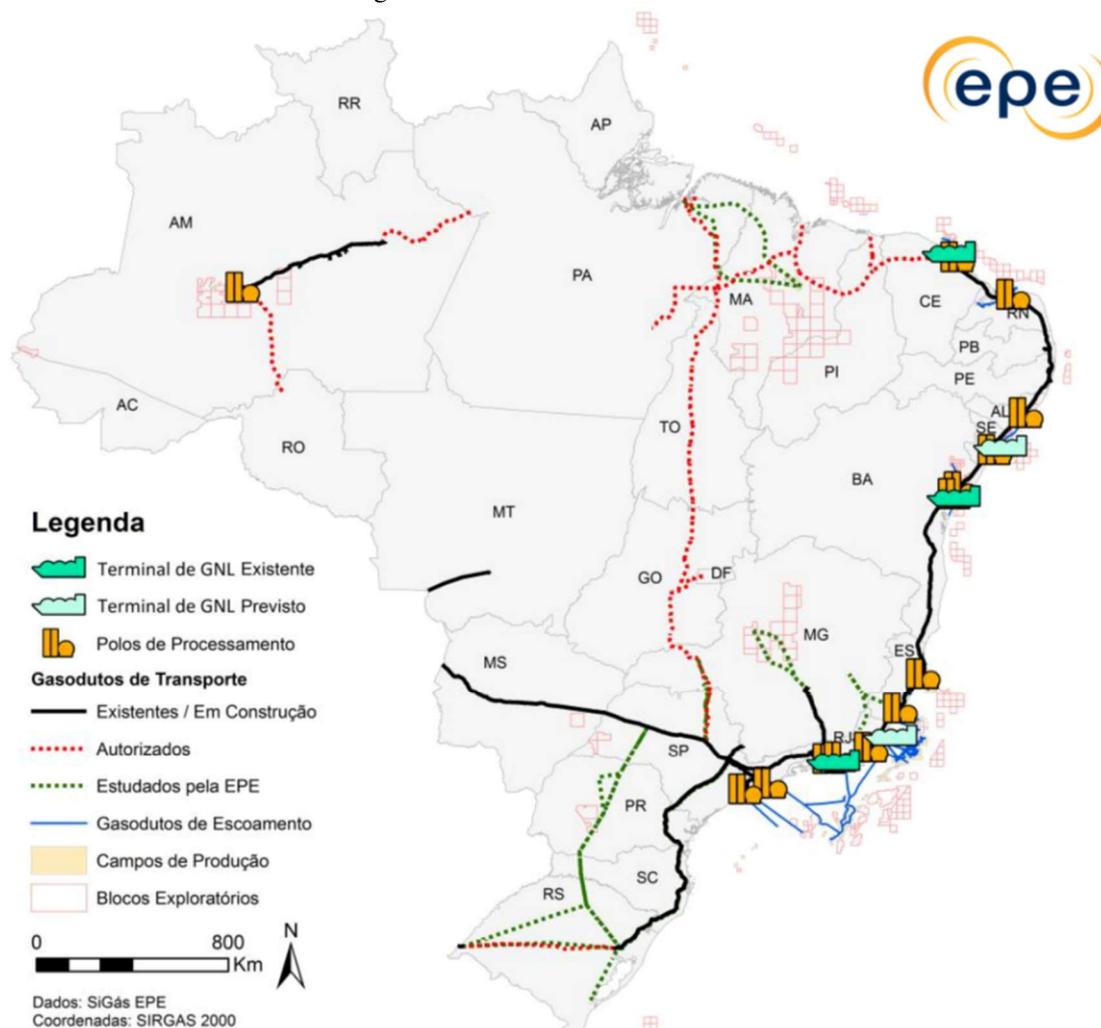
1	INTRODUÇÃO	13
1.1	MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA	13
1.2	OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS	18
1.3	ESCOPO DO TRABALHO	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
3	METODOLOGIA	29
3.1	Método dos Elementos Finitos	29
3.1.1	Configurações de modelagem	31
3.1.2	Análise não linear	35
3.2	ANÁLISE ESTATÍSTICA DE REGRESSÃO LINEAR	35
3.2.1	Regressão não-linear	37
3.3	FATOR DE LORENZ E COEFICIENTE DE LORENZ	37
3.4	OTIMIZAÇÃO	39
4	IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL	41
4.1	CURVATURA DO MODELO.....	41
4.2	MÚLTIPLOS CASOS ALEATÓRIOS	42
4.3	ANÁLISE DE REGRESSÃO LINEAR	43
4.4	OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DO MODELO	44
5	RESULTADOS	45
5.1	ESTUDOS PARAMÉTRICOS	47
5.1.1	Regressões numéricas	50
5.2	AVALIAÇÃO DO LC E DA PROPOSTA INICIAL DO NF	54
5.3	OTIMIZAÇÃO E NOVAS PROPOSTAS	55
6	CONCLUSÃO	64
	REFERÊNCIAS	67

1. INTRODUÇÃO

1.1. Motivação e justificativa

A produção de petróleo no pré-sal cresceu drasticamente ao longo da última década, passando de 41 mil barris por dia (bpd) em 2010 para 2 milhões bpd em 2020, um aumento aproximado de 48 vezes (PETROBRAS, 2023). Apesar disso, segundo o *World Factbook* (2010, 2022) e o Centro Brasileiro de Infraestrutura e Energia (CBIE, 2019), ao longo da última década, a malha dutoviária brasileira cresceu de aproximadamente 19.5 mil km para cerca de 45 mil km de extensão, em contraste com os Estados Unidos, cuja malha tinha 800 mil km em 2010 e em 2013 já atingia a marca de 2.2 milhões de km de extensão.

Figura 1 – Malha dutoviária brasileira



Fonte: <https://www.poder360.com.br/economia/ampliar-malha-de-gasodutos-demanda-r-17-bi-em-investimentos-diz-epe/>

Segundo Mahmoodian e Li (2017), os dutos são vastamente utilizados para transporte e distribuição de gases, óleos, petróleo cru e diversos outros produtos, geralmente fluidos, e são considerados um modal de transporte bastante seguro e eficiente. Apesar disso, quando ocorrem falhas, os danos causados ao meio ambiente e à população podem ser muito graves. As consequências incluem grandes custos de reparo, poluição em massa, possíveis danos a vidas humanas e até perturbação da vida cotidiana, como o que ocorreu em 2019 em Kentucky, nos Estados Unidos, onde a explosão de um duto de 76 cm de diâmetro deixou um morto e cinco feridos. As chamas chegaram a mais de 90 m de altura e “...o fogo queimou tanto que deixou a paisagem estéril, queimando árvores e grama e deixando apenas terra vermelha, pedras e cascalhos.” (AP NEWS, 2019, tradução nossa)¹. Outro exemplo é o vazamento de butano na cidade de Saint John, no Canadá, que acarretou no fechamento de avenidas e evacuação de 30 casas (CTV NEWS, 2018).

Figura 2 – Danos socioambientais de um acidente de duto



Fonte: <https://pipelineleakdetection.wordpress.com/2010/07/23/113/>

Isto posto, um dos fatores mais predominantes que afeta a pressão de falha de dutos é a corrosão do aço, que ocorre em função do tempo, paulatinamente reduzindo a resistência do duto. Segundo Xu *et al.* (2017), o surgimento e crescimento de defeitos de corrosão podem ser causados por condições ambientais severas. A corrosão tem esse efeito negativo por reduzir a espessura da parede do duto na região corroída (MAHMOODIAN; LI, 2017).

¹ No original: ...the fire burned so hot that it left the landscape barren, burning trees and grass and leaving only red dirt, rocks and gravel.

Figura 3 – Defeitos de corrosão em um duto



Fonte: https://www.researchgate.net/figure/Figura-22-Detalhe-dos-alveolos-de-corrosao-na-superficie-do-duto-apos-limpeza-com_fig10_308992327

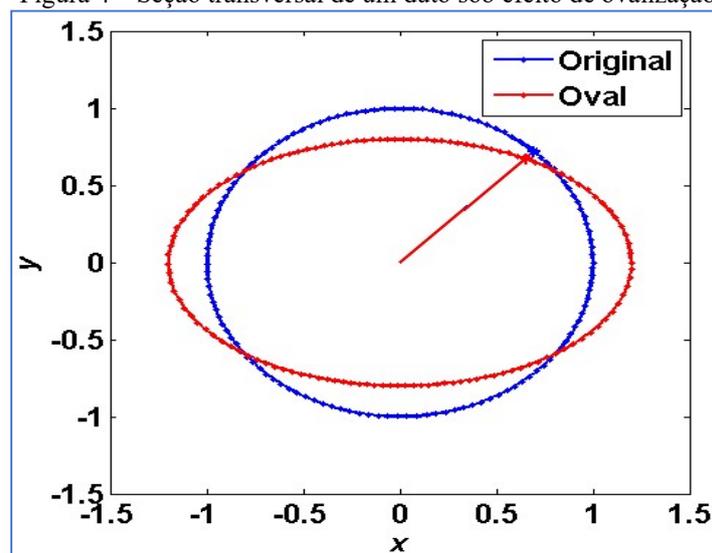
Assim sendo, os procedimentos de cálculo para estimar a segurança de dutos devem levar em consideração a ocorrência de defeitos de corrosão, de forma a prevenir acidentes e também estender o tempo de vida útil do duto, pois, com uma previsão mais precisa, o duto pode se manter em operação por mais tempo sem comprometer a segurança, acarretando em menos manutenções e reparos prematuros (MAHMOODIAN; LI, 2017). Diversos autores já abordaram a problemática da avaliação de pressão de falha de dutos retilíneos com defeitos de corrosão (CRONIN, PICK, 2002; NETTO, FERRAZ, ESTEFEN, 2005; OH *et al.*, 2007; TEIXEIRA *et al.*, 2008; FEKETE, VARGA, 2012; BEDAIRI *et al.*, 2012; CHOI *et al.*, 2016). Além disso, já há na literatura vários métodos empíricos para o cálculo de pressão de falha de dutos com defeitos, como o da ASME B31G (AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS, 1991) e o da DNV RP-F101² (DET NORSKE VERITAS, 2015), métodos esses que são amplamente utilizados na indústria (XU *et al.*, 2017).

Outro fator pertinente ao estudo de pressão de falha de dutos é a possibilidade de sua geometria não ser retilínea, mas sim curva. A utilização de dutos curvos parte da necessidade de vencer todos os possíveis obstáculos topológicos ou logísticos no trajeto do transporte do fluido (RIAGUSOFF *et al.*, 2010). Nessa perspectiva, alguns autores já abordaram a problemática de dutos curvos, os quais serão apresentados no capítulo seguinte, Revisão Bibliográfica.

² prática recomendada da *Det Norske Veritas*

A produção do duto curvo também deve ser esclarecida pois, na maioria das vezes, é feita encurvando um duto reto. Esse processo pode ser feito a frio, geralmente *in-loco*, com auxílio de equipamentos próprios para encurvar dutos, como o *pipe-bending machine*, ou feito a quente, durante o processo de fabricação. A diferença principal entre os métodos é que, no primeiro, é possível observar complicações tais quais a ovalização da seção transversal e ondulações locais, enquanto que o segundo não há tais problemas (RIAGUSOFF *et al.*, 2010). Vale salientar as possíveis dificuldades nas análises de elementos finitos, como na modelagem das concentrações de tensões e na necessidade de implementação de automatização da geração de defeitos ovalizado em conjunto com dutos curvos. Diante disso, neste trabalho serão considerados apenas dutos encurvados a quente com o fim de avaliar exclusivamente parâmetros geométricos próprios do duto e do defeito de corrosão.

Figura 4 – Seção transversal de um duto sob efeito de ovalização



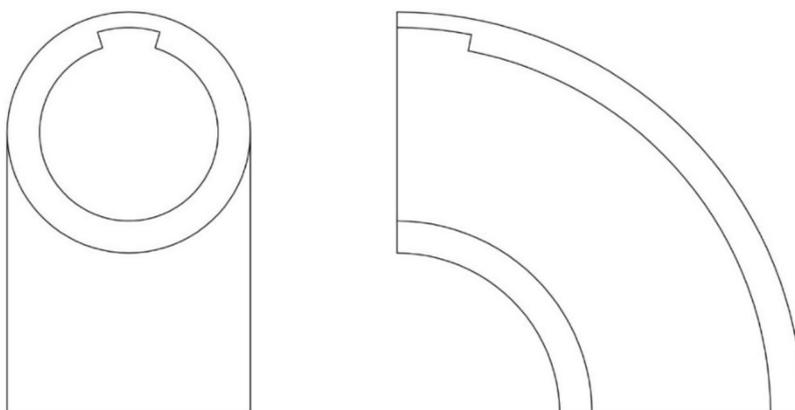
Fonte: Motta et al., 2021.

Segundo Bubenik e Rosenfeld (1993, apud LEE *et al.*, 2015, p.441), existe uma relação, intitulada Fator de Lorenz (*Lorenz Factor - LF*), entre a pressão de falha de dutos retos e curvos com defeitos em função da curvatura e da posição angular do defeito na seção transversal. O inverso dessa relação é o Coeficiente de Lorenz (*Lorenz Coefficient - LC*). Essas relações se dão em função da distribuição diferencial de tensões que ocorre devido à geometria curva, tal que defeitos na posição intrados sofram um acréscimo de concentração de tensões enquanto que os na posição extrados são submetidos a tensões menores. Entretanto, apesar desse estudo, não existe um procedimento consolidado para

a avaliação de defeitos em curvas, especialmente considerando os resultados obtidos por Nepomuceno *et al.* (2019, 2020) que evidenciam erros da aproximação via LC, caracterizado pela sua formulação simplificada.

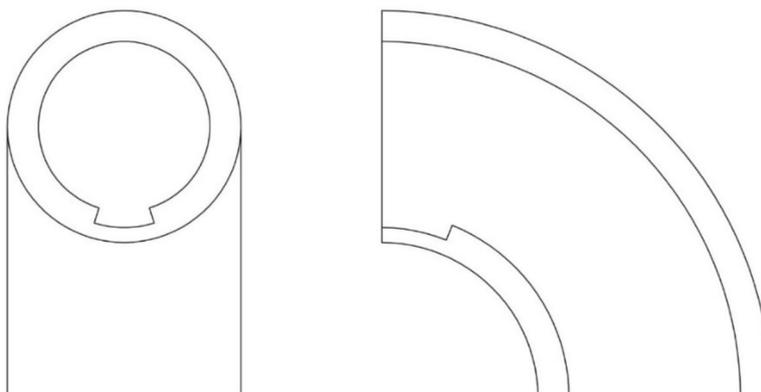
Para facilitar a comunicação e o estudo de dutos curvos com defeito de corrosão em diferentes posições, serão adotadas as seguintes nomenclaturas previamente utilizadas: Extrados, para defeitos encontrados na região mais externa da curva, e Intrados, para defeitos encontrados na região mais interna da curva. As Figura 5 e Figura 6 abaixo esclarecem as definições de tais termos:

Figura 5 – Duto com Defeito Extrados



Fonte: O autor.

Figura 6 – Duto com Defeito Intrados



Fonte: O autor.

Assim sendo, ficou evidenciado que são necessários mais estudos para aprimorar o LC ou elaborar uma nova formulação que o substitua. Para isto, modelos de dutos retos e curvos serão gerados para a simulação via o Método dos Elementos Finitos (MEF) para

obter pressões de falha de diferentes geometrias, visando obter o, aqui chamado, Fator Alvo (*Target Factor* - TF), que relaciona os resultados dos casos curvos e retos. Primeiro serão avaliados os possíveis parâmetros que interfiram na relação de pressão de falha entre os dutos de geometrias diferentes, para então identificar os parâmetros que serão utilizados e, enfim, apresentar diferentes propostas de formulação com o objetivo de obter uma que apresente o menor erro possível quando comparado com o TF. A formulação final obtida, intitulada Fator de Nepo (*Nepo Factor* - NF), apresentou erro de 1%, utilizando dados de 100 casos, e foi comparada com formulações alternativas, incluindo o LC.

1.2. Objetivos gerais e específicos

O objetivo geral deste trabalho é utilizar simulações computacionais, via MEF, de dutos retos e curvos, com defeitos internos de corrosão nas posições intrados e extrados, para obter pressões de falha e, baseado no LC, propor uma equação representativa para a relação entre as pressões de ruptura de dutos curvos e retos.

Os casos estudados serão de dutos com defeitos internos de corrosão nas posições intrados, região mais próxima ao centro da curvatura, e extrados, região mais distante do centro da curvatura.

Os objetivos específicos são:

- Automatizar o processo de modelagem e análise de dutos curvos com defeitos internos de corrosão.
- Realizar um estudo paramétrico avaliando a influência dos parâmetros geométricos do duto e do defeito no TF.
- Elaborar, através de regressões estatísticas e ferramentas de otimização, uma equação que represente o TF em função dos parâmetros abordados.
- Comparar os resultados e erros de NF com os de LC.

1.3. Escopo do trabalho

A estrutura deste trabalho é dividida nos seguintes capítulos:

- Capítulo 1: explanação da justificativa, da motivação, dos objetivos gerais e específicos, e do escopo deste trabalho.
- Capítulo 2: levantamento bibliográfico de pesquisas e trabalhos prévios abordando dutos curvos e simulação computacional.

- Capítulo 3: apresentação dos métodos utilizados nas simulações computacionais e nas regressões numéricas.
- Capítulo 4: detalhamento da implementação computacional dos métodos utilizados.
- Capítulo 5: apresentação de resultados provenientes das simulações computacionais e das regressões numéricas, e de propostas de estimativas do TF.
- Capítulo 6: conclusão desta dissertação e propostas de trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O estudo de dutos curvos é amplo e diversificado, abordando erosão em curvas e conexões, fluxos diversos, aplicação de pressões internas e momentos fletores, robôs de inspeção e manutenção internas ao duto, modelagem e simulação computacional de dutos corroídos, entre outros. Segundo *Web of Science* (2023), na área de engenharia, há cerca de 71 mil artigos sobre dutos, sendo a maioria publicado na China, com cerca de 16 mil artigos, e nos Estados Unidos, com aproximadamente 15 mil artigos, enquanto que no Brasil foram publicados cerca de 1.4 mil artigos. Além disso, há pouco mais de 2 mil artigos sobre dutos curvos e 6.7 mil sobre cotovelos, representando, juntos, cerca de 12% do total de artigos sobre dutos. Segue abaixo um levantamento dos estudos realizados mais relevantes para este trabalho.

Nepomuceno *et al.* (2019) elaboraram um estudo exploratório da influência da curvatura na pressão de falha de dutos curvos com defeitos simples de corrosão. O trabalho foi realizado utilizando o software de modelagem e análise, via MEF, PIPEFLAW (CABRAL *et al.*, 2017; MOTTA *et al.*, 2017; RODRIGUES *et al.*, 2017; SOARES *et al.*, 2019; PIMENTEL *et al.*, 2020; FERREIRA *et al.*, 2021; MOTTA *et al.*, 2021; SOUSA; AFONSO; WILLMERSDORF, 2021), desenvolvido pelo grupo de pesquisa PadMec³ da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). Os autores implementaram a possibilidade de curvas na etapa de modelagem, assim como os consequentes ajustes nas condições de contorno. Foram gerados onze modelos, sendo cinco extrados, cinco intrados e um reto, onde todos os parâmetros se mantiveram iguais exceto o raio de curvatura. Os resultados obtidos indicaram que na situação com defeito de corrosão extrados há um incremento de até 9% na pressão de falha, enquanto que na situação com defeito de corrosão intrados há um decréscimo de até 12%. Quando comparados com o LF, os resultados obtidos via MEF apresentaram um comportamento similar sob variação do raio de curvatura, porém se mostraram menos destoantes da situação reto.

Posteriormente, Nepomuceno, Motta e Afonso (2020) elaboraram uma proposta de formulação para obtenção de pressões de falha com mais acurácia e precisão do que por modelos empíricos, e mais rápida do que via MEF. Um estudo paramétrico foi realizado, variando espessura da parede, diâmetro da seção transversal e largura do defeito, e para cada parâmetro variado, foram gerados modelos com curvatura variando

³ Processamento de Alto Desempenho em Mecânica Computacional.

de 2.7 a 8.1 (adimensional). A equação obtida foi uma adaptação do LF que, como sugerido pelos resultados, pode vir a ser uma alternativa de emprego, por ser mais precisa do que a que considera métodos empíricos. Assim sendo, é sugerido o uso do MEF devido a questões de segurança.

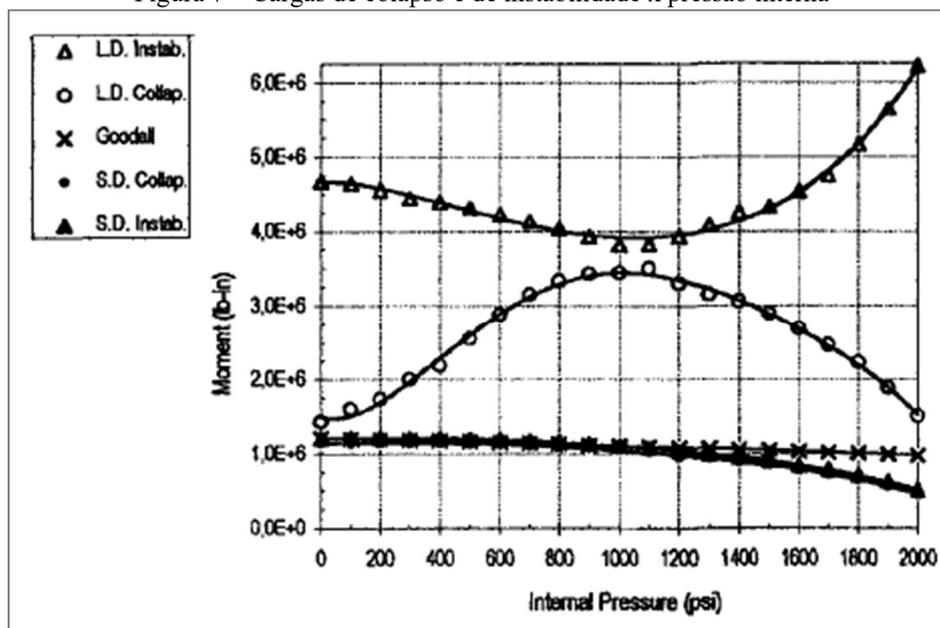
Uma das primeiras pesquisas a utilizar o LF foi a de Lee *et al.* (2015) que, em seu estudo, avaliou diversas posições de defeitos de corrosão em um duto curvo submarino, feito de aço API X42, através de fórmulas de projeto e simulação numérica. Os resultados indicaram que a pressão de falha do duto curvo, quando comparada a de um duto reto, variou consideravelmente, sendo ela inferior quando o defeito se encontra na posição intrados, e superior quando se encontra na posição extrados. Essa afirmação é reforçada pela distribuição de tensões proposta no LF. Além disso, o MEF apresentou resultados menos conservadores do que todos os outros métodos abordados, exceto o da DNV RP-F101 (DET NORSKE VERITAS, 2015).

Uma das pesquisas mais antigas realizadas nesta área foi a de Calladine (1974), que estudou, via análise limite, o cálculo do momento limite plástico de dutos curvos de parede fina. Os resultados indicaram uma leve correlação entre o momento plástico e o coeficiente de Poisson, estando de acordo com estudos prévios levantados pelo autor.

Muthanna *et al.* (2021) realizou uma avaliação da integridade de cotovelos corroídos, feitos de aço API 5L X52, usando modelagem numérica por meio do MEF. A pressão limite é avaliada e comparada com diferentes métodos de cálculo. Os resultados mostram que as normas usadas para dutos retos não são aplicáveis aos cotovelos devido a grandes erros nos valores de pressões limites quando comparados aos obtidos numericamente via MEF. No entanto, os resultados de normas modificadas, adaptadas para o caso de cotovelos, usando a fórmula de Goodall para o cálculo da tensão circunferencial em cotovelos com defeitos, são consistentes com os resultados via MEF.

Já Shalaby e Younan (1999) buscaram, em sua pesquisa, determinar a carga limite para dutos curvos submetidos a momentos fletores “abrindo a curva”, ou seja, aumentar seu raio de curvatura. Além disso, visaram também investigar a influência da pressão interna no valor da carga limite. Isso foi feito através da análise não linear de elementos finitos (AEF) utilizando o software comercial ABAQUS. Os resultados mostraram que a carga de colapso cresce e depois decresce com o aumento da pressão interna. A Figura 7 mostra os resultados obtidos.

Figura 7 – Cargas de colapso e de instabilidade x pressão interna



Fonte: Shalaby e Younan, 1999.

Outro estudo de limite plástico foi feito por Robertson, Li e Mackenzie (2005), no qual dutos curvos, acoplados a dutos retos, foram submetidos à combinação de momentos fletores e pressão interna, e simulados via AEF considerando um comportamento elastoplástico. Foram abordadas três condições de carregamento e três categorias de cargas de escoamento. Os resultados mostram que a análise e limite teórica não é conservadora para todas as combinações de carregamentos consideradas.

Também foram realizados estudos da influência do ângulo de curvatura em dutos curvos sem defeitos através de simulações via o MEF com a consideração de pequenos deslocamentos e grandes deformações, adotando um material elástico-perfeitamente plástico. Foram estabelecidos dois casos limitantes, sendo um sem e outro com dutos retilíneos acoplados (LEE *et al.*, 2006). Os resultados sugeriram que o ângulo de curvatura afetou a carga limite apenas nos modelos com dutos retos acoplados. Além disso, há uma variação suave entre a carga limite do duto curvo e do reto.

Riagusoff et al (2010) explorou a modelagem via MEF e análise de dutos encurvados a frio, avaliando as consequências disso, ou seja, os efeitos de ovalização e ondulações locais. Foram utilizados modelos analítico e numérico para a obtenção da distribuição de tensões e de deformações, considerando carga, aplicação de momento fletor em uma das extremidades do duto, e descarga, liberação do momento fletor. Os resultados indicaram grandes valores de tensões residuais e locais com crescentes deformações, onde ocorrem ondulações.

Michael, Veerappan e Shanmugam (2011) estudaram curvas em dutos com seções transversais elípticas ou semiovais, submetidos a aplicação de momentos fletores usando AEF. O material considerado é elástico-perfeitamente plástico. Os resultados obtidos sugerem que a carga de colapso é relevante e elevada na maioria dos modelos com seções transversais elípticas, enquanto que o efeito de afinamento da parede não demonstrou significância. Na conclusão, os autores afirmam que o uso de seções transversais elípticas é adequado para a avaliação de dutos ovalizados.

Wyszormirska (2014), em seu trabalho, buscou determinar cargas de colapso em dutos de paredes finas quando submetidos a esforços de pressão interna e de momento fletor. Com esse objetivo, fez-se uso do software comercial ABAQUS para realizar a modelagem e simulação via o MEF. A geometria do duto foi um cotovelo de 90° conectado a dois dutos retos, num sistema fechado, ou seja, com tampas nas extremidades para assegurar que a pressão interna provoque efeito de forças axiais no sistema. Foram feitos três modelos variando a espessura e, conseqüentemente, o fator de curvatura, todos considerando o material como elástico perfeitamente plástico. Dessa forma, o efeito de encruamento é descartado. Os resultados indicam que o histórico de aplicação de carga só implica diretamente na forma da superfície de escoamento quando os efeitos de não linearidade geométricas (NLG) são levados em consideração. Além disso, a análise NLG convergiu para um resultado mais conservador quando comparada à análise limite. Por fim, os resultados indicam que a norma DNV RP-F101 (DET NORSKE VERITAS, 2015) não prevê adequadamente o comportamento de dutos curvos e, dessa forma, não se aconselha seu uso para tais casos, sendo mais indicado a aplicação de métodos numéricos.

O efeito da variação de parâmetros geométricos e materiais de dutos curvos com um defeito de corrosão externo extrados através de AEF não linear, seguido do uso de rede neural artificial, foi estudado e formulado por Khalajestani *et al.* (2015). Os parâmetros avaliados foram o raio de curvatura, raio da seção transversal, espessura da parede, profundidade, comprimento e largura do defeito. A comparação realizada foi entre dutos com defeitos e dutos sem defeitos, diferenciando das propostas de Nepomuceno *et al.* (2019) que comparam dutos curvos com retos. Além disso, nesse trabalho não foi realizada uma validação experimental, porém os resultados foram comparados com resultados disponíveis na literatura e soluções já amplamente aceitas. Os resultados indicaram que o comprimento e a profundidade do defeito foram os parâmetros mais impactantes na pressão de falha, enquanto que a largura do defeito e o raio de curvatura foram menos relevantes. A nova formulação proposta, adaptada da DNV

RP-F101 (DET NORSKE VERITAS, 2015), apresentou uma diferença de -0.067 quando comparada com AEF, com desvio padrão de 0.07 .

Foi realizado também um estudo considerando crescimento de defeitos externos de corrosão modelados em função do tempo, no qual Larin e Potopalska (2017) estimaram a resistência residual de um cotovelo de 90° . A avaliação do estado deformado deste foi realizada usando o MEF. Como resultados, obtiveram a resistência residual de dutos com defeitos crescentes em operação por durações de 10 a 45 anos. Identificaram também as regiões em que há concentração de tensões máximas e de deformações plásticas. Os resultados apontam que os dutos avaliados não suportam a carga máxima após 37 anos de operação.

Além dos estudos descritos acima, muitos autores abordaram problemáticas menos conectadas com a deste trabalho, porém, ainda aplicadas a defeitos em curvas de dutos.

Iniciando pela área de avaliação de corrosão, Azimian e Bart (2014) elaboraram um estudo de hidro abrasão⁴ em dutos curvos, especialmente cotovelos de 90° e junções-T, onde as partículas sólidas, por serem mais densas que o fluido que as transporta, sofrem mais efeito da força centrífuga e, portanto, desgastam mais severamente a região extrados da curva. Tal efeito gera um “desgaste oco” que eventualmente evolui para o rompimento da parede do duto. O estudo foi dividido em cinco etapas: geração de malha e geometria, estudo e refinamento da malha, solução do fluxo do fluido, rastreamento de partículas sólidas e cálculo de erosão. Seus resultados foram compatíveis qualitativamente com os resultados de outros pesquisadores como Blanchard (1981) e Chen, Mclaury e Shirazi (2006). Entretanto, devido à falta de resultados experimentais, mais estudos experimentais com bombeamento de “lamas industriais” foram posteriormente elaborados pelos autores visando validar mais resultados via Dinâmica de Fluidos Computacional (*Computational Fluid Dynamics* - CFD). Em Azimian e Bart (2015), um testador de erosão com acelerador centrífugo foi projetado para investigar a dinâmica das partículas e a erosão de diferentes materiais sob várias condições operacionais. As erosões de três ligas ferrosas variadas, de uma liga de alumínio e do polímero *Hawiflex* foram investigadas experimentalmente por variação paramétrica. O fluxo testado foi simulado via CFD e os resultados foram comparados e validados com os dados experimentais. Foi

⁴ Abrasão por líquido em cavitação ou por partículas sólidas num fluxo conhecido como *Slurry Flow*.

observado um crescimento da profundidade de erosão pelo aumento da concentração de sólidos, utilizando um aparelho estacionário de medição de rugosidade.

Ainda nesse aspecto, Chen *et al.* (2015) estudaram um modelo de previsão de corrosão por erosão em conexões de dutos, como cotovelos, considerando interações líquido-partícula, partícula-partícula e parede-partícula, baseado em CFD e Método dos Elementos Discretos (*Discrete Element Method* - DEM). Foram realizadas simulações numéricas combinando código CFD, utilizando o software de simulação de fluidos ANSYS FLUENT, com código DEM, utilizando o software de simulação de material a granel EDEM (*Experts in Discrete Element Modeling*), visando prever a localização e a taxa máxima de erosão em cotovelos de 45°, 60° e 90°. Os resultados indicaram que as taxas de erosão foram bastante distintas nos três casos, sendo menor a taxa quanto menor o ângulo, porém a localização foi consistentemente indicada próxima à saída do cotovelo.

Visando reduzir o nível e a progressão da corrosão por erosão em dutos curvos, Mo *et al.* (2020) realizaram um estudo sobre o comportamento mecânico de um duto sob efeito de extrusão e estabeleceu uma configuração inovadora de duto curvo, na qual foram abordadas e avaliadas as características de erosão. Isso foi feito através da otimização dos parâmetros profundidade da chanfradura e diâmetro dos chanfradores. Em seguida, foram feitas análises de sensibilidade para fluxos com diferentes massas, diâmetros de partículas e velocidades. Os resultados indicaram que a nova configuração, por dispersar a área de impacto das partículas no cotovelo, pode reduzir a taxa de erosão máximo em até 26.5%. Foi evidenciado também que, dentro de um determinado domínio, a capacidade de redução da taxa máxima de erosão aumenta proporcionalmente à profundidade da chanfradura e ao tamanho das partículas.

Avaliando métodos de reabilitação de dutos corroídos, Shou e Huang (2020) realizaram simulações de dutos corroídos subterrâneos retilíneos e curvos utilizando o software ABAQUS. Foram realizados experimentos em pequena escala em laboratório e, em seguida, modelos numéricos foram aplicados à análise do comportamento mecânico de dutos subterrâneos retilíneos e curvos. Visando analisar o desempenho do método *cured-in-place pipe*⁵ (CIPP), foram considerados diferentes cenários para dutos retilíneos e curvos, com variações de pressão interna, de condições de superfície de carregamento, de deformações lineares, entre outros. Os resultados indicaram que o método CIPP pode

⁵ CIPP é um método de reparo de duto que não precisa de escavação. Para isso, é inserido um forro, que em seguida é inflado e exposto a temperatura para o seu endurecimento, formando uma superfície nova dentro do duto.

reforçar dutos com defeitos por reduzir concentrações de tensão e deslocamentos diferenciais próximos à corrosão.

Ao investigar o escoamento de fluidos diversos em dutos curvos, encontra-se a pesquisa de Viana (2012) que, em seu trabalho, estudou o escoamento de um fluido newtoniano em um duto curvo através de simulação de CFD. Foi realizado um estudo paramétrico do escoamento em dutos curvos, variando velocidade e temperatura, utilizando um modelo em escala de um duto curvo rígido com água como fluido de trabalho. Para isto, se fez necessária o uso de técnicas numéricas com o uso do software comercial CFX 11^a versão, de CFD. Os resultados indicaram que o modelo utilizado foi adequado para a descrição realista dos fenômenos que acontecem em dutos curvos e, assim, se mostra como uma opção de ferramenta para estudos similares de dutos curvos.

Ainda sobre escoamento, Oliveira e Loures (2016) realizaram um estudo paramétrico de curvas em dutos quando submetidas a diferentes regimes de escoamentos monofásicos. Para tal, técnicas de CFD foram utilizadas visando, além de avaliar os parâmetros ângulo e raio de curvatura, compreender melhor o escoamento secundário e a vorticidade em dutos em forma de S. As simulações computacionais foram feitas através do software COMSOL 5.1 Multiphysics, com diferentes configurações geométricas, sendo o ângulo de curvatura 22.5°, 45° ou 90°, e o raio de curvatura 1.5D, 6D ou 10D, sendo D o diâmetro interno do duto. Os resultados indicaram que o comportamento do fluido é intensamente afetado pelo número de Reynolds, pelo ângulo de curvatura e pelo raio de curvatura. Além disso, devido a escoamentos perpendiculares e forças centrípetas, que ocorrem nas curvas, vorticidades são geradas, interferindo assim no comportamento do fluido.

Com relação a dutos submarinos, Gong *et al.* (2014) realizaram um estudo referente a modelagem e simulação via elementos finitos de sistemas *S-lay*, que foi realizado com o auxílio do código computacional OrcaFlex. Tal estudo teve como objetivo investigar os efeitos dinâmicos do assentamento do duto, incluindo ondas de superfície, correntes oceânicas, movimento de “vasos” de assentamento de dutos, e o contato conflitante entre o duto e os roletes do *Stinger*⁶. Em paralelo, foi aplicado um modelo histerético não-linear de solo para identificar o mecanismo de interação entre o duto e o relevo oceânico. Os resultados mostram evidências bastante intuitivas dos efeitos

⁶ Estrutura de aço com roletes utilizada em assentamento de dutos submarinos.

dinâmicos do sistema *S-lay* de dutos submarinos. A maior contribuição do trabalho foi a observação de diferenças significantes entre resultados estáticos e dinâmicos.

Ao se avaliar a literatura quanto a dutos subterrâneos, encontra-se o estudo de Yoshizaki, O’rourke e Hamada (2003) que realizaram experimentos em larga escala para investigar o efeito de deformação permanente do solo (*Permanent Ground Deformation* - PGD), induzida por terremotos, em dutos subterrâneos encurvados. Os experimentos também tiveram como objetivos validar e calibrar a modelagem via MEF. Modelos analíticos foram usados para simular, de maneira confiável, o desempenho de areia seca e de areia saturada. Com os resultados obtidos, algumas recomendações foram propostas para melhorar a resistência a terremotos de dutos subterrâneos com cotovelos submetidos a PGD, como reforçar as regiões do cotovelo e de solda, aumentando efetivamente a espessura da parede do duto nessas seções.

Outra área de estudo é a avaliação de modelos numéricos, na qual Wu *et al.* (2021) investigaram a performance dinâmica de um longo duto curvo de travessia fluvial, cujo processo de imersão incluiu o uso de múltiplos corpos flutuantes. Foi estabelecido um modelo numérico do sistema de imersão levando em considerando diversas físicas envolvidas. Durante o processo de imersão, a geometria do duto provoca distribuição diferencial de carregamento, concentração de tensões e distribuição não uniforme de tensões nos cabos. Os resultados das simulações numéricas indicam que o processo de imersão do duto, associado ao método de construção proposto é seguro, estável e controlável. Com os cálculos numéricos e os resultados obtidos, valiosas recomendações de construção podem ser fornecidas, tal que sejam evitados potenciais riscos de engenharia, garantindo assim a eficiência econômica de futuros projetos similares.

Tratando-se de robôs desenvolvidos para avaliação e reparo de dutos curvos, uma nova abordagem para robôs que agem e se movem na região interna de dutos subterrâneos de gás urbano foi proposta por Roh (2002). Foi introduzido um novo robô miniatura chamado MRINSPECT (*Multifunctional Robotic crawler for INpipe inSPECTion*) IV, desenvolvido para a inspeção de dutos com quatro polegadas de diâmetro. Seu mecanismo de movimentação com rodas de direção diferencial, arrumadas tridimensionalmente, possibilita o ajuste às diferentes configurações de dutos, provendo navegação de excelência em regiões curvas do duto. Além disso, a análise de dutos com acessórios é fornecida em detalhes e as geometrias dos acessórios são descritas matematicamente. Fica evidente, pelos resultados deste trabalho, que é possível tornar corriqueira a análise de defeitos em dutos com configurações mais complexas.

Outro estudo referente a elaboração de robôs internos a dutos curvos foi realizado por Yan *et al.* (2020). A proposta feita foi de um robô para reparos de vazamentos de óleo e gás natural. Seu mecanismo é dividido em três partes: unidade motora, unidade de conexão e unidade bloqueadora. Para avaliar seu desempenho, dois índices (capacidade de escalada e desempenho em curvas) foram avaliados no momento em que a unidade motora do robô está em movimento. Foi estabelecido um modelo 3D para o robô e, utilizando tecnologia de protótipos virtuais, o índice de desempenho do robô foi simulado e avaliado. Os resultados indicaram qual o melhor modelo de mola para o desempenho ótimo, a angulação máxima de escalamento e que condições eram necessárias para a movimentação numa região curva do duto. Com tais resultados, o desempenho do robô atingiu os requerimentos de projeto do estudo.

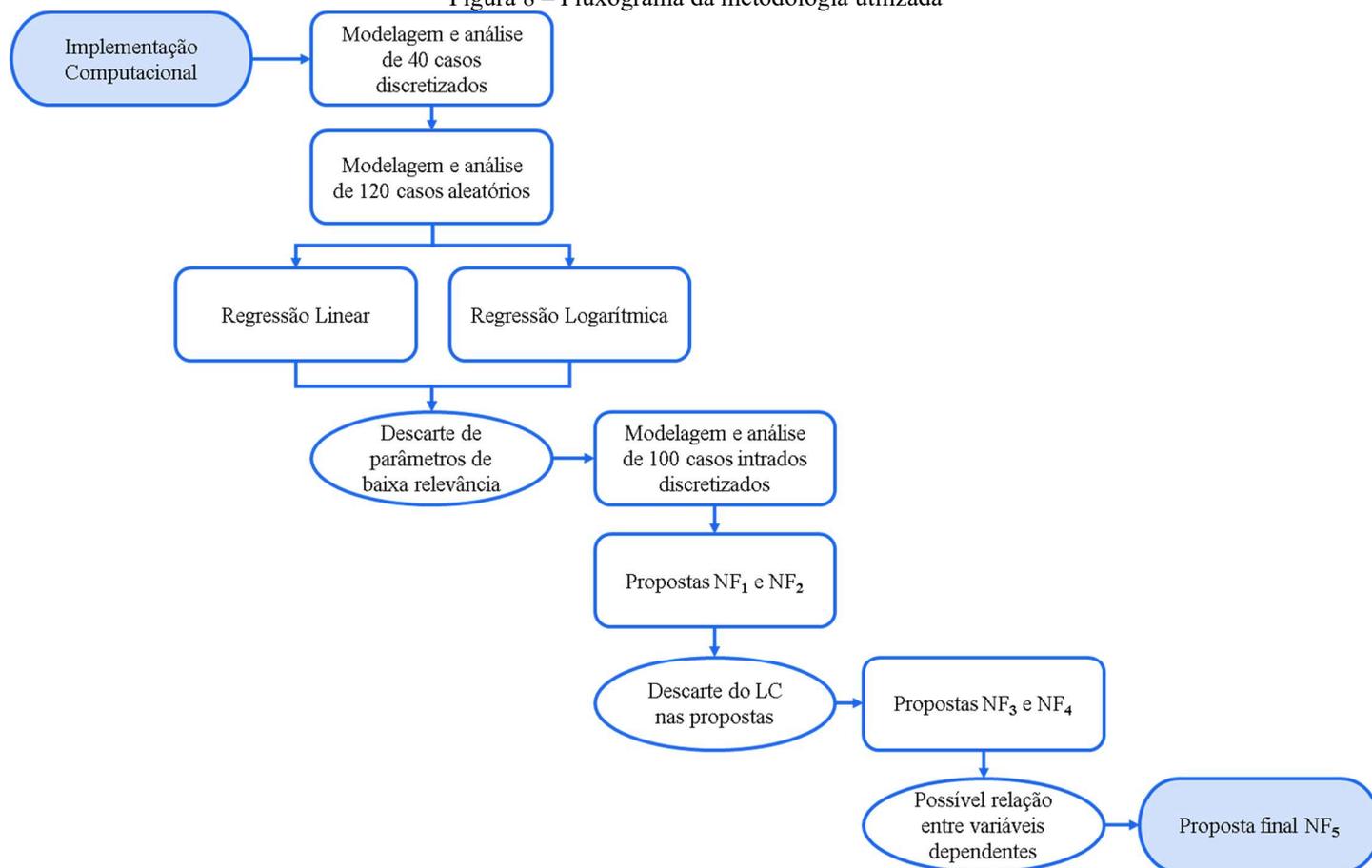
Por fim, existe também um estudo sobre efeitos eletroquímicos em dutos corroídos, no qual Shuai *et al.* (2021) desenvolveram um modelo de elementos finitos não-lineares com o objetivo de estudar o efeito mecano-eletroquímico em um defeito de corrosão em um cotovelo de duto. Os resultados indicaram que há um efeito aparente na pressão de ruptura do cotovelo corroído relacionado ao raio de curvatura, enquanto que reações anódicas e catódicas não foram afetadas por esse parâmetro quando submetidas a pressões normais de trabalho. Os cotovelos cujas corrosões se encontraram na posição intrados têm pressões de falha inferiores às de cotovelos com corrosões nas posições extrados e centro-linear. Identificou-se que o efeito da interação mecano-eletroquímica foi insignificante quando a deformação ou tensão gerada no defeito de corrosão foi elástico. No entanto, quando a profundidade do defeito ou a pressão interna aplicada no cotovelo foi suficiente para produzir uma deformação plástica local na região corroída, houve um aumento na taxa de corrosão do aço no defeito, devido a um efeito eletroquímico.

Isto posto, considerando as pesquisas acima, este trabalho visa dar continuidade à pesquisa e à proposta de Nepomuceno, Motta e Afonso (2020), tal que uma formulação adicional aos métodos empíricos e ao MEF seja elaborada. A pretensão é que essa equação determine suficientemente bem a relação entre a pressão de falha de dutos curvos e retos. Dessa forma, esta pesquisa poderá servir de precursora para eventuais propostas de métodos alternativos aos citados anteriormente.

3. METODOLOGIA

Considerando as condições de trabalho e de estudo durante uma pandemia e um determinado grau de limitação tecnológica, segue a descrição dos materiais e métodos empregados neste trabalho.

Figura 8 – Fluxograma da metodologia utilizada



Fonte: O autor.

3.1. Método dos Elementos Finitos

Conforme afirmado por Zienkiewicz e Talyor (2000), a limitação da mente humana em compreender a complexidade de seus arredores levou à necessidade de subdividir sistemas complicados em partes (elementos) cujos comportamentos já são prontamente entendidos. Em seguida, a partir dos elementos, se reconstrói o sistema para avaliar seu comportamento. Esse procedimento é amplamente adotado por profissionais de diversas áreas, como a engenharia, a economia e a pesquisa científica. Fish e Belytschko (2009) descrevem o MEF como um método numérico para aproximar a solução de equações diferenciais parciais em contornos complexos advindas de

problemas de engenharia via simulações computacionais, tendo como exemplo análise de tensões, transferências de calor e escoamento de fluidos.

O uso do MEF na simulação computacional já é aceito na literatura como um dos procedimentos mais precisos e acurados para a avaliação de integridade estrutural de dutos com defeitos (CHOUCHAOUI, PICK, YOST, 1992; FU, KIRKWOOD, 1995; BATHE, 1996; CRONIN, 2002; ANDRADE *et al.*, 2006; CABRAL, 2007). Além disso, o uso de métodos semi-empíricos, usualmente empregado na prática, pode levar a resultados imprecisos devido ao seu conservadorismo que leva à excessiva simplificação da configuração geométrica de defeitos reais. Em compensação, o uso do MEF demanda custo de mão de obra e tempo de análise alto (CABRAL, 2007; TIMASHEV, BUSHINSKAYA, 2016).

Em seu trabalho, Cabral (2007) elaborou um conjunto de ferramentas computacionais para modelagem e análise automática de dutos com defeitos de corrosão. A etapa de modelagem é realizada na linguagem de programação PCL (*Patran Command Language*) embasada no programa de pré e pós processamento MSC.PATRAN (PATRAN, 2005) enquanto que a etapa de análise ocorre através de um *script* escrito na linguagem de programação Python (PYTHON, 2005), que aciona o *solver* ANSYS (ANSYS INC., 2019), onde são aplicados os consecutivos incrementos de carga e obtidos os resultados finais da análise.

O processo de automatização da modelagem e análise, via MEF, de dutos com defeitos de corrosão é de fundamental importância, já que a modelagem e o controle da análise de forma manual demandam experiência com softwares específicos e de engenharia bastante especializada além de ser um processo repetitivo e sujeito a erros (CABRAL, 2007; MOTTA *et al.*, 2010). O PIPEFLAW é uma ferramenta computacional aceita e bastante utilizada na literatura (CABRAL *et al.*, 2017; MOTTA *et al.*, 2017; RODRIGUES *et al.*, 2017; SOARES *et al.*, 2019; PIMENTEL *et al.*, 2020; FERREIRA *et al.*, 2021; MOTTA *et al.*, 2021; SOUSA; AFONSO; WILLMERSDORF, 2021). Porém, previamente a este trabalho, o PIPEFLAW era capaz de modelar e analisar apenas casos de dutos retos, tal que, se fosse de interesse da pesquisa analisar dutos curvos, alterações manuais eram necessárias (NEPOMUCENO *et al.*, 2019).

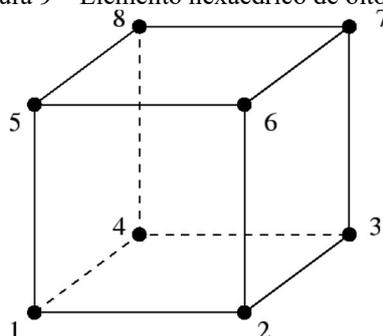
Neste trabalho foi realizada a implementação da opção de dutos curvos para que a modelagem e análise sejam feitas integralmente pelo PIPEFLAW (CABRAL *et al.*, 2017; MOTTA *et al.*, 2017; RODRIGUES *et al.*, 2017; SOARES *et al.*, 2019; PIMENTEL *et al.*, 2020; FERREIRA *et al.*, 2021; MOTTA *et al.*, 2021; SOUSA;

AFONSO; WILLMERSDORF, 2021) de forma automática. Essa implementação é descrita em detalhes posteriormente no capítulo 4 desta dissertação.

3.1.1. CONFIGURAÇÕES DE MODELAGEM

Neste trabalho, foram gerados modelos de dutos retos e de dutos curvos, com ângulo de curvatura de 90° com diferentes raios de curvatura. Modelos com defeitos internos de corrosão foram gerados, cujas malhas foram compostas por elementos hexaédricos de oito nós.

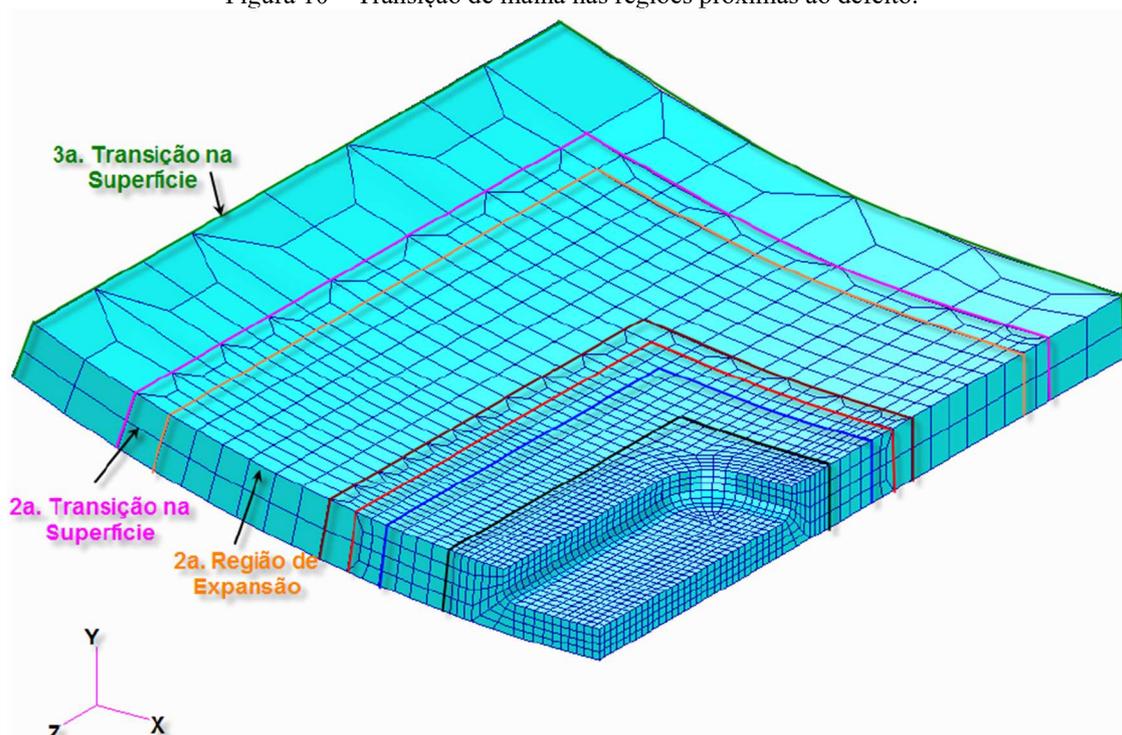
Figura 9 – Elemento hexaédrico de oito nós.



Fonte: https://web.mit.edu/calculix_v2.7/CalculiX/ccx_2.7/doc/ccx/node26.html

Segundo Cabral (2007), o uso do elemento hexaédrico de 8 nós produz resultados bastante satisfatórios. Além disso, é adotada a alternativa da utilização de uma malha de mais refinada na região do defeito, reduzindo a densidade de elementos, utilizando regiões adjacentes de transição, ao se distanciar dessa região como ilustra a Figura 10.

Figura 10 – Transição de malha nas regiões próximas ao defeito.



Fonte: Cabral, 2007.

Mais detalhes a respeito da modelagem automática podem ser encontrados em Cabral (2007), onde são descritas a padronização e a validação do PIPEFLAW. O material utilizado foi o um aço hipotético com propriedades mecânicas conforme a Tabela 1 abaixo:

Tabela 1 – Parâmetros materiais do modelo

Símbolo	Parâmetro	Valor
E	Módulo de Elasticidade	200 GPa
σ_y	Tensão de Escoamento	300 MPa
σ_u	Tensão Última	500 MPa
ϵ_y	Deformação de Escoamento	0.2%
ϵ_u	Deformação Última	5%

Fonte: O autor.

Com esses dados, pode-se descrever a curva Ramberg-Osgood como elaborado na norma britânica BS 7910+A1 (BRITISH STANDARDS INSTITUTION, 2015) utilizando a Equação 1:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \frac{A_r \sigma_Y}{E} \left(\frac{\sigma}{\sigma_Y} \right)^n \quad (1)$$

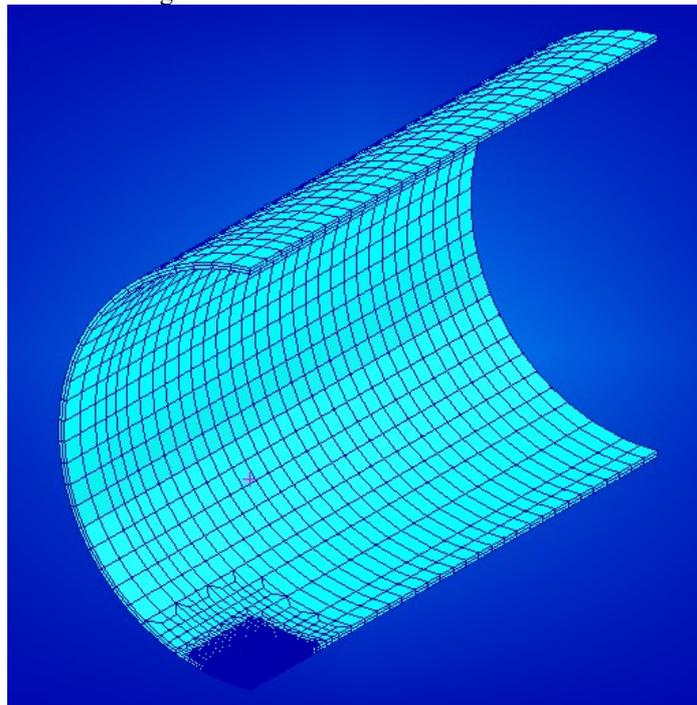
onde ε é a deformação, σ é a tensão, n é o expoente de escoamento, calculado pela Equação 2, e A_r é um coeficiente, calculado pela Equação 3.

$$n = \frac{\log[(E\varepsilon_u/\sigma_u) - 1] - \log[(E\varepsilon_Y/\sigma_Y) - 1]}{\log(\sigma_u/\sigma_Y)} + 1 \quad (2)$$

$$A_r = \frac{E\varepsilon_Y}{\sigma_Y} - 1 \quad (3)$$

A geometria dos defeitos utilizada é uma versão simplificada da situação real, sendo idealizada e retangular. Há uma dupla simetria nos modelos, localizada no centro do defeito, sendo uma na direção longitudinal e outra na transversal, de forma que se fez necessário modelar apenas um quarto do duto, como exemplificado na Figura 11.

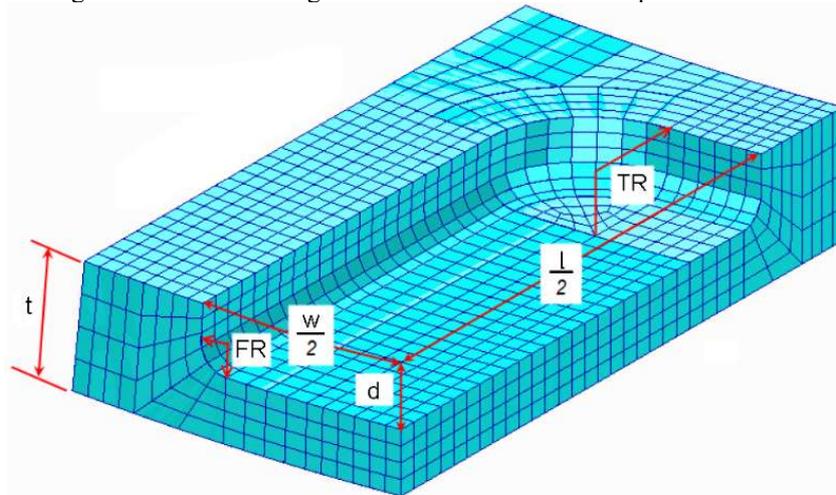
Figura 11 – ¼ de Malha de um duto reto.



Fonte: O autor.

Os parâmetros geométricos utilizados na modelagem são: diâmetro externo da seção transversal (D_e), espessura da parede (t), comprimento do duto (L), profundidade do defeito (d), largura do defeito (w), comprimento do defeito (l), *top fillet radius* (TR) e *front fillet radius* (FR). Os dois últimos parâmetros são utilizados na idealização do defeito e não são o foco da investigação proposta nesta dissertação. Os parâmetros referentes ao defeito são observados na Figura 12:

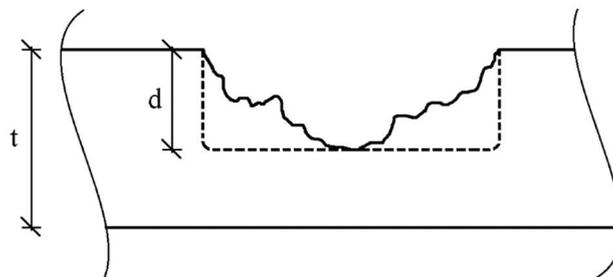
Figura 12 – Parâmetros geométricos de um defeito simples de corrosão



Fonte: Cabral, 2007.

Vale salientar que, devido à simplificação do formato do defeito, a perda de volume é maior do que no caso com defeito real, como mostra a Figura 13. Portanto, os resultados obtidos são conservadores, apresentando pressões de falhas inferiores às de dutos com defeitos reais.

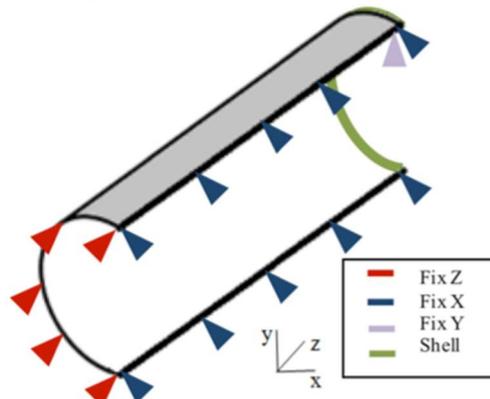
Figura 13 – Defeito real vs. defeito idealizado



Fonte: O autor

O problema em questão foi elaborado considerando o duto sem tampa, tal que as condições de contorno foram aplicadas perpendicularmente à seção transversal, travando a translação na direção Z. Devido à simetria do modelo, também foram aplicados travamentos perpendicularmente ao corte longitudinal, impedindo a translação na direção X. Uma última condição de contorno é aplicada travando a translação na direção Y, visando evitar o efeito de movimento de corpo rígido. A Figura 14 explicita tais condições:

Figura 14 – Condições de Contorno



Fonte: Motta et al., 2017 (modificada).

3.1.2. ANÁLISE NÃO LINEAR

Para a realização da AEF, foi necessário levar em consideração a não linearidade física e a não linearidade geométrica. Essas condições são necessárias devido ao comportamento elastoplástico do material e à ocorrência de deformações superiores a 1%. Obtém-se a solução por meio do método de Newton-Raphson, no qual ocorrem incrementos da pressão interna e para cada novo incremento um procedimento iterativo é realizado até chegar à situação de equilíbrio. É de suma importância levar em conta a análise de tensão de deformação para casos com aplicação de pressão interna, pois as deformações reduzem a espessura do duto enquanto aumenta, o que leva à redução da resistência e, conseqüentemente, uma possível instabilidade (ANSYS INC., 2019).

3.2. Análise estatística de regressão linear

A regressão linear é uma técnica da estatística cujo objetivo é realizar inferências causais e identificar dependência estatística entre variáveis, com aplicações em áreas diversas como engenharias, ciências naturais exatas (física e química), ciências sociais aplicadas, ciências biológicas etc. Ao buscar a solução de problemas de regressão, uma das opções é a aproximação a uma reta, recebendo o nome então de regressão linear (MONTGOMERY; PECK; VINING, 2012). Quando isso é realizado com apenas 2 variáveis, sendo uma dependente (V_D) e uma independente (V_I), temos:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \varepsilon \quad (4)$$

A Equação 4 é chamada de modelo de regressão linear simples, onde y é a V_D , x é a V_I , β_0 e β_1 são os coeficientes que otimizam a precisão da regressão, e ε é o erro (MONTGOMERY; PECK; VINING, 2012). Sendo n o número de V_I , quando $n > 1$, descreve-se um modelo de regressão linear múltiplo através da Equação 5 a seguir:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_n x_n + \varepsilon \quad (5)$$

Apesar da função acima não ser linear, a regressão é adjetivada como linear para indicar que o modelo é linear nos coeficientes $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_n$ (MONTGOMERY; PECK; VINING, 2012).

Visando obter a melhor aproximação possível, se utiliza o Método dos Mínimos Quadrados (MMQ), também conhecido como Mínimos Quadrados Ordinários (MQO). Esse procedimento elabora o cálculo da distância de cada ponto observado à equação estimada e, em seguida, a minimiza. Como resultado, obtêm-se os parâmetros otimizados e, em seguida, é possível então utilizar testes de hipótese para avaliar a validade e precisão da aproximação obtida (MONTGOMERY; PECK; VINING, 2012).

Os testes utilizados e avaliados foram o F de significância individual (FSI), o F de significância global (FSG) e o teste-t. Segundo Montgomery, Peck e Vining (2012), esses testes assumem que há uma hipótese nula (H_0) e uma hipótese alternativa (H_A), sendo a última definida convencionalmente como a hipótese formulada pelo pesquisador. Dessa forma, avalia-se a plausibilidade de H_0 , podendo ser rejeitada ou não. Devido à limitação amostral das pesquisas, erros podem ser cometidos, ou seja, rejeitar H_0 quando deveria ser aceita e vice-versa. Para isto, são estabelecidos níveis de significância (valor-p) que, para este trabalho, foram adotados como menores ou igual a 5%. O FSI indica, para cada parâmetro avaliado, o nível de significância para a rejeição de H_0 , ou seja, evidencia o grau das relações individuais entre as V_I e a V_D . Já o FSG é um teste tipo F que compara o modelo proposto com um modelo sem parâmetros dependentes, indicando coletivamente o grau da relação entre todas as variáveis. Uma resposta positiva indica que há pelo menos uma V_I relacionada com a V_D .

Já o teste-t indica a proximidade das médias amostrais com a H_0 , de forma que, quanto mais próximo de 0 for o valor absoluto do teste-t, mais os resultados amostrais se aproximam da H_0 . Sendo assim, quanto mais distante de 0, mais forte é o indício de relação.

São calculados também o coeficiente de determinação (R^2) e o coeficiente de determinação ajustado (R_a^2), que revelam quanto as V_I explicam a variabilidade da V_D , descritas, respectivamente, nas Equações 6 e 7 abaixo:

$$R^2 = \frac{\sum(\hat{Y}_i - \bar{Y})^2}{\sum(Y_i - \bar{Y})^2} \quad (6)$$

$$R_a^2 = 1 - \frac{(n-1)}{(n-k-1)} \cdot (1 - R^2) \quad (7)$$

onde Y_i é o valor observado, \bar{Y} é o valor médio das observações, \hat{Y}_i é o valor estimado cuja formulação depende do modelo utilizado (linear, não-linear, logarítmico), n é o número de observações e k é o número de V_I . O uso do R_a^2 é preferível quando a regressão inclui muitas variáveis, pois, sob essa circunstância, o valor do R^2 aumenta mesmo que as V_I tenham baixa relevância na variação da V_D . No caso desta dissertação, será utilizado apenas R^2 , uma vez que a quantidade de V_I é bastante pequena.

Além desses testes, ao fim da regressão linear, obtêm-se os intervalos de confiança dos parâmetros, que delimitam, com 95% de confiança, os valores máximo e mínimos da inclinação de cada reta. Se o valor 0 estiver dentro do intervalo, não é possível afirmar que há evidências estatísticas de relação. Adicionalmente, quanto mais distante do valor 0 estiver o intervalo, mais forte é a evidência de relação.

3.2.1. REGRESSÃO NÃO-LINEAR

A aproximação a uma reta nem sempre é suficientemente adequada para ser adotada e, portanto, outras funções são cogitadas como a quadrática, a logarítmica e a exponencial. Para isto, podem ser realizadas transformações de funções, tal que uma função não-linear se adeque à formulação do modelo de regressão linear. As Equações 8 à 11 abaixo demonstram a transformação de uma função exponencial para uma linear:

$$y = b \cdot e^{a \cdot x} \quad (8)$$

$$\ln(y) = \ln(b \cdot e^{a \cdot x}) \quad (9)$$

$$\ln(y) = \ln(e^{a \cdot x}) + \ln(b) \quad (10)$$

$$\ln(y) = a \cdot x + \ln(b) \quad (11)$$

3.3. Fator de Lorenz e Coeficiente de Lorenz

O grande motivador desta pesquisa foram o Fator de Lorenz (LF) e o Coeficiente de Lorenz (*Lorenz Coefficient* - LC) que propõem formulações para previsão de pressão de falha de dutos curvos corrigindo equações empíricas proporcionalmente à relação do diâmetro médio da seção transversal pelo raio de curvatura (BUBENIK, ROSENFELD, 1993 apud LEE *et al.*, 2015). O seu uso parte do princípio de que a distribuição de tensões numa região curva de duto está relacionada aos parâmetros geométricos do duto e,

portanto, o cálculo da pressão de falha pode ser feito pelos métodos empíricos de forma padrão, sendo necessário em seguida multiplicar pelo LC como indica a Equação 12:

$$PF_{\text{curvo}} = PF_{\text{reto}} \cdot LC \quad (12)$$

onde PF é a pressão de falha. O cálculo do LC é feito de acordo com a Equação 13 abaixo:

$$LC = \frac{1}{LF} = \frac{\left(\frac{R_b}{R_m} + \text{sen}(\alpha)\right)}{\left(\frac{R_b}{R_m} + \frac{\text{sen}(\alpha)}{2}\right)} \quad (13)$$

onde α é o ângulo da posição do defeito, R_b é o raio médio de curvatura e R_m é o diâmetro médio da seção transversal. Para este trabalho, será definida como raio relativo (ρ) a relação entre R_b e R_m :

$$\rho = \frac{R_b}{R_m} \quad (14)$$

Dessa forma, o Coeficiente de Lorenz pode ser escrito como:

$$LC = \frac{(\rho + \text{sen}(\alpha))}{\left(\rho + \frac{\text{sen}(\alpha)}{2}\right)} \quad (15)$$

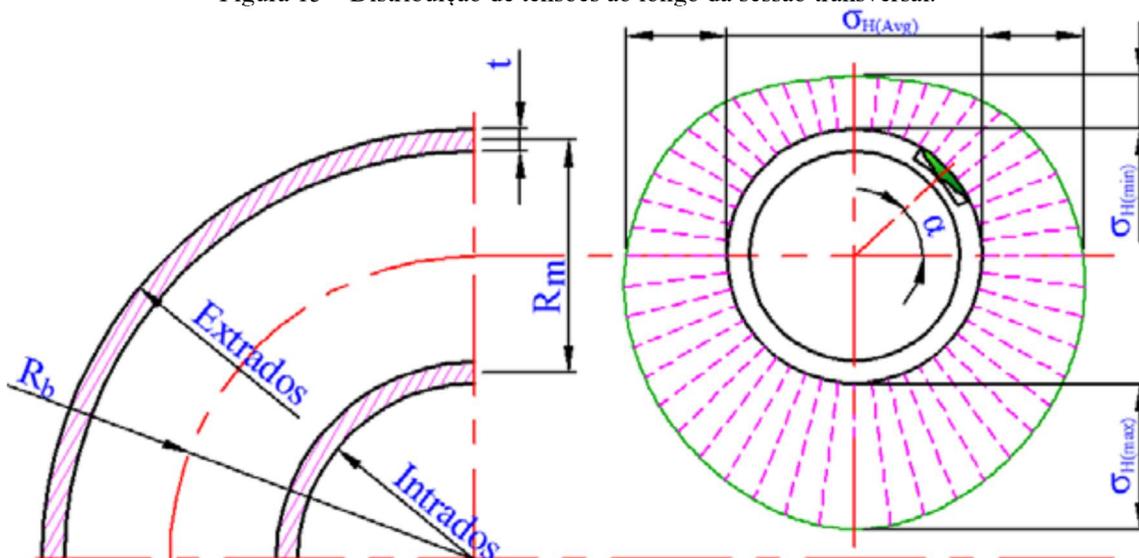
A partir da Equação 15, obtêm-se as Equações 16 e 17 para os casos limites: Extrados, onde $\alpha = 90^\circ$, e Intrados, onde $\alpha = -90^\circ$, respectivamente:

$$LC_I = \frac{(\rho + 1)}{(\rho + 0.5)} \quad (16)$$

$$LC_E = \frac{(\rho - 1)}{(\rho - 0.5)} \quad (17)$$

É importante notar que o valor limite, mínimo, de R_b é metade de R_m , pois para este valor, não físico, o duto se degenera. O Coeficiente de Lorenz tende ao infinito quando R_b se aproxima da metade de R_m ($\rho = 0.5$). Portanto o LC pode não ser válido para raios relativos muito pequenos ($\rho \sim 0.5$). A distribuição de tensões referente à posição angular do defeito está à mostra na Figura 15.

Figura 15 – Distribuição de tensões ao longo da sessão transversal.



Fonte: Lee et al., 2015

Em Nepomuceno *et al.* (2019) pressões de falha de modelos calculados via MEF e via LC foram obtidas. Quando comparados, os resultados indicaram que o LC prevê aumento de capacidade de carga em casos Extrados e perda de capacidade de carga em casos Intrados. Entretanto, a estimativa via LC é exagerada e seus resultados se distanciam bastante dos obtidos via MEF. Os resultados serão mostrados em detalhes no capítulo 5 desta dissertação.

3.4. Otimização

O processo de obtenção de uma equação representativa dos dados obtidos em experimentos parte de uma proposta inicial de formulação. Para avaliar se a proposta é promissora, se faz necessário o uso de ferramentas de otimização visando obter os parâmetros que melhor aproximem tal formulação. Se a equação ótima obtida não tiver uma aproximação suficientemente adequada, o processo se reinicia com uma nova proposta.

Neste trabalho, a ferramenta de otimização utilizada foi o software comercial MATLAB 2016 (THE MATHWORKS, INC., 2016) e o método escolhido foi o MMQ. Devido à ausência de restrições, a função utilizada foi *fminunc*⁷. Nessa etapa, a função Erro a ser minimizada pelo *solver* é a descrita na Equação 18:

⁷ O nome da função deriva do inglês “*Find MINimum of UNConstrained multivariable function*”.

$$E(a, b) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2} \quad (18)$$

onde Y é o valor experimental e \hat{Y} é o valor estimado, cuja formulação depende do modelo utilizado (linear, não-linear, logarítmico) e que é função dos parâmetros a e b . Ao obter os coeficientes ótimos, calculam-se então o Erro Quadrático Médio (*Mean Squared Error* – MSE), a Raiz do Erro Quadrático Médio (*Root Mean Squared Error* – RMSE) e a Erro Percentual Absoluto Médio (*Mean Absolute Percentual Error* – MAPE), pelas Equações 19, 20 e 21, respectivamente:

$$\text{MSE} = \sum_{i=1}^n \frac{(Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n} \quad (19)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n}} \quad (20)$$

$$\text{MAPE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|Y_i - \hat{Y}_i|}{Y_i} \quad (21)$$

4. IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL

O uso de ferramentas computacionais para a realização e o progresso deste trabalho foi indispensável. Diversos softwares foram utilizados visando proporcionar um objeto de estudo e obter resultados a serem analisados. Isto posto, algumas etapas da pesquisa demandaram ferramentas e funções específicas que não foram previamente desenvolvidas e, conseqüentemente, disponibilizadas. Portanto, fez-se necessária a implementação de algoritmos complementares para assegurar a viabilidade da execução desta pesquisa.

Assim sendo, este capítulo tem como objetivo expor e esclarecer as adições computacionais elaboradas e fornecidas pelo autor. Vale salientar que todas as contribuições descritas neste capítulo foram desenvolvidas na linguagem de programação Python e foram adicionadas ao software de modelagem e análise PIPEFLAW (CABRAL *et al.*, 2017; MOTTA *et al.*, 2017; RODRIGUES *et al.*, 2017; SOARES *et al.*, 2019; PIMENTEL *et al.*, 2020; FERREIRA *et al.*, 2021; MOTTA *et al.*, 2021; SOUSA; AFONSO; WILLMERSDORF, 2021). Mais detalhes referentes ao algoritmo original do PIPEFLAW podem ser encontrados no trabalho de Cabral (2007).

4.1. Curvatura do modelo

Previamente ao desenvolvimento deste trabalho, a modelagem de dutos curvos era feita de maneira parcialmente automática, sendo necessário interferir manualmente antes e depois da construção do modelo. Dessa forma, antes de submeter o modelo à etapa de análise, era necessário seguir quatro etapas descritas a seguir.

- I. Cálculo corretivo do comprimento do defeito;
- II. Modelagem de duto reto com defeito através do PIPEFLAW_M, utilizando valor do comprimento do defeito calculado na etapa anterior;
- III. Encurvamento numérico do modelo, utilizando coordenadas cilíndricas, rotacionando as posições dos nós dos elementos em 90°;
- IV. Correção manual das condições de contorno em 90° (UZ→UY e UY→UZ);

Como o encurvamento do duto é feito numericamente, ao alterar as coordenadas dos nós da malha, a geometria do defeito é modificada, o que acarreta na alteração no comprimento do defeito e, portanto, o defeito resultante não teria a dimensão verdadeira (de entrada). Para evitar esse erro, é calculado um valor de comprimento auxiliar (na

primeira etapa), que, ao ser distorcido (na terceira etapa), seja ajustado para o seu valor de entrada conservando, de forma aproximada, o volume do defeito originalmente pretendido. Mais detalhes de cálculos e algoritmo podem ser observados no trabalho de Nepomuceno *et al.* (2019).

Tendo em mente que este trabalho abordou centenas de modelos, seria inviável a ausência de automação no processo descrito acima. Sendo assim, todas as etapas descritas anteriormente foram adicionadas ao algoritmo do PIPEFLAW para que sejam feitas sem necessidade de intervenção humana, sendo necessário apenas que o usuário informe se o duto é curvo ou não e, no primeiro caso, a curvatura desejada.

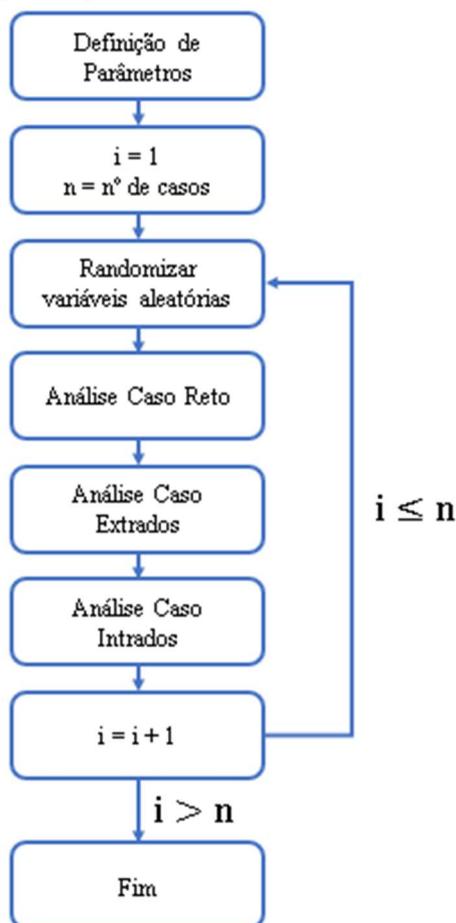
4.2. Múltiplos casos aleatórios

Considerando que esta pesquisa aborda o problema quantitativamente, para se obter resultados de referência, fez-se necessária a modelagem de mais de 600 casos. Originalmente, o script de modelagem e análise tinha como dados de entrada parâmetros físicos e geométricos de um único duto, assim como as condições de contorno e avaliação, sendo necessário que o usuário manualmente estipule tais valores e rode um caso por vez. Esse processo é lento e, portanto, incompatível com a proposta da pesquisa. Assim, o algoritmo original foi reestruturado para que, dados os intervalos para cada variável, seja possível rodar tantos casos aleatórios quanto desejado de forma automática, sem necessidade de intervenção humana entre cada nova modelagem.

Visando atingir o objetivo do trabalho, para cada caso aleatório, dois ou três modelos foram feitos, sendo um de duto reto, para servir de referência, e até dois de dutos curvos, dependendo da posição estudada se tratar de Intrados, Extrados ou ambas. O script original foi adaptado para o formato de função, tendo como entrada o índice do caso avaliado, os valores das variáveis aleatórias do caso e a curvatura (podendo inclusive ser sem curvatura). As variáveis têm intervalos pré-determinados de forma que, no processo de randomiza-las, é gerado um fator aleatório de 0 a 1 que é aplicado à variável.

Dessa forma, tornou-se viável a modelagem e análise de dutos reto e curvos para um mesmo caso. Segue abaixo, na Figura 16, um fluxograma apresentando o algoritmo para análise de casos aleatórios.

Figura 16 – Algoritmo para Análise de Casos Aleatórios



Fonte: O autor.

4.3. Análise de regressão linear

Nesta etapa do trabalho, o autor não necessitou elaborar um algoritmo de rápida solução de problemas de aproximação por regressão linear. Isso se deve ao fato de que na ferramenta MS Excel já há disponível um solver com esse propósito. É necessário ativar o modo desenvolvedor e adicionar o Pacote de Ferramentas de Análise, possibilitando o acesso à função Análise de Dados na aba Dados, onde se encontra a opção de análise de regressão. Os dados de saída obtidos são os coeficientes ótimos, os testes valor-p e F de significância global, o coeficiente de determinação (simples e ajustado) e os intervalos de confiança (95%). Além disso, também são disponibilizados gráficos dos ajustes de linhas e de resíduos.

A intervenção do usuário nesta etapa ocorreu apenas em transformações de dados. Dessa forma, foi possível utilizar o algoritmo de regressão linear para obter aproximações de funções não lineares.

4.4. Otimização dos parâmetros do modelo

Nesta etapa, um algoritmo de otimização foi elaborado através do software comercial MATLAB 2016 (THE MATHWORKS, INC., 2016) com o objetivo de averiguar a validade das formulações propostas. Assim como descrito na seção 3.4, o método escolhido foi o MMQ e, considerando a ausência de restrições, a função utilizada foi *fminunc*, cujo algoritmo padrão é o de Quasi-Newton de Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno (BFGS).

O algoritmo opera na seguinte ordem: definição de pontos experimentais, cálculo do TF, definição da função proposta, definição do ponto de partida, otimização dos coeficientes, cálculo do erro da função otimizada e, por fim, plotagem de gráficos.

5. RESULTADOS

O objetivo do estudo é encontrar um fator de ajuste alvo que relacione a pressão de falha (PF) do duto reto com a do curvo obtidas via AEF e propor um novo modelo baseado no LC. Para isso, este trabalho deu continuidade aos trabalhos de Nepomuceno *et al.* (2019) e Nepomuceno, Motta e Afonso (2020), utilizando seus dados e resultados como base para a elaboração do fator de ajuste.

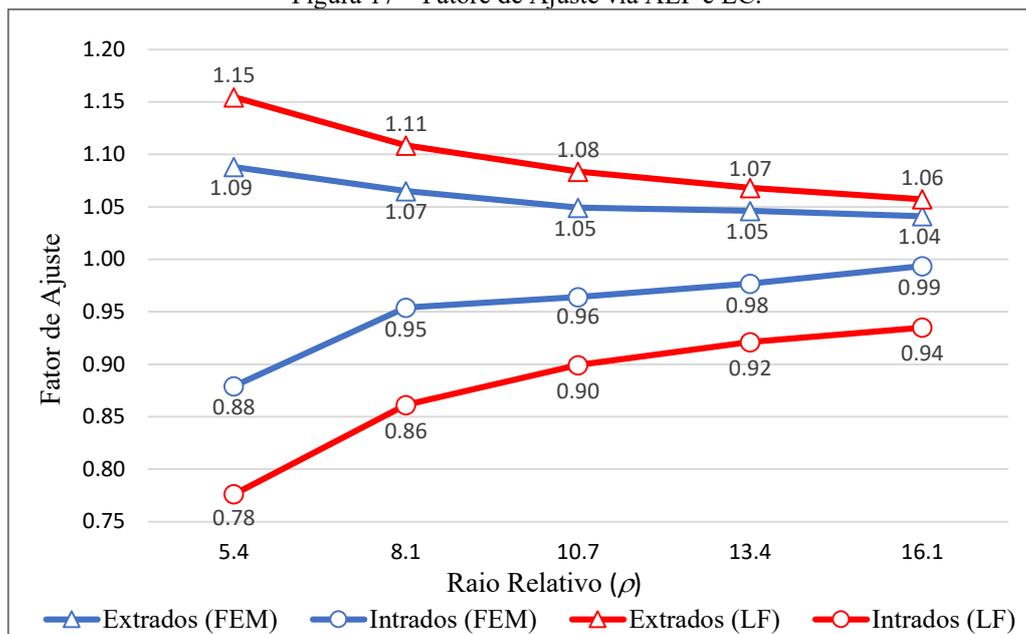
Em Nepomuceno *et al.* (2019) foi desenvolvido o procedimento de modelagem de dutos curvos e foram modelados e analisados 5 casos cujo único parâmetro avaliado foi o raio relativo, que variou de 5.4 a 16.1 (adimensional), via AEF, cujos resultados foram comparados com os obtidos via LC. No total foram produzidos 11 modelos (1 reto, 5 intrados e 5 extrados) e o material utilizado foi o aço API 5L-X52. Esses resultados indicaram que o LC provê resultados com comportamento geral similar ao observado via AEF. O erro observado aparenta ser apenas na magnitude dos valores obtidos, chegando a aproximadamente 12% quando comparado à AEF. Os resultados podem ser observados na Tabela 2 e na Figura 17.

Tabela 2 – Variação da pressão entre os métodos de LF e AEF

Posição do defeito	L	Fator de Lorenz	Pressão (LF)	Pressão (AEF)	ΔP (MPa)	ΔP (%)
INTRADOS	1,500	1.29	9.76	11.06	-1.30	-11.71
	2,250	1.16	10.83	12.00	-1.17	-9.72
	3,000	1.11	11.31	12.13	-0.82	-6.73
	3,750	1.09	11.59	12.29	-0.70	-5.72
	4,500	1.07	11.76	12.50	-0.74	-5.89
EXTRADOS	4,500	0.95	13.30	13.10	0.20	1.55
	3,750	0.94	13.44	13.16	0.28	2.11
	3,000	0.92	13.63	13.20	0.43	3.29
	2,250	0.90	13.95	13.40	0.55	4.08
	1,500	0.87	14.52	13.69	0.83	6.10

Fonte: Nepomuceno et al., 2019 (modificada)

Figura 17 – Fator de Ajuste via AEF e LC.



Fonte: Nepomuceno et al., 2019 (Modificada).

Uma proposta de ajustar o LC foi apresentada em Nepomuceno, Motta e Afonso (2020) que modelaram e analisaram 30 casos e, conseqüentemente, 66 modelos (6 retos e 60 curvos). Um novo fator chamado *Nepo Factor* (NF) foi elaborado baseado no LC e a Equação 22 foi formulada:

$$NF = LC \cdot \left(1 + \frac{\text{sen}(\alpha)}{4 \cdot \rho} \right) \quad (22)$$

Os resultados obtidos indicaram que o NF propôs uma aproximação melhor do que o LC para os casos avaliados, reduzindo os erros e sendo consistentemente conservador. Tais resultados podem ser vistos na Tabela 3 e na Figura 18.

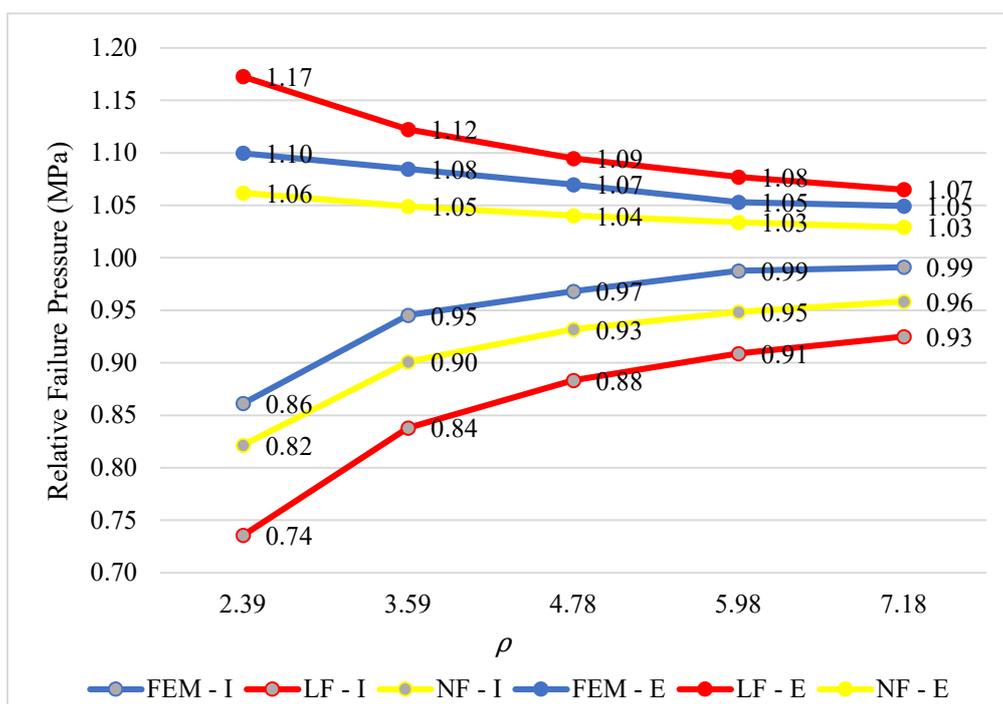
Tabela 3 – Pressões de falha dos 60 modelos

Parâmetro	Valor	PFR (MPa)	Método	PFC (MPa)									
				Intrados (I)					Extrados (E)				
				Rb	955	1432	1910	2387	2865	955	1432	1910	2387
Espessura da Parede	0.00585	10,29	MEF	9,36	9,92	9,79	10,00	10,04	11,29	11,04	11,04	10,79	10,79
			LF	7,98	8,86	9,25	9,48	9,62	11,88	11,41	11,15	10,99	10,88
			NF	8,79	9,43	9,70	9,84	9,92	10,89	10,75	10,66	10,60	10,56
	0.00685	14,8	MEF	12,78	13,74	14,00	14,32	14,11	16,20	15,74	15,52	15,45	15,18
			LF	11,49	12,75	13,31	13,63	13,84	17,09	16,41	16,04	15,81	15,65
			NF	12,65	13,57	13,95	14,15	14,28	15,66	15,46	15,34	15,25	15,19
Diâmetro Externo	0.3056	14,14	MEF	12,63	13,20	13,44	13,63	13,67	15,99	14,76	14,53	14,49	14,49
			LF	11,51	12,49	12,94	13,19	13,36	16,06	15,48	15,17	14,97	14,84
			NF	12,49	13,18	13,47	13,62	13,72	14,89	14,71	14,60	14,52	14,46
	0.4056	11,32	MEF	9,75	10,70	10,96	11,18	11,22	12,45	12,28	12,11	11,92	11,88

			LF	8,33	9,49	10,00	10,29	10,47	13,28	12,70	12,39	12,19	12,06
			NF	9,30	10,20	10,55	10,74	10,85	12,02	11,88	11,78	11,70	11,65
			MEF	11,25	11,79	12,00	12,52	12,25	13,84	13,57	13,34	13,15	13,20
Largura do Defeito	0,049	12,76	LF	9,90	10,99	11,48	11,75	11,93	14,73	14,15	13,83	13,63	13,49
			NF	10,90	11,70	12,03	12,20	12,31	13,50	13,33	13,22	13,15	13,09
			MEF	11,04	11,52	11,76	12,00	12,00	13,53	13,24	13,06	13,00	12,96
	0,059	12,53	LF	9,73	10,79	11,27	11,54	11,72	14,47	13,89	13,58	13,38	13,25
			NF	10,70	11,49	11,81	11,98	12,08	13,26	13,09	12,99	12,91	12,86

Fonte: Nepomuceno, Motta e Afonso, 2020 (modificada).

Figura 18 – Fator de ajuste em função do raio relativo



Fonte: Nepomuceno, Motta e Afonso, 2020.

Entretanto, a formulação proposta utiliza apenas o raio relativo (ρ) e o ângulo da posição do defeito (α) como variáveis, não levando em consideração que outros parâmetros geométricos do duto e do defeito possam interferir nos resultados. Sendo assim, na presente pesquisa realizou-se um estudo paramétrico para avaliar quais outros possíveis fatores influenciam a relação entre as PF dos dutos reto e curvo, com defeito.

5.1. Estudos paramétricos

Os parâmetros geométricos estudados foram o comprimento (l) e a largura (w) do defeito, a razão entre a profundidade do defeito e a espessura da parede (d/t), e a razão entre o diâmetro externo da seção transversal e a espessura da parede (D_e/t). Para tal, foi

atribuído um valor fixo para t , variando apenas d e D_e . É importante enfatizar que, foi mantido constante o raio relativo (ρ), assim o raio de curvatura (R_b) foi variado proporcionalmente ao D_e . Dessa forma, para cada variável avaliada, foram elaborados 10 casos, mantendo-se constantes todos os demais parâmetros, totalizando 40 casos e, conseqüentemente, 120 modelos. Os valores padrão de cada parâmetro e os seus respectivos intervalos de variação discreta estão a mostra na Tabela 4 abaixo:

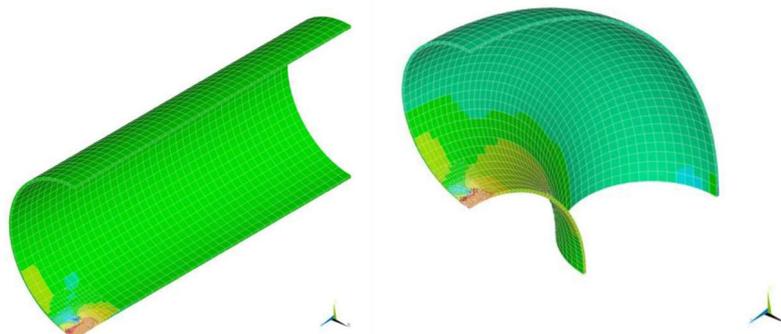
Tabela 4 – Dados Geométricos do Duto

Parâmetro	Valor Padrão	Variação
l	122 mm	± 30 mm
w	66.5 mm	± 12.5 mm
d/t	0.50	± 0.20
D_e/t	68	± 12

Fonte: O autor.

Vale ressaltar que D_e e d não foram considerados isoladamente pois essas grandezas só têm relevância ao serem avaliadas em função de t que, por sua vez, também só tem relevância quando avaliado em proporção a D_e e d . Isto posto, resultados de PF para dutos retos e curvos podem ser observados na Figura 19, onde pode se ver a distribuição de tensões de von Mises para as pressões finais das análises.

Figura 19 – Distribuição de tensões de von Mises para configurações reta e curva

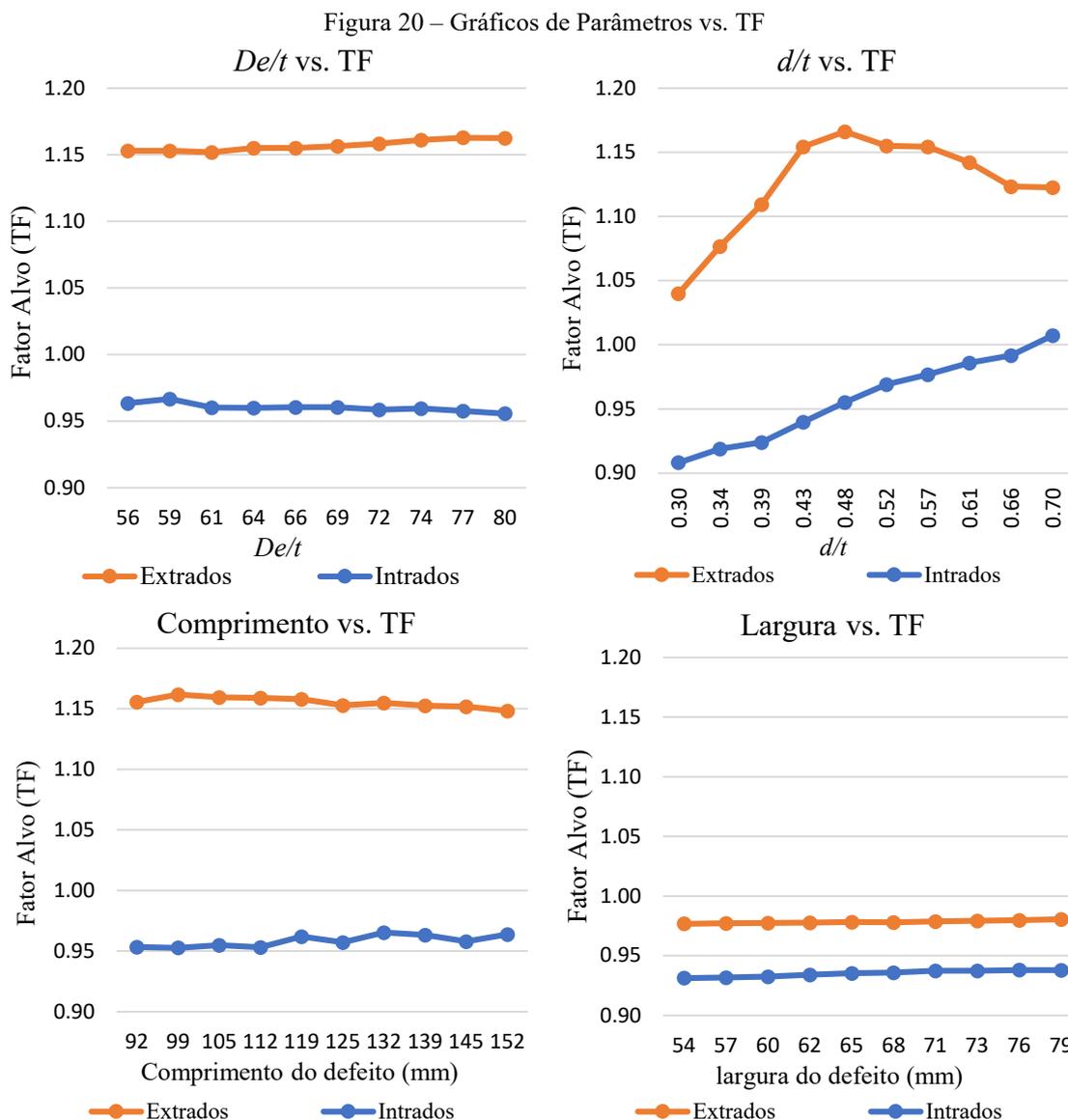


Fonte: Nepomuceno et al., 2019.

Obtidas as pressões de falha dos 40 casos, foi possível calcular o TF de acordo com a formulação

$$TF = \frac{PF_C}{PF_R} \quad (23)$$

onde PF_C é a pressão de falha do modelo curvo e PF_R é a pressão de falha do modelo reto. A Figura 20 apresenta gráficos de cada um dos parâmetros avaliados com relação aos TF calculados:



Fonte: O autor.

É possível observar um primeiro indício de que apenas o parâmetro profundidade do defeito é relevante para a previsão do TF, enquanto que, os demais parâmetros não apresentam relevância na previsão de TF. É notável também que o caso Intrados é mais importante visto que há perda de capacidade de carga do duto curvo em relação ao reto ($TF < 1$), enquanto que no caso Extrados aumento na capacidade de carga ($TF > 1$).

5.1.1.1. REGRESSÕES NUMÉRICAS

Para averiguar mais a fundo essas avaliações, mais 120 casos foram modelados e analisados, totalizando 360 modelos, variando aleatoriamente os mesmos parâmetros previamente abordados. Desses casos, 7 apresentaram erros no processo de modelagem e análise e, portanto, foram descartados. Com os resultados obtidos, foram feitas regressões lineares, visando averiguar quais parâmetros apresentariam relevância para dar continuidade às avaliações.

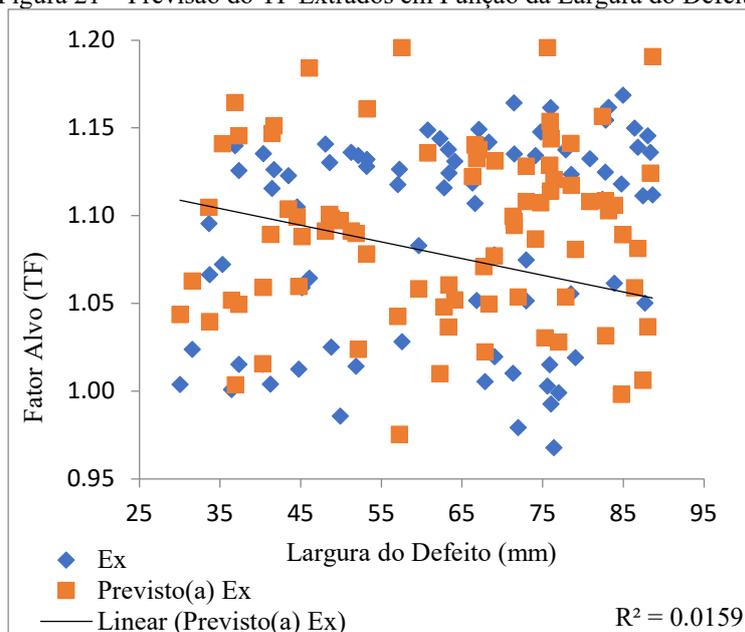
Com a regressão linear dos casos Extrados, observou-se que a largura do defeito deveria ser descartada, pois todos os testes de significância, o valor do coeficiente β previsto e o intervalo de confiança indicaram que há baixa relevância deste parâmetro na previsão do TF. A Tabela 5 e a Figura 21 mostram os resultados obtidos da regressão linear, de acordo com a Equação 5.

Tabela 5 – Resultados da Regressão Linear Extrados

Parâmetro	Coeficiente (β)	teste-t	valor-P	95% inferiores	95% superiores
Interseção	1.10	51.8	$3.6e^{-62}$	1.06	1.14
<i>De/t</i>	$7.9e^{-5}$	4.19	$7.3e^{-5}$	$4.1e^{-5}$	$1.2e^{-4}$
<i>d/t</i>	$-2.4e^{-2}$	-9.31	$2.7e^{-14}$	$-2.9e^{-2}$	$-1.9e^{-2}$
<i>l</i>	$-8.8e^{-4}$	-9.33	$2.4e^{-14}$	$-1.1e^{-3}$	$-6.9e^{-4}$
<i>w</i>	$-5.1e^{-5}$	-0.28	$7.8e^{-1}$	$-4.2e^{-4}$	$3.1e^{-4}$

Fonte: O autor.

Figura 21 – Previsão do TF Extrados em Função da Largura do Defeito



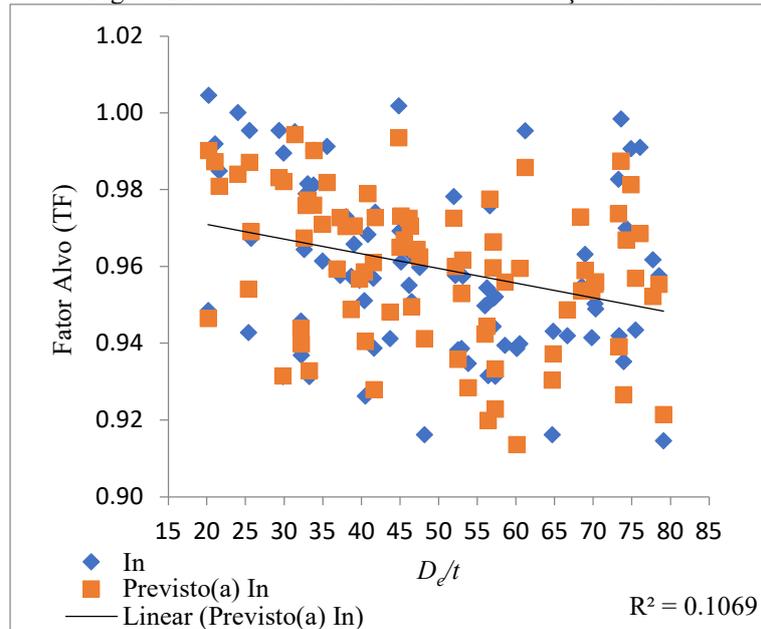
Fonte: O autor.

A regressão linear dos casos Intrados foi feita já descartando o parâmetro largura e, após a avaliação dos resultados, outro parâmetro foi descartado. A razão D_e/t apresentou indícios de baixa relevância, especialmente em contraste com os demais parâmetros. Por exemplo, o intervalo de confiança e o coeficiente β muito próximos de zero (na ordem de 10^{-5}), além do valor do R^2 bem abaixo de 50%. A Tabela 6 e a Figura 22 abaixo mostram os resultados obtidos:

Tabela 6 – Resultado da Regressão Linear Intrados

Parâmetro	Coefficiente (β)	teste-t	valor-P	95% inferiores	95% superiores
Interseção	1.13	150.10	$8.21e^{-99}$	1.11	1.14
D_e/t	$4.17e^{-5}$	5.64	$2.55e^{-7}$	$2.70e^{-5}$	$5.64e^{-5}$
d/t	$-1.57e^{-2}$	-15.61	$7.55e^{-26}$	$-1.77e^{-2}$	$-1.37e^{-2}$
l	$-2.35e^{-4}$	-6.32	$1.46e^{-8}$	$-3.09e^{-4}$	$-1.61e^{-4}$

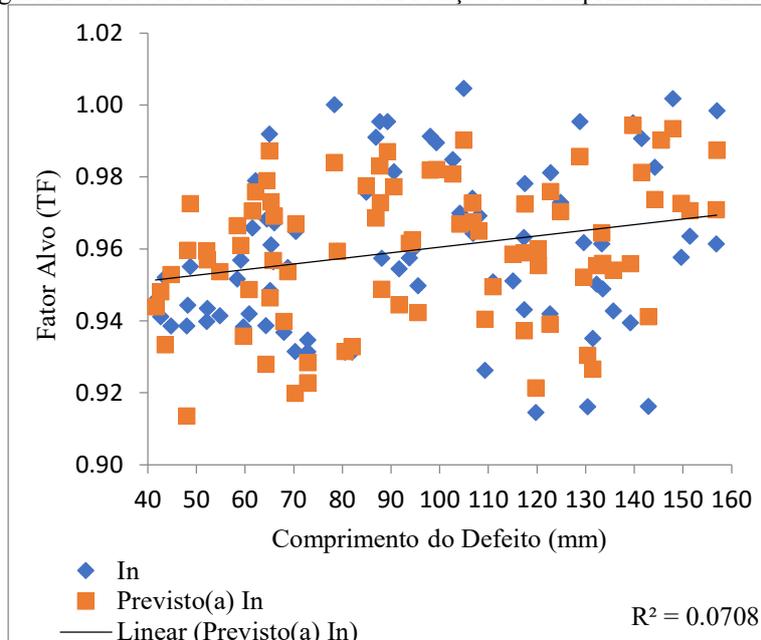
Fonte: O autor.

Figura 22 – Previsão do TF Intrados em Função de D_e/t 

Fonte: O autor.

O comprimento do defeito apresentou também alguns indícios de baixa relevância, especialmente o valor do R^2 que foi muito abaixo de 50% como mostrado na Figura 23.

Figura 23 – Previsão do TF Intrados em Função do Comprimento do Defeito

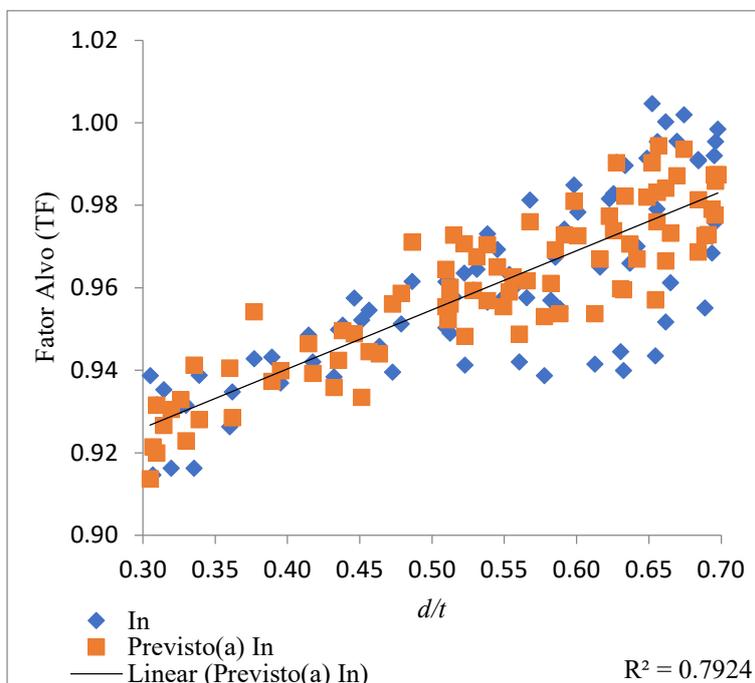


Fonte: O autor.

Já a razão d/t apresentou fortes indícios de relevância: coeficiente β , teste-t e intervalos mais distantes de zero dentre todas as variáveis avaliadas, valor-p

extremamente próximo de zero (na ordem de 10^{-26}) e R^2 bem acima de 50% como mostrado na Figura 24.

Figura 24 – Previsão do TF Intrados em Função da Profundidade do Defeito



Fonte: O Autor.

Foram realizadas também regressões logarítmicas, visando avaliar também a possibilidade de comportamento não linear entre as variáveis e o TF. Os resultados reforçaram o comportamento avaliado na situação linear, onde o parâmetro que apresentou mais relevância na previsão do TF foi a razão d/t . As Tabelas Tabela 7 e Tabela 8 mostram os dados obtidos:

Tabela 7 – Resultados da Regressão Logarítmica Extrados

Parâmetro	Coefficiente (β_i)	teste-t	valor-P	95% inferiores	95% superiores
Interseção	$4.90e^{-2}$	1.79	$7.66e^{-2}$	$-5.33e^{-3}$	$1.03e^{-1}$
d/t	$-1.10e^{-1}$	-8.25	$4.04e^{-13}$	$-1.36e^{-1}$	$-8.32e^{-2}$
l	$-3.36e^{-2}$	-7.61	$1.02e^{-11}$	$-4.23e^{-2}$	$-2.48e^{-2}$

Fonte: O autor.

Tabela 8 – Resultados da Regressão Logarítmica Intrados

Parâmetro	Coefficiente (β_i)	teste-t	valor-P	95% inferiores	95% superiores
Interseção	$3.64e^{-2}$	3.32	$1.22e^{-3}$	$1.47e^{-2}$	$5.81e^{-2}$

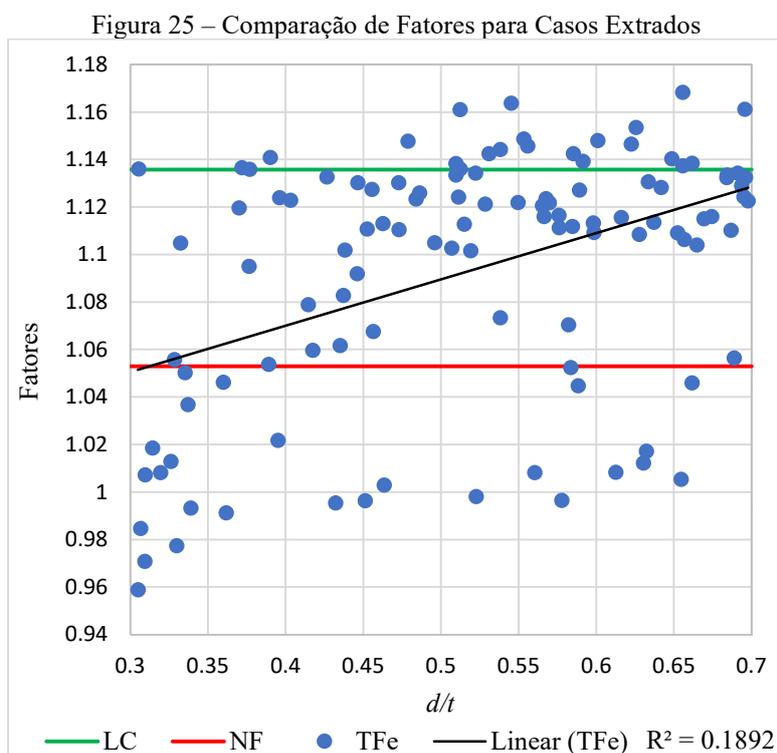
d/t	$-7.58e^{-2}$	-14.28	$1.05e^{-26}$	$-8.64e^{-2}$	$-6.53e^{-2}$
l	$-1.40e^{-3}$	-0.80	$4.27e^{-1}$	$-4.90e^{-3}$	$2.09e^{-3}$

Fonte: O autor.

Assim, diante das avaliações realizadas, foi decidido que o único parâmetro ausente no LC a ser incluído nas novas propostas de formulação para a previsão do TF seria a razão d/t .

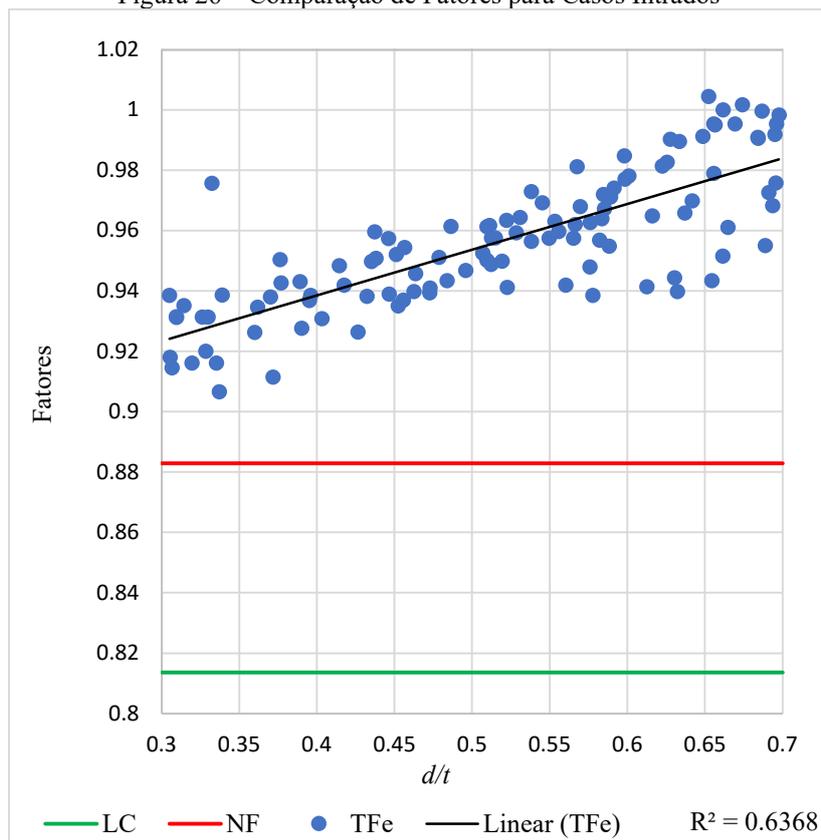
5.2. Avaliação do LC e da proposta inicial do NF

Devido às variáveis utilizadas na formulação do LC e do NF, nos estudos paramétricos realizados, seus valores são constantes para todos os casos analisados (não há variação de ρ e α). As Figura 25 e Figura 26 contêm gráficos comparando LC, NF e TF em função da razão d/t para os casos Extrados e Intrados, respectivamente.



Fonte: O Autor.

Figura 26 – Comparação de Fatores para Casos Intrados



Fonte: O Autor.

Em ambos os casos, nem o LC nem o NF representam TF de forma aceitável, especialmente por serem constantes em função da razão d/t . É possível observar, ao comparar as Figura 25 e Figura 26, que os casos Intrados, com R^2 da aproximação igual a 0.64, apresentam uma relação mais clara entre o TF e a razão d/t do que os casos Extrados, com R^2 da aproximação igual a 0.19. É importante também ressaltar, mais uma vez, que fica evidenciado que nos casos Intrados ocorre majoritariamente perda de capacidade de carga ($TF < 1$), sendo mais perigosos e importantes de serem previstos do que os Extrados, nos quais ocorre majoritariamente aumento na capacidade de carga ($TF > 1$). Portanto, foi necessário modelar e analisar mais casos Intrados, cujos parâmetros avaliados foram a razão d/t e o raio relativo (ρ), com o objetivo propor e otimizar diferentes formulações baseado nos dados obtidos.

5.3. Otimização e novas propostas

Com o objetivo de obter formulações em função de ρ e da razão d/t , foram modelados e analisados 100 casos e, conseqüentemente, 200 modelos, com as variáveis citadas discretizadas, com intervalos de variação de 1 a 9 e de 0.3 a 0.7, respectivamente.

Os dados obtidos das análises desses casos foram então utilizados para a otimização dos coeficientes k_i de 5 novas propostas de modelos. As duas primeiras propostas se mantiveram como uma alteração do LC, descritas, respectivamente, nas Equações 24 e 25:

$$NF_1 = LC \cdot \left(1 + k_1 \cdot \rho + k_2 \cdot \frac{d}{t} \right) \quad (24)$$

$$NF_2 = LC \cdot \left(1 + k_1 \cdot \frac{1}{\rho} + k_2 \cdot \frac{d}{t} \right) \quad (25)$$

De imediato se encontrou um problema. Dentre os modelos avaliados, alguns tinham ρ igual a 1, fazendo com que LC fosse igual a zero. Os erros calculados após cada otimização estão à mostra na Tabela 9.

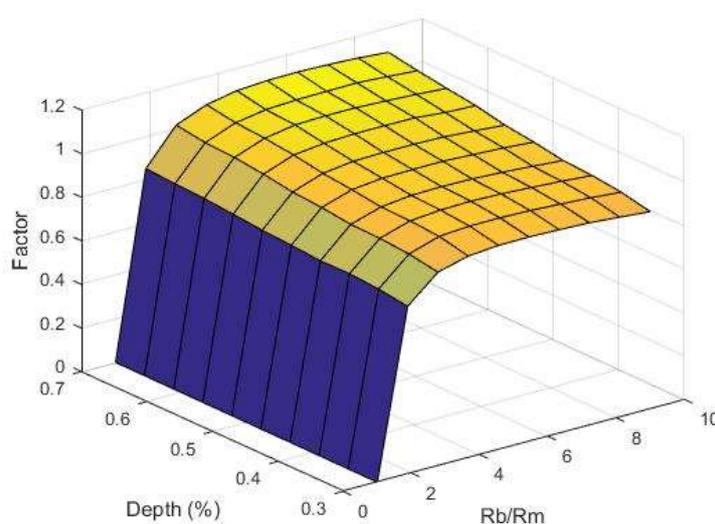
Tabela 9 – Resultados das Otimizações das Propostas 1 e 2

PROPOSTA	k1	k2	MSE	RMSE	MAPE
1	-0.019	0.550	$29.3e^{-3}$	$171.3e^{-3}$	15.6%
2	0.849	0.006	$28.4e^{-3}$	$168.5e^{-3}$	11.6%

Fonte: O autor.

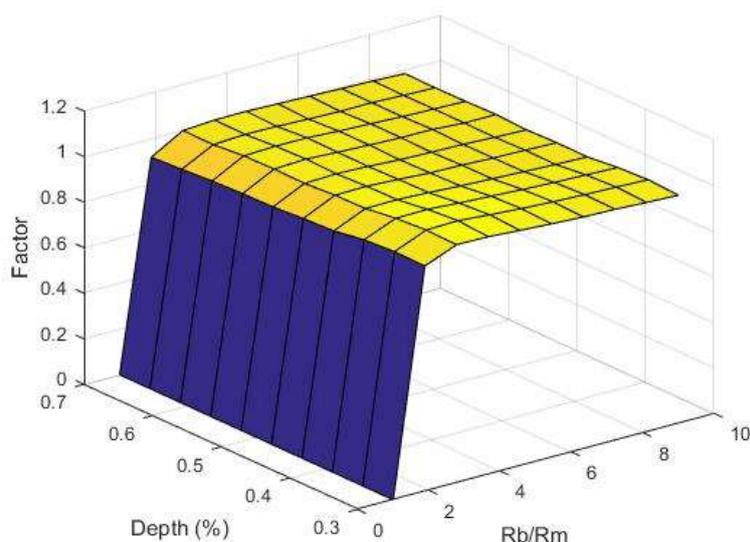
As Figura 27 e Figura 28 apresentam as razões entre as propostas 1 e 2, e o TF que, idealmente, deveriam ser iguais ou próximas a 1, implicando que essas propostas representariam bem o TF.

Figura 27 – Razão NF1/TF



Fonte: O autor

Figura 28 – Razão NF2/TF



Fonte: O autor.

É notável que NF_1 e NF_2 não são adequadas para a previsão do TF, visto que ambas superfícies falham drasticamente em prever TF para ρ igual a 1. Isto posto, duas novas propostas foram testadas, descartando o uso do LC na formulação, sendo apenas a parte linear das propostas anteriores, como descrito nas Equações 26 e 27:

$$NF_3 = 1 + k_1 \cdot \rho + k_2 \cdot \frac{d}{t} \quad (26)$$

$$NF_4 = 1 + k_1 \cdot \frac{1}{\rho} + k_2 \cdot \frac{d}{t} \quad (27)$$

Os resultados obtidos nas otimizações de NF_3 e NF_4 foram muito superiores aos de NF_1 e NF_2 . Na Tabela 10 Tabela 10 – Resultados de otimizações das propostas de 1 a 4.é visível a redução drástica do MSE, do RMSE e do MAPE. Além disso, pelo fato de não incluir o LC na formulação, ambas as propostas têm valor definido para ρ igual a 1.

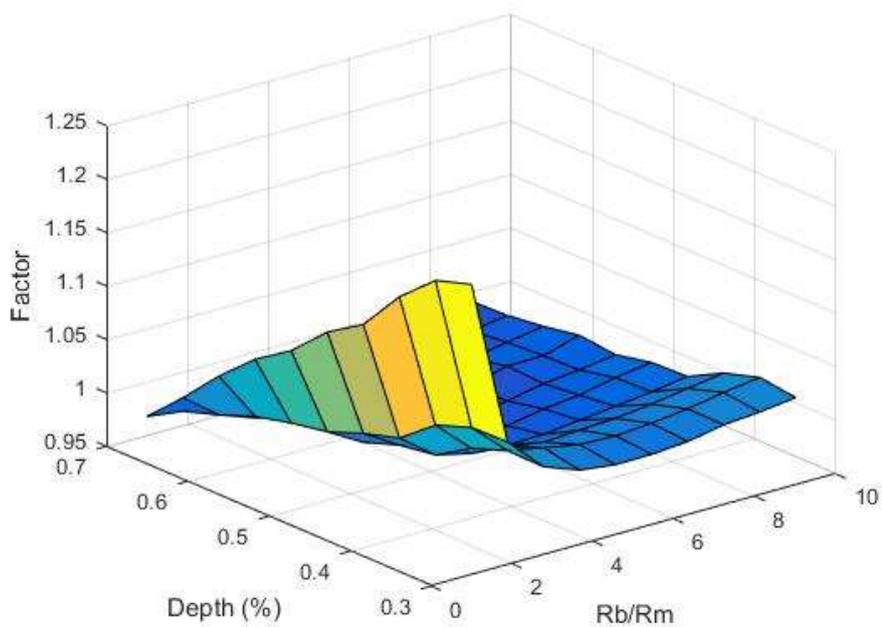
Tabela 10 – Resultados de otimizações das propostas de 1 a 4.

PROPOSTA	k1	k2	MSE	RMSE	MAPE
1	-0.019	0.550	$29.3e^{-3}$	$171.3e^{-3}$	15.6%
2	0.849	0.006	$28.4e^{-3}$	$168.5e^{-3}$	11.6%
3	0.009	-0.059	$4.1e^{-3}$	$64.3e^{-3}$	2.8%
4	-0.169	0.124	$1.7e^{-3}$	$40.7e^{-3}$	1.1%

Fonte: O autor.

A NF_3 ainda se mostrou insuficiente para a previsão do TF pois, apesar de apresentar valores próximos de 1, a sua razão se distancia bastante de 1 em diversos pontos da superfície, como exposto na Figura 29:

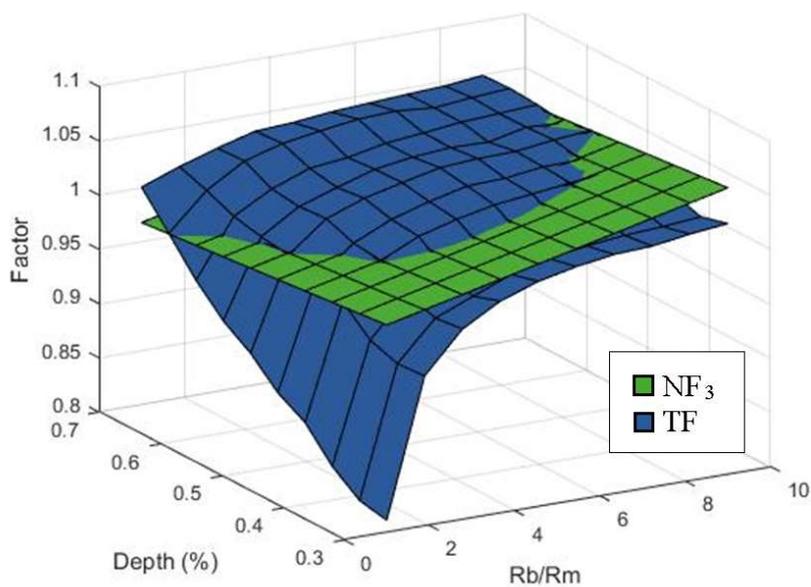
Figura 29 – Razão NF_3/TF



Fonte: O Autor.

Essa inadequação fica ainda mais evidente na Figura 30, que sobrepõe as superfícies de NF_3 (verde) e de TF (azul).

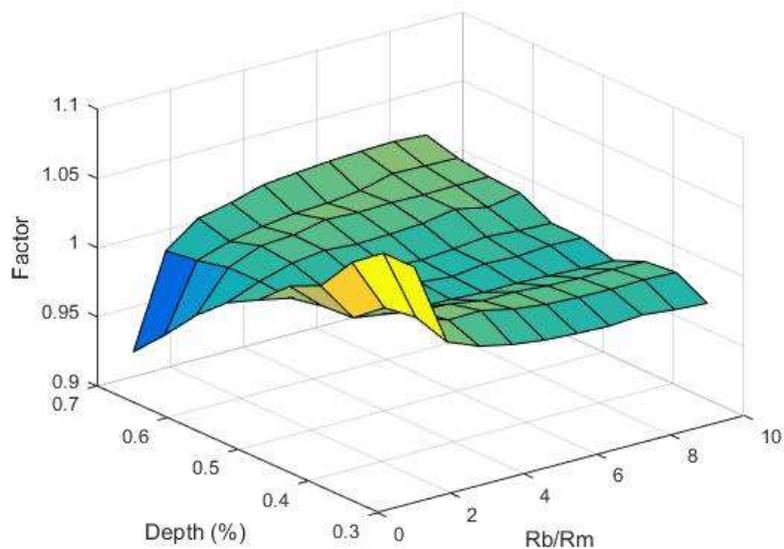
Figura 30 – Sobreposição de NF3 e TF



Fonte: O Autor.

Já a NF₄ apresentou uma aproximação mais próxima do desejado, uma vez que sua razão por TF atingiu, consistentemente, valores mais próximos de 1, com mínimo de 0.92 e máximo de 1.07, como mostrado na Figura 31:

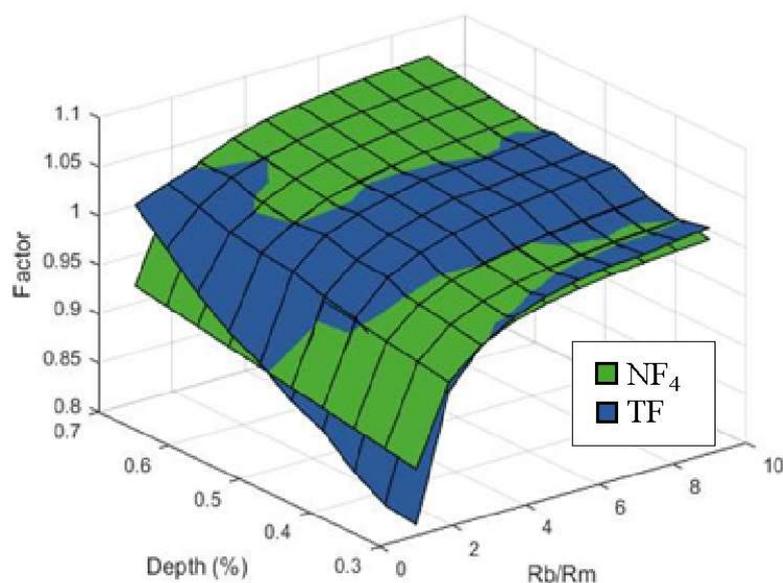
Figura 31 – Razão NF4/TF



Fonte: O Autor.

Em contraste com NF₃, NF₄ apresenta um comportamento não-linear em relação ao ρ , o que melhorou sua aproximação. Apesar disso, ainda há pontos cujas estimativas distam muito de TF, sendo o erro máximo de 8%. A Figura 32 evidencia esses fatos:

Figura 32 – Sobreposição de NF₄ e TF



Fonte: O Autor.

Baseado nos resultados obtidos, observou-se uma possível correlação entre d/t e ρ na previsão do TF, dando origem à proposta 5 descrita na Equação 28 abaixo:

$$NF_5 = 1 + k_1 \cdot \rho + k_2 \cdot \frac{d}{t} + k_3 \cdot \rho \cdot \frac{d}{t} \quad (28)$$

Essa formulação propõe reduzir o erro na previsão do TF nos pontos onde ρ for igual a 1. Observou-se uma redução significativa do erro máximo de 8% para 4%. No geral, os resultados obtidos foram bastante satisfatórios, uma vez que o MSE, RMSE e o MAPE atingiram os menores valores dentre as propostas, como pode ser observado na Tabela 11.

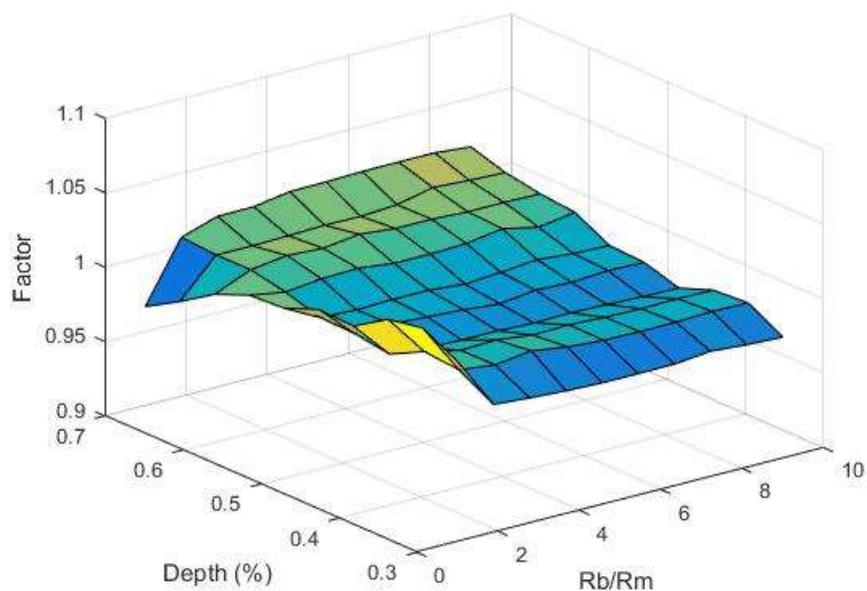
Tabela 11 – Resultado de otimização de propostas de 1 a 5

PROPOSTA	k1	k2	k3	MSE	RMSE	MAPE
1	-0.019	0.550	-	29.3e ⁻³	171.3e ⁻³	15.6%
2	0.849	0.006	-	28.4e ⁻³	168.5e ⁻³	11.6%
3	0.009	-0.059	-	4.1e ⁻³	64.3e ⁻³	2.8%
4	-0.169	0.124	-	1.7e ⁻³	40.7e ⁻³	1.1%
5	-0.275	0.114	0.232	1.2e ⁻³	34.5e ⁻³	1.0%

Fonte: O autor.

Além disso, a razão NF/TF se manteve consistentemente próxima de 1, como mostrado na Figura 33.

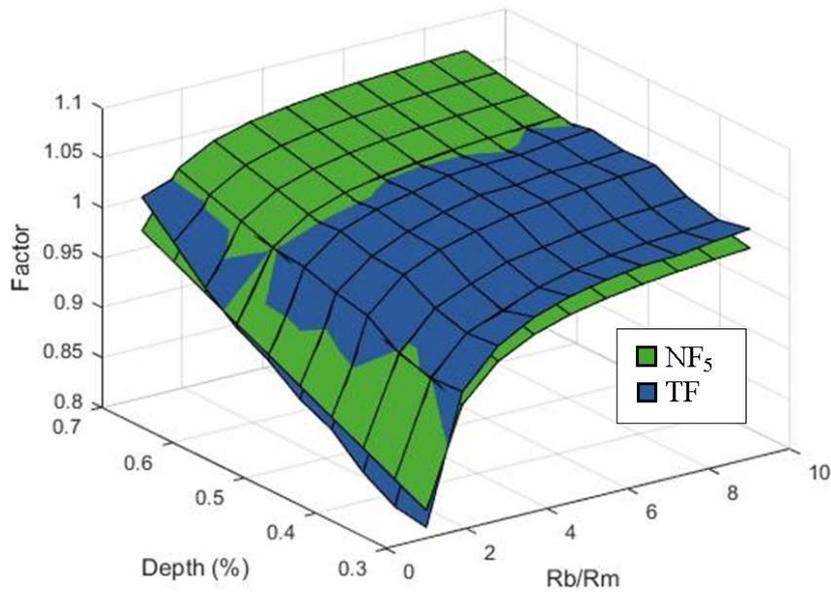
Figura 33 – Razão NF5/TF



Fonte: O Autor.

A correção feita se torna ainda mais evidente ao comparar as Figura 32 e Figura 34, onde pode ser observada a diferença da precisão da estimativa quando $\rho = 1$.

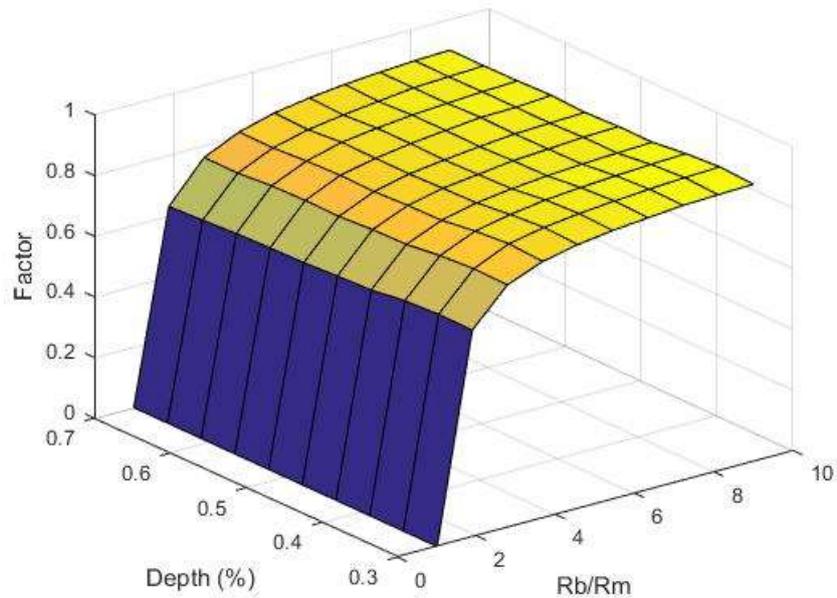
Figura 34 – Sobreposição de NF5 e TF



Fonte: O Autor.

Em comparação com as cinco propostas, o LC apresentou erros bastante elevados, tendo $MSE = 3.3$, $RMSE = 1.8$ e $MAPE = 20\%$, além de sua razão por TF que destoou bastante do valor 1 como mostra a Figura 35.

Figura 35 – Razão LC/TF



Fonte: O Autor.

Assim, considerando a avaliação dos resultados acima, propõe-se finalmente um modelo referente à proposta 5 que pode ser descrito como:

$$NF_{\text{FINAL}} = 1 - 0.275\rho + 0.114\frac{d}{t} + 0.232\frac{\rho d}{t} \quad (29)$$

6. CONCLUSÃO

Levando em conta o objetivo de simular dutos curvos com defeitos de corrosão via MEF e comparar seus resultados com os obtidos via LC para então propor uma nova formulação, pode-se afirmar que os resultados foram bastante satisfatórios. Ao todo, foram avaliados quatro parâmetros ausentes no LC, dos quais apenas um apresentou altos índices de relevância para a previsão do TF. Os demais não apresentaram evidências suficientes para serem considerados e, portanto, foram descartados das propostas.

As modelagens e análises em larga escala foram possibilitadas em virtude da automação do procedimento realizado por Nepomuceno *et al.* (2019). O algoritmo se mostrou funcional e prático, viabilizando múltiplos casos discretizados ou aleatórios, com parâmetros limitados a faixas pré-determinadas.

Visando produzir uma formulação adaptada do LC, NF_1 e NF_2 foram propostas incluindo a razão d/t à formulação original do LC, mas se mostraram ineficazes e limitadas com relação ao raio relativo (ρ). Isto posto, a formulação do LC foi descartada das propostas seguintes. A partir dessa decisão, as propostas tomaram um rumo mais promissor, com grande redução nos MSE, RMSE e MAPE, chegando a NF_{FINAL} , cujos resultados são satisfatórios, que apresentou os melhores índices e os menores erros. É importante ressaltar que o LC ainda é uma formulação mais branda, abordando dutos curvos com defeitos internos em quaisquer posições radiais da seção transversal, sendo $\rho \neq 1$ sua única limitação. Isto posto, ainda há a necessidade de mais estudos para elaborações mais complexas e precisas de formulações para a previsão do TF.

Assim sendo, no geral, foi possível observar nos resultados uma relação entre as pressões de falha de dutos curvos intrados e dutos retos em função da profundidade do defeito e do raio relativo. Tal observação promove estudos aprofundando qualitativa e quantitativamente essa relação, além de ampliar o campo de avaliação para mais variáveis de projeto, incluindo parâmetros físicos, condições de contorno adversas, condições de carregamento, entre outros. Dessa forma, este trabalho mostrou que há bastante espaço para crescimento nos estudos dessa área.

Resumidamente, conclui-se que:

- Baseado nos resultados, é notável uma relação entre o TF e os parâmetros d/t e ρ , a qual foi examinada até a formulação de NF_{FINAL} ;
- O algoritmo de modelagem e análise automática funcionou devidamente e possibilitou a realização desta pesquisa;

- Dentre os parâmetros estudados, a razão d/t foi a única a apresentar indícios e evidências de forte relação com a previsão do TF;
- O LC foi descartado como parte da formulação, especialmente por não ser definido para ρ igual a 1;
- O NF_{FINAL} apresentou resultados amplamente superiores aos obtidos via LC, demonstrando ser, especificamente para os casos avaliados, uma alternativa mais precisa e acurada para a previsão do TF;
- Devido à sua especificidade de aplicação, o LC ainda se mantém como a alternativa mais versátil, podendo ser aplicado para dutos curvos com defeitos em quaisquer posições.

Com a realização deste trabalho, espera-se o desenvolvimento de novos estudos e projetos:

- Investigação de dutos curvos com defeitos externos de corrosão;
- Avaliação e validação da eficácia de NF_{FINAL} para casos sob circunstâncias diferentes das avaliadas neste trabalho;
- Investigação paramétrica da previsão do TF em função de parâmetros físicos, diferentes condições de carregamento e/ou condições de contorno;
- Projetos de melhoria no processo de modelagem de dutos curvo, visando a minimização da imprecisão presente nas atuais aproximações;
- Pesquisa de dutos encurvados a frio tal que seja investigada interação da geometria curva do duto com a ocorrência de enrugamento e ovalização, e suas devidas consequências na previsão do TF;
- Estudos de confiabilidade referentes à previsão do TF;
- Verificação experimental de dutos curvos com defeitos.

Vale ressaltar, considerando a limitação do tempo disponível para um trabalho acadêmico e das condições de trabalho durante uma pandemia, que esta temática ainda se encontra nos estágios iniciais de seu desenvolvimento, o que indubitavelmente será dado a devida continuidade pelo grupo de pesquisa PadMec. Esta pesquisa colabora fornecendo novos dados para eventuais estudos como os citados anteriormente.

É importante ressaltar que, apesar do PIPEFLAW gerar modelos de dutos retos de acordo com a situação real, a metodologia aplicada e conhecida até o momento para a produção de modelos curvos compreende um processo de aproximação da realidade que

ainda carece melhorias. Assim sendo, reforça-se ainda mais a necessidade e relevância da elaboração de uma modelagem mais precisa.

Como mestrando em Engenharia Civil, avalio o aprendizado obtido nesta dissertação e como aluno do grupo de pesquisa PadMec como uma oportunidade de desenvolvimento pessoal profissional, aprimorando amplamente uma perspectiva sobre o assunto, tal como uma motivação para o crescimento da carreira acadêmica que almejo.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, E. Q. de *et al.* Finite element modeling of the failure behavior of pipelines containing interacting corrosion defects. **International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering**. 2006. p. 315-325.

ANSYS INC. **ANSYS Mechanical APDL Structural Analysis Guide**. Canonsburg. 2019.

AP NEWS. **Kentucky pipeline blast leaves 1 dead, 5 injured**. Junction City. 1 ago. 2019. Website. Disponível em: <https://apnews.com/article/evacuations-fires-us-news-ap-top-news-explosions-1ee215d58e7e49838249589d91022da6>. Acesso em 18 jan. 2023.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **ASME B31G: Manual for Determining the Remaining Strength of Corroded Pipelines: A Supplement to ASME B31G Code for Pressure Piping**. Nova York: ASME, 1991.

AZIMIAN, M.; BART, H.-J. Investigation of Hydroabrasion in Slurry Pipeline Elbows and T-junctions. **Journal of Energy and Power Engineering**, v. 8, p. 65–78. 2014.

AZIMIAN, M.; BART, H.-J. Erosion investigations by means of a centrifugal accelerator erosion tester. **Wear**, v. 328-329, p. 249–256. 2015.

BATHE, K. J. **Finite Element Procedures**. Nova Jersey: Prentice-Hall Inc., 1996.

BEDAIRI, B. *et al.* Failure prediction for Crack-in-Corrosion defects in natural gas transmission pipelines. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**. v. 96–97, p. 90–99. 1 ago. 2012.

BLANCHARD, D. J. **Erosion of metal pipe by solid particles entrained in water**. 1981. Tese (Mestrado em Ciências) – Massachusetts Institute of Technology. Cambridge, 1981.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS 7910+A1: Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures**. Londres. British Standards Institution, p.48, 2015.

BUBENIK, T. A.; ROSENFELD, M. J. **Assessing the strength of corroded elbows. Topical report**. American Gas Association, Inc., Arlington, VA (United States). Pipeline Research Committee, 1993.

CABRAL, H. L. D. **Desenvolvimento de ferramentas computacionais para modelagem e análise automática de defeitos de corrosão em dutos**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2007.

CABRAL, H.L.D *et al.* The development of a computational tool for generation of high quality FE models of pipelines with corrosion defects. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, vol.39, p.3137-3150, 2017.

CALLADINE, C. **Limit analysis of curved tubes**. *Journal of Mechanical Engineering Science*, p. 85-87, 1974.

CBIE. **Quantos quilômetros de dutos temos no Brasil hoje?**. Rio de Janeiro. 26 mar. 2019. Website. Disponível em: <https://cbie.com.br/quantos-quilometros-de-dutos-temos-no-brasil-hoje/>. Acesso em 18 jan. 2023.

CENTRAL INTELLIGENCE AGENCY. *The World Factbook 2010*. Disponível em: <https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/html>. Acesso em: 21 jan. 2023.

CENTRAL INTELLIGENCE AGENCY. *The World Factbook 2022*. Disponível em: <https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/html>. Acesso em: 21 jan. 2023.

CHEN, J. *et al.* Erosion prediction of liquid-particle two-phase flow in pipeline elbows via CFD-DEM coupling method. **Powder Technology**, v. 275, p. 182–187, 1 maio. 2015.

CHEN, X.; MCLAURY, B. S.; SHIRAZI, S. A. Numerical and experimental investigation of the relative erosion severity between plugged tees and elbows in dilute gas/solid two-phase flow. **Wear**, v. 261, n. 7-8, p. 715-729, 2006.

CHOI, K.-H. *et al.* Comparison of computational and analytical methods for evaluation of failure pressure of subsea pipelines containing internal and external corrosions. **Journal of Marine Science and Technology**, v. 21, n. 3, p. 369–384, 15 set. 2016.

CHOUCHAOU, B. A.; PICK, R. J.; YOST, D. B. Burst pressure predictions of line pipe containing single corrosion pits using the finite element method. **Proceedings of The International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering**. v. 5, p. 203-210, 1992.

CRONIN, D. S.; PICK, R. J. Prediction of the failure pressure for complex corrosion defects. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, v. 79, n. 4, p. 279–287, 1 abr. 2002.

CTV NEWS. **Oil company facing scrutiny after butane leak in Saint John**. 17 jan. 2018. Website. Disponível em: <https://atlantic.ctvnews.ca/oil-company-facing-scrutiny-after-butane-leak-in-saint-john-1.3764293>. Acesso em: 18 jan. 2023.

DET NORSKE VERITAS. **Recommended Practice DNV RP-F101 Corroded Pipelines**, Det Norske Veritas, Noruega, 2015.

FEKETE, G.; VARGA, L. The effect of the width to length ratios of corrosion defects on the burst pressures of transmission pipelines. **Engineering Failure Analysis**, v. 21, p. 21–30, 1 abr. 2012.

FERREIRA, A.D.M.; MOTTA, R.S.; AFONSO, S.M.B.; WILLMERSDORF, R.B.; LYRA, P.R.M.; ANDRADE, E.Q.; CUNHA, D.J.S. Stochastic assessment of burst

pressure for corroded pipelines. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, vol.43, p.193, 2021.

FISH, J.; BELYTSCHKO, T. **Um Primeiro Curso em Elementos Finitos**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S. A. 2009.

FU, B.; KIRKWOOD, M. G. **Predicting failure pressure of internally corroded linepipe using the finite element method**. CONF-950695. American Society of Mechanical Engineers. Nova York, 1995.

GONG, S. *et al.* Numerical modelling on dynamic behaviour of deepwater S-lay pipeline. **Ocean Engineering**, v. 88, p. 393–408, 15 set. 2014.

KHALAJESTANI, M. K. *et al.* Predicting the limit pressure capacity of pipe elbows containing single defects. **Applied Ocean Research**, v. 53, p. 15–22, 1 out. 2015.

LARIN, O. O.; POTOPALSKA, K. E. Estimation of Residual Strength of Pipeline's Elbow with Volumetric Corrosion Defect, Which Is Developing. **Вип**, v. 3, n. 53, 2017.

LEE, G. H. *et al.* Burst strength behaviour of an aging subsea gas pipeline elbow in different external and internal corrosion-damaged positions. **International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering**, v. 7, n. 3, p. 435–451, 2015.

LEE, K.-H. *et al.* Effect of bend angle on plastic load of pipe bends. p. 322–330, 2006.

MAHMOODIAN, M.; LI, C. Q. Failure assessment and safe life prediction of corroded oil and gas pipelines. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 151, p. 434–438, 2017.

MICHAEL, T.; VEERAPPAN, A.; SHANMUGAM, S. Effect of cross section on collapse load in pipe bends subjected to in-plane closing moment. **International Journal of Engineering, Science and Technology**, v. 3, n. 6, p. 247–256, 1 jan. 2011.

MO, L. *et al.* Erosion mechanism and sensitivity parameter analysis of an innovative shaped curved pipeline. **Mechanika**, v. 26, n. 6, p. 511–517, 7 dez. 2020.

MONTGOMERY, D. C.; PECK, E. A.; VINING, G. G. **Introduction to Linear Regression Analysis**. 5. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. 2012.

MOTTA, R. S. *et al.* Automatic modeling and analysis of pipelines with colonies of corrosion defects. **Mecánica Computacional**, Buenos Aires, v. 29, p. 7871-7890, nov. 2010.

MOTTA, R. S. *et al.* Comparative studies for failure pressure prediction of corroded pipelines. **Engineering Failure Analysis**. v. 81 p. 178-192. 2017.

MOTTA, R.S.; LEAL, C.F.; FERREIRA, A.D.M.; AFONSO, S.M.B.; LYRA, P.R.M.; WILLMERSDORF, R.B. Reliability analysis of ovalized deep-water pipelines with corrosion defects. **Marine Structures**, vol.77, p.102969, 2021.

MUTHANNA *et al.* Assessment of corroded API 5L X52 pipe elbow using a modified failure assessment diagram. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, v. 190, p. 104291, 2021.

NEPOMUCENO, J. L. A. **A influência da curvatura na resistência mecânica de dutos curvos a quente**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de Pernambuco, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.

NEPOMUCENO, J. L. A. *et al.* Assessing the Influence of Curvature on the Remaining Strength of Curve Corroded Pipelines. **Rio Pipeline**. 2019.

NEPOMUCENO, J. L. A.; MOTTA, R. S.; AFONSO, S. M. B. New Equation for Failure Pressure Estimation on Curved Pipelines. **Ibero-Latin American Congress on Computational Methods in Engineering**, Foz do Iguaçu, v. 41. 2020.

NETTO, T. A.; FERRAZ, U. S.; ESTEFEN, S. F. The effect of corrosion defects on the burst pressure of pipelines. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 61, n. 8, p. 1185–1204. 1 ago. 2005. Acesso em: 28 maio 2023.

OH, C. K. *et al.* Ductile failure analysis of API X65 pipes with notch-type defects using a local fracture criterion. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, v. 84, n. 8, p. 512–525. 1 ago. 2007. Acesso em: 28 maio 2023

OLIVEIRA, M. F. D.; LOURES, P. V. M. V. **Análise do comportamento de fluido escoando através de dutos curvos em formato S com diferentes geometrias**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Petróleo) – Escola de Engenharia, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2016.

PATRAN. **Help System: User's Guide, Reference Manual, PCL Manuals, PCL Reference**. 2005. Disponível em <http://www.mscsoftware.com>.

PETROBRAS. **Pré-Sal**. Disponível em: <https://petrobras.com.br/pt/nossas-atividades/areas-de-atuacao/exploracao-e-producao-de-petroleo-e-gas/pre-sal/>. Acesso em: 17 jan. 2023.

PIMENTEL, J.T. *et al.* New procedure of automatic modeling of pipelines with realistic shaped corrosion defects. **Engineering Structures**, vol.221, p.111030, 2020.

PYTHON. **Python Documentation Release 2.4.1: Tutorial and Library Reference Manual**. 2005.

RIAGUSOFF, I. I. T. *et al.* Modeling pipe cold bending: a finite element approach. In: **ANSYS South American Conference & ESSS Users Meeting**, Atibaia, 2010.

RODRIGUES, A.S.L. *et al.* Automatic axisymmetric modelling and finite element analysis of corroded pipelines. In: **Proceedings of the Rio Pipeline Conference & Exhibition**, Rio de Janeiro, RJ, pp. 1-9, 2017.

ROBERTSON, A.; LI, H.; MACKENZIE, D. Plastic collapse of pipe bends under combined internal pressure and in-plane bending. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, Glasgow, v. 82, p. 407-416, 2005.

ROH, S. G. Navigation Inside Pipelines with Differential Drive Inpipe Robot. **International Conference on Robotics and Automation**. Seoul. 2002.

SHALABY, M.; YOUNAN, M. **Limit Loads for Pipe Elbows Subjected to In-Plane Opening Moments and Internal Pressure**. ASME J. Pressure Vessel Technol., v. 121, p.17-23, 1998.

SHOU, K. J.; HUANG, C. C. Numerical analysis of straight and curved underground pipeline performance after rehabilitation by cured-in-place method. **Underground Space**. Taichung, n. 5, p. 30–42. 2020.

SHUAI, Y. et al. Assessment by finite element modelling of the mechano-electrochemical interaction at corrosion defect on elbows of oil/gas pipelines. **Ocean Engineering**, v. 234. 2021.

SOARES, E.; *et al.* Structural integrity analysis of pipelines with interacting corrosion defects by Multiphysics modeling. **Engineering Failure Analysis**, vol.97, p.91-102, 2019.

SOUSA, P.F.S.; AFONSO, S.M.B.; WILLMERSDORF, R.B. Reliability-based preventive maintenance planning for corroded pipelines using a RBF surrogate model. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, vol.43, p.521, 2021.

TEIXEIRA, A. P. et al. Reliability of pipelines with corrosion defects. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, v. 85, n. 4, p. 228–237. 2008.

THE MATHWORKS, INC. **MATLAB and Statistics Toolbox Release 2016b**. Natick, Massachusetts, Estados Unidos, 2016.

TIMASHEV, S.; BUSHINSKAYA, A. **Diagnostics and reliability of pipeline systems**. Suíça: Springer, 2016.

VIANA, A. S. Modelagem e Simulação em Tubos Curvos Usando Dinâmica de Fluidos Computacional. **Encontro de Iniciação Científica**. Taubaté. n. 17. 2012.

WU, Z. *et al.* Dynamic performance of a long curved river-crossing pipeline system with multiple floating bodies during immersion process. **Ocean Engineering**, v. 234. 2021.

WYSZOMIRSKA, L. F. B. **Cargas de colapso em dutos submetidos a momento fletor e pressão interna**. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

XU, W. Z. et al. Corroded pipeline failure analysis using artificial neural network scheme. **Advances in Engineering Software**. v. 112, p. 255–266. 2017.

YAN, H. *et al.* Research on passing ability and climbing performance of pipeline plugging robots in curved pipelines. **IEEE Access**. v. 8, p. 173666–173680. 2020.

YOSHIZAKI, K.; O'ROURKE, T. D.; HAMADA, M. Large Scale Experiments Of Buried Steel Pipelines With Elbows Subjected To Permanent Ground Deformation. **Structural Eng./Earthquake Eng.** v. 20, n. 1. p. 1-11. 2003.

ZIENKIEWICZ, O. C.; TAYLOR, R.L. **The finite element method**. 5. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, v. 1. 2000.