



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO ACADÊMICO DO AGRESTE
NÚCLEO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL**

MAYLON DIEFERSON SILVA DE SOBRAL

**OTIMIZAÇÃO DE DUTOS SUJEITOS À
CORROSÃO, BASEADO EM CONFIABILIDADE**

Caruaru

2019

MAYLON DIERFERSON SILVA DE SOBRAL

OTIMIZAÇÃO DE DUTOS SUJEITOS À CORROSÃO, BASEADO EM CONFIABILIDADE

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Pernambuco, Campus Agreste, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental.

Área de concentração: Estruturas e Materiais

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Giuliana Furtado Franca Bono

Caruaru

2019

Catálogo na fonte:
Bibliotecária – Paula Silva - CRB/4 – 1223

S677o Sobral, Maylon Dieferson Silva de.
Otimização de dutos sujeitos à corrosão, baseado em confiabilidade. / Maylon Dieferson Silva de Sobral. – 2019.
137 f.: il.; 30 cm.

Orientadora: Giuliana Furtado Franca Bono.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, CAA, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, 2019.
Inclui Referências.

1. Engenharia de estruturas (Pernambuco). 2. Confiabilidade (Engenharia) (Pernambuco). 3. Otimização estrutural (Pernambuco). 4. Corrosão e anticorrosivos (Pernambuco). 5. Geometria projetiva. 6. Gasodutos (Pernambuco). I. Bono, Giuliana Furtado Franca (Orientadora). II. Título.

CDD 620 (23. ed.) UFPE (CAA 2019-081)

MAYLON DIEFERSON SILVA DE SOBRAL

OTIMIZAÇÃO DE DUTOS SUJEITOS À CORROSÃO, BASEADO EM CONFIABILIDADE

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Pernambuco, Campus Agreste, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental.

Aprovada em: 29 / 05 / 2019.

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Dr^a. Giuliana Furtado Franca Bono (Orientadora)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof^o. Dr. Gustavo Bono (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof^o. Dr. Charlei Marcelo Paliga (Examinador Externo)
Universidade Federal de Pelotas

Ao meu avô João Olímpio que acreditou em mim, até quando nem eu mesmo acreditava e sempre me incentivou a ir mais longe. Sei que permanece comigo, agora não mais pessoalmente, mas como meu anjo da guarda me protegendo.

.AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar gostaria de agradecer a Deus pelo dom da vida e a São Sebastião por toda proteção e iluminação ao longo desta caminhada, tendo certeza de que nunca me deixaram desamparado.

Agradeço a minha orientadora, Giuliana Bono, por toda paciência, compreensão e inigualável ajuda, quero deixar o meu mais sincero obrigado, pois sem sua ajuda jamais teria concretizado este sonho.

A minha família, que representa toda a base do que sou, quero agradecer pelo constante incentivo e pelo gigantesco amor que sempre me deram, sem a força de vocês não teria chegado ao fim desta caminhada. Quero deixar um especial agradecimento à minha mãe Tânia, a minha irmã Débora, a minha madrinha Cicleide, a minha avó Donzilha e a minha tia-avó Maria que são mulheres gigantescas e impressionantes sendo verdadeiros exemplos que sempre busco me espelhar.

Quero dividir essa conquista também com os meus amigos, as pessoas que estiveram diariamente ao meu lado, seja presencialmente ou não. Aqueles que me arrancaram sorrisos em momentos tristes, que ouviram os dramas e os problemas e que sempre estiveram dispostos a dar apoio e dividir todas as dificuldades. Em especial, quero agradecer a Murilo pelo ilimitado companheirismo e por todos os momentos incríveis. As minhas amigas mais que maravilhosas, Anny, Camyla, Ellen e Rafaela, agradeço por serem tão incríveis e me ensinarem tanto. Vocês são verdadeiros presentes que a vida me deu. Ao meu trio favorito, Alison, Henrique e Johnny, obrigado por serem verdadeiros irmãos e por sempre buscarem me entender e apoiar, saibam que os levarei pra sempre comigo.

Agradeço ao CNPq/CAPES pelo suporte financeiro.

.

RESUMO

Nesta pesquisa buscou-se realizar o projeto geométrico de dutos sujeitos ao processo de corrosão, determinando o diâmetro e espessura ótimos e garantindo que critérios de segurança pré-determinados sejam atendidos. Aplicou-se um processo em duplo laço, sendo o laço externo corresponde a etapa de otimização, onde foram aplicadas ferramentas de otimização da plataforma MATLAB. No laço interno, utilizam-se ferramentas de confiabilidade para realizar a análise de segurança do duto, tendo sido aplicado o Método de Confiabilidade de Primeira Ordem (FORM), determinando a função de falha em termos da resistência, representada como a pressão máxima suportada pelo duto, e da solicitação, representada como a pressão exercida nas paredes internas do duto. A resistência, ou pressão de falha, foi obtido por meio da aplicação de formulações semi-empíricas. Realizou-se, previamente ao dimensionamento dos dutos, um estudo do erro na predição da pressão de falha de seis formulações usualmente aplicadas na confiabilidade (B31G, B31G Modificada, BS-7910, DNV RP-F101, PCORRC, e formulação de Ahammed), comparando-se os valores preditos por elas com os valores oriundos de testes de laboratório. Concluiu-se que a formulação DNV RP-F101 apresentou os resultados mais consistentes entre as formulações analisadas, tendo sido adotada essa formulação para o cálculo da pressão de falha, com aplicação do respectivo Erro do Modelo. Foram realizados os projetos de quatro dutos, embasados em exemplos obtidos na literatura. Analisou-se o dimensionamento para variações temporais de 1, 10, 20, 30, 40 e 50 anos em dois cenários: com o índice de confiabilidade alvo fixo e com o mesmo sendo corrigido em função da probabilidade de falha total que varia de acordo com alterações no lapso temporal. Para efeito de comparação realizou-se o dimensionamento para um exemplo de duto, adotando-se a formulação B31G por ser considerada a mais conservadora.

Palavras-chave: Confiabilidade estrutural. Dutos. Otimização estrutural.

ABSTRACT

The objective of this research was to make the geometric design of ducts submitted to the corrosion process the design is carried out by determining the optimum diameter and thickness that ensure that predetermined safety criteria are guaranteed. A double-loop process was applied, where the external loop corresponds to the optimization step, applying optimization tools of the MATLAB platform. In the internal loop, reliability tools were used to carry out the duct safety analysis, applying the First Order Reliability Method (FORM) the failure function was determined in terms of the resistance pressure, represented as the maximum pressure supported by the duct, and the requester pressure, represented as the pressure exerted on the internal walls of the duct. The resistant pressure that also is named by failure pressure is calculated using empirical expressions. Previously to the sizing of the ducts it was realized a study of the error in the prediction of the failure pressure of six formulations usually applied in the reliability (B31G, B31G Modified, BS-7910, DNV RP-F101, PCORRC and Ahammed) where the values predicted by them were compared with the values from laboratory tests. The conclusion was that the DNV RP-F101 formulation has presented the most consistent results between the analyzed formulations this formulation was adopted to calculate the failure pressure, with application of the respective Model Error. The four ducts projects were carried out, based on examples obtained in the literature. It was carried out the sizing for temporal variations of 1, 10, 20, 30, 40 and 50 years in two scenarios: the first with the definition of a fixed target reliability index and the second with the target reliability index being corrected as a function of the probability of total failure that varies according to changes in the time interval. For the purpose of comparison, the design was carried out for an example of a duct, adopting the formulation B31G once that formulation is considered the most conservative.

Keywords: Structural reliability. Pipeline. Structural optimization.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Gráfico 1 -	Esquema dos métodos probabilísticos.....	37
Figura 1 -	Esquema do método semi probabilístico.....	39
Figura 2 -	Representação de defeitos de corrosão em dutos.....	41
Figura 3 -	Formas de corrosão.....	43
Gráfico 2 -	Definição de função de falha.....	47
Gráfico 3 -	Representação da probabilidade de falha.....	48
Gráfico 4 -	Representação da superfície de falha no espaço reduzido.....	49
Fluxograma 1 -	Comportamento da variável Erro do Modelo.....	54
Figura 4 -	Definição da área corroída considerada.....	62
Figura 5 -	Forma geométrica parabólica para área de corrosão.....	64
Gráfico 5 -	Contorno da função objetivo.....	69
Fluxograma 2 -	Atividades para o cálculo do Erro do Modelo.....	76
Figura 6 -	Estruturação numérica do processo de duplo laço.....	87
Fluxograma 3 -	Laço externo do processo de dimensionamento otimizado.....	89
Fluxograma 4 -	Laço interno do processo de dimensionamento otimizado.....	95
Gráfico 6 -	Comportamento da função a ser otimizada.....	98
Gráfico 7 -	Histograma da variável Erro do Modelo e distribuição de probabilidade lognormal para o formulação de Ahammed.....	100
Gráfico 8 -	Histograma da variável Erro do Modelo e distribuições de probabilidade normal para o modelo BS-7910.....	101
Gráfico 9 -	Histograma da variável Erro do Modelo e distribuições de probabilidade para o modelo B31G.....	102
Gráfico 10 -	Histograma da variável Erro do Modelo e distribuições de probabilidade Gumbel para o modelo B31G Modificada.....	103
Gráfico 11 -	Histograma da variável Erro do Modelo e distribuições de probabilidade lognormal para o modelo DNV RP-F101.....	104

Gráfico 12 -	Histograma da variável Erro do Modelo e distribuições de probabilidade para o modelo PCORRC.....	105
Gráfico 13 -	Comparativo com os valores da média da variável Erro do Modelo.....	110
Gráfico 14 -	Comparativo com os valores do coeficiente de variação da variável Erro do Modelo.....	111
Gráfico 15 -	Representação dos resultados do exemplo 1.....	114
Gráfico 16 -	Representação dos resultados do exemplo 2.....	117
Gráfico 17 -	Representação dos resultados do exemplo 3.....	119
Gráfico 18 -	Representação dos resultados do exemplo 4.....	121
Gráfico 19 -	Área de aço da seção transversal calculada com índice de confiabilidade alvo fixo.....	122
Gráfico 20 -	Área de aço da seção transversal calculada com índice de confiabilidade alvo variante.....	123
Gráfico 21 -	Área de aço da seção transversal calculada a partir das formulações B31G e DNV RP-F101.....	125

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Mecanismos causadores de falha na indústria.....	41
Tabela 2 -	Índice de Confiabilidade alvo, segundo a JCSS (2001).....	50
Tabela 3 -	Probabilidade de Falha, segundo a JCSS (2001).....	51
Tabela 4 -	Índice de confiabilidade e probabilidade de falha associada para estado limite de serviço irreversível, segundo JCSS (2001).....	51
Tabela 5 -	Variáveis utilizadas na confiabilidade de dutos sujeitos a corrosão..	56
Tabela 6 -	Quantificação de experimentos de laboratório adotados nesta pesquisa.....	77
Tabela 7 -	Parâmetros experimentais (Kiefner et al., 1973).....	78
Tabela 8 -	Parâmetros experimentais (Mok et al., 1990).....	79
Tabela 9 -	Parâmetros experimentais (Chouchaoui e Pick, 1990).....	80
Tabela 10 -	Parâmetros experimentais (Freire et al., 2006).....	81
Tabela 11 -	Parâmetros experimentais (Bjørnøy et al., 2000).....	82
Tabela 12 -	Valores dos parâmetros utilizados no cálculo da espessura ótima...	85
Tabela 13 -	Caracterização dos parâmetros utilizados no cálculo da espessura ótima.....	86
Tabela 14 -	Detalhamento dos termos de entrada da função FMINCON.....	90
Tabela 15 -	Valores do índice de confiabilidade alvo corrigidos pela variação temporal.....	92
Tabela 16 -	Detalhamento dos termos de entrada do termo options.....	94
Tabela 17 -	Resultados para a função Camel Back.....	97
Tabela 18 -	Resultados para a função Hosaki Problem.....	97
Tabela 19 -	Caracterização da Variável Erro do Modelo.....	106
Tabela 20 -	Valores obtidos no dimensionamento otimizado do exemplo 1.....	114
Tabela 21 -	Valores obtidos no dimensionamento otimizado do exemplo 2.....	117
Tabela 22 -	Valores obtidos no dimensionamento otimizado do exemplo 3.....	119

Tabela 23 -	Valores obtidos no dimensionamento otimizado do exemplo 4.....	120
Tabela 24 -	Valores obtidos no dimensionamento otimizado do exemplo 3 com aplicação da formulação B31G.....	125

LISTA DE SÍMBOLOS

$X(w)$	Variável aleatória
W	Ponto amostral de uma variável aleatória
Ω	Espaço amostral
X	Número real
$F_X(x)$	Função de distribuição acumulada de probabilidade
$f_X(x)$	Função densidade de probabilidade
$E(X)$	Valor médio de uma variável aleatória
M	Média
$Var(X)$	Variância de uma variável aleatória
S_X	Desvio padrão de uma variável aleatória
COV	Coefficiente de variação de uma variável aleatória
$f_{X,Normal}(x)$	Função de densidade normal
$f_{X,Lognormal}(x)$	Função de densidade lognormal
K	Parâmetro de formato
$\bar{\sigma}$	Tensão máxima na estrutura
σ_{rup}	Tensão de ruptura
σ	Tensão atuante
γ_i	Coefficiente de segurança interno
γ_e	Coefficiente de segurança externo
$Prof_f$	Probabilidade de falha
R	Parcela resistiva da função de falha
S	Solicitação da função de falha
R_k	Valor característico de resistência

S_k	Valor característico de solicitação
R_d	Valor de cálculo de resistência
S_d	Valor de cálculo de solicitação
f_k	Valor característico das resistências
γ_f	Coefficientes de majoração das ações e das solicitações
γ_m	Coefficiente de minoração das resistências
γ_c	Coefficiente de minoração das resistências do concreto
γ_s	Coefficiente de minoração das resistências do aço
\mathbf{X}	Vetor de variáveis aleatórias
Φ	Função de distribuição cumulativa normal padrão
C	Confiabilidade
B	Índice de confiabilidade para a iteração em curso
β_{alvo}	Índice de confiabilidade alvo
V_n	Variáveis gaussianas normais padrão
$g(\mathbf{X})$	Função de falha
$g(\mathbf{V})$	Função de falha no espaço normal
$Prob_f^{nL}$	Probabilidade de falha anual
X_M	Valor da variável Erro do Modelo
$P_{Experimental}$	Valor real
$P_{Teórico}$	Valor predito pelo modelo de cálculo adotado
$\overline{X_M}$	Média dos Valores do Erro
$P_{F,Corrigida}$	Valor da pressão de falha após correção
P_F	Valor de pressão obtida pela modelagem
\mathbf{V}^*	Ponto de projeto

A	Vetor normal à superfície de falha
$\nabla g(V^k)$	Gradiente da função de falha no espaço reduzido
$g(V^k)$	valor da função de falha
\mathbf{v}^{k+1}	Ponto avaliado
\mathbf{v}^k	Ponto anteriormente avaliado
B_Variando	Índice de confiabilidade variante
B_Fixo	Índice de confiabilidade fixo
x_0	Ponto de partida
$c(x)$	Condições de restrição determinadas por equações não lineares de desigualdade
$ceq(x)$	Condições de restrição determinadas por equações lineares de desigualdade
A	Matriz dos coeficientes das funções de desigualdade
B	Matriz dos constantes das funções de desigualdade
A_{eq}	Matriz dos coeficientes das funções de igualdade
B_{eq}	Matriz dos constantes das funções de igualdade
Lb	Limite inferior
Ub	Limite superior
Fun	Função objetivo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	Objetivos	20
1.1.1	<i>Objetivo geral</i>	20
1.1.2	<i>Objetivos específicos.....</i>	20
1.2	Justificativa e Motivação	20
1.3	Revisão Bibliográfica	21
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	29
2.1	Princípios de estatística e probabilidade	29
2.1.1	<i>Variáveis aleatórias</i>	29
2.1.2	<i>Função cumulativa de probabilidade.....</i>	30
2.1.3	<i>Função de densidade de probabilidade.....</i>	31
2.2	Valores característicos de uma variável aleatória	32
2.2.1	<i>Média ou valor esperado.....</i>	32
2.2.2	<i>Variância</i>	32
2.2.3	<i>Desvio padrão.....</i>	32
2.2.4	<i>Coeficiente de variação.....</i>	33
2.3	Distribuições de probabilidade	33
2.4	Requisitos de sistemas estruturais	34
2.5	Métodos de verificação de segurança	35
2.5.1	<i>Métodos das tensões admissíveis</i>	36
2.5.2	<i>Método probabilístico</i>	37
2.5.3	<i>Método semi-probabilístico</i>	38
2.6	Corrosão	40
2.7	Confiabilidade estrutural	43
2.7.1	<i>Formulação dos problemas de confiabilidade estrutural.....</i>	43
2.7.2	<i>Classificação das incertezas na análise estrutural.....</i>	45
2.7.3	<i>Definição de probabilidade de falha.....</i>	47
2.7.4	<i>Espaço normal padrão reduzido e índice de confiabilidade</i>	49

2.7.5	<i>Probabilidade de falha anual e total</i>	51
2.7.6	<i>Variável Erro do Modelo</i>	52
2.7.7	<i>Variáveis utilizadas na confiabilidade estrutural</i>	54
2.8	Método para análise de confiabilidade estrutural: método FORM ...	58
2.9	Formas de obtenção da função de falha	59
2.10	Modelos analíticos semi-empíricos	60
2.10.1	<i>ASME B31G</i>	62
2.10.2	<i>ASME B31G Modificada</i>	63
2.10.3	<i>BS-7910</i>	64
2.10.4	<i>DNV RP-F101</i>	65
2.10.5	<i>Formulação de Ahammed</i>	66
2.10.6	<i>Modelo PCORRC</i>	66
2.11	Otimização	67
2.11.1	<i>Ponto de projeto de otimização baseado em confiabilidade</i>	70
2.11.2	<i>Programação quadrática sequencial (SQP)</i>	73
3	METODOLOGIA	75
3.1	Cálculo do Erro do Modelo	76
3.1.1	<i>Base de dados</i>	77
3.1.2	<i>Cálculo da pressão de falha via modelos semi-empíricos</i>	82
3.1.3	<i>Cálculo do erro associado</i>	83
3.2	Projeto otimizado do duto	85
3.2.1	<i>Laço externo do processo de otimização</i>	88
3.2.2	<i>Laço interno do processo de otimização</i>	94
3.3	Validação do programa	96
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	99
4.1	Cálculo e caracterização da variável Erro do Modelo	99
4.1.1	<i>Histogramas e distribuição de probabilidade</i>	99
4.1.2	<i>Caracterização estatística</i>	106
4.1.3	<i>Comparação com resultados da literatura</i>	109
4.2	Cálculo do projeto ótimo	111
4.2.1	<i>Exemplo 1 – Zhang e Zhou (2013)</i>	113

4.2.2	<i>Exemplo 2 – Bazan e Beck (2013)</i>	116
4.2.3	<i>Exemplo 3 – Zhou (2010)</i>	118
4.2.4	<i>Exemplo 4 – Leira, Naess e Naess (2016)</i>	120
4.3	Análise dos índices de confiabilidade	122
4.4	Comparação entre formulações	124
5	CONCLUSÕES	127
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	131
	REFERÊNCIAS.....	132

1 INTRODUÇÃO

O sistema de transporte dutoviário representa uma das formas de diminuir o tráfego de substâncias perigosas e a incidência de desastres ecológicos, podendo transportar grandes quantidades de carga por longas distâncias, diminuindo o custo de transporte dos produtos.

Embora apresente um custo de implantação razoavelmente alto, o sistema dutoviário representa um dos meios de transporte menos poluente e de menor risco de avaria, sendo largamente utilizado no transporte de líquidos, gases e sólidos em suspensão. A rede de gasodutos e oleodutos vem crescendo significativamente nos últimos anos, demonstrando um avanço nos investimentos nesta área.

As consequências de falhas em sistemas dutoviários podem ser economicamente, socialmente e ambientalmente devastadoras, podendo causar custos elevados na reparação do sistema, uma interrupção do duto em operação, poluição extensiva e até mesmo lesões humanas. Frente ao fato de que a falha em dutos tem um forte impacto negativo, deve-se evitar que o colapso da estrutura seja atingido, sendo necessário um controle e um estudo sobre o comportamento do duto ao longo de sua vida útil. Este controle no estado de conservação e da capacidade resistiva do duto pode ser feita com base na quantificação do risco de o mesmo entrar em colapso, ou seja, estimando-se a probabilidade de falha das tubulações e o seu tempo de vida remanescente (MAHMOODIAN; LI, 2017).

Diversas pesquisas (TORO, 2014; OSSAI; BOSWELL; DAVIES, 2016; LEMOS; OLIVEIRA; SILVA, 2016) têm apontado que dentre os principais problemas que afetam o bom funcionamento do sistema, a corrosão representa o maior problema associado com dutos usados no transporte de gás e óleo.

Em um projeto de engenharia, um dos aspectos mais importantes, além da funcionalidade da estrutura é a segurança dela (CARVAJALINO, 2010). Um projeto seguro requer o conhecimento de todas as variáveis envolvidas no

problema. Porém, o conhecimento dos dados de uma variável não é 100% preciso, existindo um grau de incerteza associado à mesma.

Nesse contexto que o estudo da confiabilidade é inserido, na tentativa de prever incertezas e flutuações nas variáveis da estrutura (PANTOJA, 2012). Os métodos de confiabilidade são baseados na teoria da probabilidade e da estatística, possibilitando que uma estrutura seja avaliada por um índice de confiabilidade ou por sua probabilidade de falha.

A avaliação de uma estrutura por meio de índice de confiabilidade pode ser entendida como a verificação do grau de segurança de determinada estrutura. A probabilidade de falha se configura como uma grandeza inversa ao índice de confiabilidade, representando o risco da estrutura em atingir o colapso.

Fatores de segurança muito elevados levam as estruturas a serem consideradas com alto grau de segurança, mas ao mesmo tempo tendem a elevar bastante o custo, podendo tornar o projeto economicamente inviável. No entanto, a decisão de diminuir o fator de segurança no intuito de reduzir os custos deve sempre ser bem analisada. Essa redução deve se dar de forma que torne a estrutura economicamente viável, mas não permita que os riscos de colapso sejam demasiadamente elevados.

Neste cenário, a confiabilidade estrutural se configura como uma importante ferramenta para a engenharia, permitindo que se quantifique o fator de segurança, por meio de índices de confiabilidade, buscando calcular e prever a probabilidade de que o estado limite de uma estrutura seja violado (MELCHERS; BECK, 2018).

Aplicando a confiabilidade, podem-se potencializar as ferramentas de análise e dimensionamento usadas na engenharia, garantindo melhores resultados e permitindo que as estruturas sejam planejadas e projetadas de forma a serem economicamente atrativas e os parâmetros de segurança sejam atendidos (MELCHERS, 1999).

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo geral aplicar ferramentas de otimização para projetar as características geométricas de quatro dutos de aço com base na confiabilidade estrutural, aplicando o método analítico FORM (*First Order Reability Method*) a partir de um índice de confiabilidade alvo, com aplicação da variável Erro do Modelo na correção do valor de resistência do duto.

1.1.2 Objetivos específicos

- ✓ Aplicar seis formulações semi-empíricas para o cálculo da pressão de falha de dutos sujeitos a corrosão;
- ✓ Comparar os resultados obtidos no cálculo da pressão de falha com dados experimentais obtidos em laboratório para análise do erro associado a cada modelo, caracterizando a variável Erro do Modelo para cada uma das seis formulações semi-empíricas estudadas;
- ✓ Obtenção na literatura de parâmetros geométricos e estatísticos de exemplos de dutos para utilização como parâmetros de entrada na realização do dimensionamento otimizado do duto.
- ✓ Dimensionar, por meio de técnicas de otimização, os parâmetros geométricos do duto, como espessura e diâmetro, garantindo que um índice de confiabilidade alvo seja atendido.
- ✓ Avaliar as alterações no dimensionamento dos parâmetros geométricos a partir da aplicação da probabilidade de falha anual e da aplicação da probabilidade de falha total na definição do índice de confiabilidade alvo.

1.2 Justificativa e Motivação

Embora o sistema dutoviário seja um meio seguro de transporte de material, no caso de falha, tem-se um impacto financeiro e ambiental bastante considerável, frente ao fato de que, usualmente, transportam-se pelos dutos materiais de grande peso econômico e forte capacidade poluente, como o petróleo.

Do total de mecanismos de falha, a corrosão representa o principal deles, onde quase 30% das falhas em dutos são causadas por ela (LEMOS; OLIVEIRA;

SILVA, 2016). Assim, analisar de forma mais detalhada o comportamento desta ação degradante na estrutura pode significar grandes economias financeiras e evitar danos ambientais.

O estudo de dutos é um tema que desperta bastante interesse, uma vez que é objeto de investimento de grandes empresas, a exemplo da Petrobras. O tema tem sido cada vez mais relevante e usual no estado de Pernambuco, impulsionado pela refinaria de Abreu e Lima localizada na região metropolitana da capital do estado. Dentro da Universidade Federal de Pernambuco, encontram-se grupos de pesquisa cujo foco central é a análise e estudo de petróleo e gás que contam com o apoio das corporações.

Dentre as formas de análise de estruturas, a confiabilidade estrutural busca uma verificação e/ou dimensionamento de forma mais completa em termos de segurança, uma vez que não considera apenas os valores médios das variáveis envolvidas no projeto, levando em conta as incertezas inerentes às variáveis.

Baseando-se em trabalhos realizados dentro do grupo de pesquisa do Laboratório de Engenharia Computacional (LECOM) do Centro Acadêmico do Agreste da Universidade Federal de Pernambuco, busca-se realizar o projeto baseado em confiabilidade de um duto sujeito a corrosão, garantindo-se os requisitos de segurança e aplicando o fator de correção (Erro do Modelo) no cálculo da pressão resistente.

1.3 Revisão Bibliográfica

Possuindo um robusto embasamento teórico sobre os conceitos envolvidos na confiabilidade, Sagrilo (1994), apresentou os princípios e a forma de cálculo das diferentes etapas do processo de confiabilidade, explicando tópicos como a transformação das variáveis para o espaço padrão normal estatisticamente independente, a busca do ponto de projeto, a estruturação do método FORM e SORM (*Second Order Reliability Method*), além de uma explanação sobre a técnica de superfície de resposta. Apresentou o desenvolvimento de uma ferramenta computacional que objetiva a análise de confiabilidade em estruturas

de grande porte, aplicando-se a metodologia em plataformas offshore fixas, optando-se pelo método analítico FORM (First Order Reliability Method) e aplicando uma técnica de superfície de resposta para representar a função de falha.

Aplicando o Método de Confiabilidade de Primeira Ordem (FORM) e a simulação de Monte Carlo na estimativa da confiabilidade de tubulação sujeitas à corrosão Teixeira *et al.* (2008) definiram a função de estado limite com base nos resultados de uma série de experiências em pequena escala e através da análise de Elementos Finitos para obtenção da pressão de ruptura de tubulações intactas e corroídas. A análise de confiabilidade feita no duto intacto para um período de tempo de 50 anos resulta num índice de confiabilidade igual a 3,876 para a formulação B31G e 3,862 com a aplicação do Método de Monte Carlo. Foi realizado ainda uma análise de sensibilidade para diferentes níveis de corrosão para identificar a influência de vários parâmetros na probabilidade de falha das tubulações intactas e corroídas, chegando a conclusão de que para o estado intacto do duto, onde não há influência do processo de corrosão, a pressão aplicada e a tensão de escoamento do aço são os dois fatores que possuem maior influência na análise de confiabilidade. Para o cenário onde o processo de corrosão se faz presença, aplicando a formulação B31G, tem-se que a pressão aplicada e a profundidade do defeito são os dois fatores com maior impacto na análise de confiabilidade.

O trabalho de Torres (2009) apresentou uma análise de dutos com corrosão, aplicando o sistema de acoplamento de programas computacionais, utilizando o MATLAB, Patran, Python e ANSYS, para a análise de confiabilidade. Foram analisados dutos com defeitos isolados e com múltiplos defeitos. O estudo apresentou uma metodologia para verificação da segurança e dimensionamento baseado em confiabilidade de tais estruturas. Definiu-se a função de falha em termos da pressão interna aplicada e da pressão de falha, sendo esta calculada considerando o Método dos Elementos Finitos (MEF), modelos empíricos e superfície de resposta. A análise de confiabilidade é realizada na plataforma MATLAB tendo sido feita a validação do programa a partir de um exemplo

apresentado por Ahhamed (1998). Apresentou também, o dimensionamento baseado em confiabilidade de um duto buscando garantir a conservação do nível de segurança por um determinado período de tempo especificado em projeto. No estudo, adotou-se a espessura como variável de projeto e como variáveis aleatórias foram escolhidas a pressão aplicada, a profundidade do defeito e a taxa de corrosão radial, sendo esta escolha baseada na análise de sensibilidade apresentada por Ahhamed (1998). Foi inserido o método semi-probabilístico para verificação da segurança e realizou-se a comparação dos resultados obtidos na predição de falha.

Propondo um modelo para avaliar a confiabilidade de um duto em um sistema dependente do tempo, contendo múltiplos defeitos de corrosão e submetido à pressão interna estocástica, Zhou (2010) realizou o estudo em um duto adotando-se defeitos idênticos, avaliando para conjuntos contendo 5, 10 e 20 defeitos. Considerou-se um exemplo de duto para serem feitas as análises, adotando um modelo linear de crescimento com uma taxa de corrosão radial igual a 0,15 mm/ano baseada em indicações da *CSA - Oil and gas pipeline systems*. O autor apresentou três equações de estado limite, que combinadas entre elas irão fornecer a probabilidade de falha para os três tipos de falha consideradas na pesquisa, pequenos vazamentos, ruptura e largos vazamentos. O estudo baseou-se em Leis e Stephens (1997) para estabelecer um termo multiplicador associado ao erro do modelo adotado no cálculo da função de falha para ruptura, utilizando a formulação conhecida como PCORRC para realizar a predição da pressão de falha do duto. Esse termo multiplicador refere-se a variável Erro do Modelo, adotando-se um valor igual a 0,97 e distribuição do tipo lognormal.

Tendo como foco os dutos de transporte de óleo e gás natural, Carvajalino (2010) desenvolveu uma metodologia para avaliação da confiabilidade estrutural, sendo possível aplicar a metodologia a diferentes equipamentos, como vasos de pressão, tanques de combustíveis, dentre outros. Com isso é capaz de se acoplar diferentes eventos que podem ocorrer durante a vida útil das estruturas, como danos gerados por processos corrosivos, danos por terceiros, operações incorretas, entre outros. Considera-se que cada evento pode ser descrito por uma

função de estado limite, sendo que para o caso onde há mais de um evento ocorrendo simultaneamente sobre a estrutura, a análise global deve ser feita através da união ou interseção das respectivas funções de estado limite de cada evento. Dentre os exemplos analisados foi realizado o estudo de confiabilidade para um duto do tipo API 5L X52 onde a probabilidade de falha foi calculada usando a linguagem *VBA for EXCEL*, com o modelo DNV RP F-101 de 1999 e obtendo-se uma probabilidade de falha de $7,95 \cdot 10^{-4}$ para a falha por ruptura, e $1 \cdot 10^{-12}$ para falha por vazamento. Em análise de sensibilidade, demonstra-se que para a falha por ruptura, a pressão aplicada e a profundidade do defeito são as variáveis com maior fator de importância, seguida pela tensão última. Para a falha por vazamento, a principal variável que impacta na análise é a profundidade do defeito.

Tendo como base a configuração estrutural de dutos contendo defeitos simples, Zhou e Huang (2012) realizaram a caracterização da variável Erro do Modelo, utilizando oito modelos difundidos na literatura para obtenção da pressão de ruptura em dutos submetidos aos efeitos da corrosão. Um banco de dados com valores experimentais obtidos na literatura foi constituído para dar embasamento na análise da acurácia de cada formulação. Realizaram ainda a caracterização probabilística incluindo cálculo de valor médio, desvio padrão, coeficiente de variação e definição da distribuição de probabilidade que melhor se enquadrava para cada formulação. Pela semelhança na linha de pensamentos com esta pesquisa, os resultados do citado trabalho serão debatidos com mais enfoque posteriormente.

O cálculo da pressão de falha em dutos com defeitos de corrosão através da aplicação de um modelo de Elementos Finitos foi realizado por Xu e Cheng (2012). Para efeito de comparação com os valores obtidos pelo modelo de elemento finito foi calculada a pressão de falha através de três modelos empíricos (B31G, B31G Modificada e DNV-RP-F101). O estudo foi baseado em três tipos de aço (X65, X80 e X100) aplicando diferentes valores para a profundidade do defeito. Foi observado que a pressão de falha é reduzida com o aumento da profundidade do defeito e com a diminuição da classe do aço. No intuito de

analisar a influência que o carregamento gerado pelo solo exerce sobre o duto, aplicam-se, na direção longitudinal do mesmo, tensões de tração e compressão, separadamente, pré-tensionando o duto, com a finalidade de simular as ações do solo sobre o elemento. Concluiu-se assim que independe de tração ou compressão, a ação de cargas longitudinais reduz a pressão de falha do duto defeituoso, tornando-o menos resistente. O cálculo do Erro atrelado a cada formulação é feito realizando-se a comparação entre o valor de pressão obtido com o modelo semi-empírico e o valor obtido com a aplicação do método de elementos finitos. Conclui-se que os métodos B31G e B31G Modificado foram mais sensíveis a alterações no tipo de aço e na variação da profundidade do defeito, demonstrando resultados flutuantes. Obtiveram-se faixas de valores onde ocorria a superestimação da pressão de falha e faixas de valores com subestimação. O modelo DNV RP-F101 apresentou os resultados mais consistentes, tanto para diferentes tipos de aço quanto para diferentes valores de profundidade.

A determinação da variável Erro do Modelo para correção dos modelos semi-empíricos de determinação da pressão de falha foi a base do trabalho de Toro (2014). Com isto, foi analisada a precisão dos modelos semi-empíricos usuais de avaliação da pressão de ruptura de dutos submetidos à corrosão aplicando as expressões oriundas de três normas, B31G, B31G Modificado e DNV RP-F101, além da aplicação do modelo PCORRC. Para o cálculo da probabilidade de falha, foram aplicados o método de primeira ordem FORM e o Método de Monte Carlo, onde avaliou-se a evolução da probabilidade de falha com o aumento da profundidade do defeito, confirmando que com o aumento do defeito a probabilidade de falha tende a aumentar. Por meio de análise de sensibilidade na função de falha, aplicando-se o modelo DNV RP-F101 no cálculo da parcela da pressão de falha, o autor definiu que a variável que possui a maior contribuição para a probabilidade de falha é o Erro do Modelo, seguido pela profundidade do defeito. No estudo, o autor analisou duas formas de aplicação da variável Erro do Modelo, a primeira corresponde à utilização do valor médio de forma constante, dependendo apenas do tipo de metodologia utilizada no cálculo da pressão de falha. Para a segunda forma ocorre a construção de uma

expressão que relaciona o valor do erro em função da relação entre a profundidade do defeito e a espessura do duto, havendo um ajuste pontual da variável erro para cada exemplo de duto. No entanto, os exemplos mostraram que quando a relação entre a profundidade do defeito e a espessura do duto supera o valor de 0,7 essa expressão de ajuste do Erro passa a prejudicar a análise e influencia de forma negativa nos resultados, tendo sido observado um decréscimo totalmente incoerente no valor da probabilidade de falha. A aplicação da variável a partir de um valor médio obtido para cada formulação apresentou um comportamento estável, garantindo que com o aumento da profundidade do defeito há um aumento na probabilidade de falha. Com a aplicação do método FORM obtiveram-se resultados próximos ou iguais aos obtidos com a aplicação do Erro por meio da expressão de correção.

Um estudo do Erro do Modelo associado a cinco métodos conhecidos de cálculo de pressão em dutos, contendo rachaduras superficiais externas orientadas na direção longitudinal do duto foi realizado por Yan, Zhang e Zhou (2014). Os modelos Battelle e CorLAS, bem como as metodologias BS 7910 (2005), API RP579 (2007) e R6 (Rev 4, Alteração 10) foram utilizados. A base de dados utilizada na avaliação do Erro é composta por 112 testes de laboratório. Os resultados da análise sugerem que o modelo CorLAS é o modelo menos conservador entre os cinco modelos considerados e os modelos Battelle, BS 7910, API RP579 e R6 são, em geral, mais conservadores.

Em seu trabalho, Keshtegar e Miri (2014) propuseram um modelo probabilístico que incluiu o cálculo do Erro do Modelo, usando o critério de tensão de cisalhamento médio. O fator de redução da pressão foi calculado analiticamente por sete modelos difundidos no campo da confiabilidade estrutural, aplicados para obtenção semi-empírica da pressão de falha. Utilizando 12 exemplos de ensaios de ruptura em dutos, retirados da literatura foi calculado a relação entre a pressão de falha obtida nestes ensaios e a pressão de falha do duto intacto, calculada de forma empírica. Esta relação entre pressões é comparada com o valor do fator de redução da pressão de cada uma das sete metodologias estudadas. Conclui-se que o modelo PCORRC apresentou os

melhores resultados. Foi proposta uma formulação que faz um ajuste no tradicional modelo HL-RF utilizado como método interativo para cálculo do índice de confiabilidade. A nova formulação, nomeada de CHL-RF apresentou resultados de convergência mais robustos, apresentando a redução no número de iterações durante a convergência para o ponto ótimo. A análise de sensibilidade realizada demonstra que com o avanço temporal, as variáveis que possuem maior importância estão relacionadas com a geometria, como a profundidade do defeito e a espessura do duto, seguida pela variável Erro do Modelo que apresentou um alto fator de importância para todos os tempos analisados. Outra variável que se mantém com alto fator de importância é a pressão aplicada. Já a variável de tensão apresenta um fator de importância intermediário para um espaço temporal pequeno, tendo que a medida que o tempo avança o valor do fator de importância diminui consideravelmente.

Tendo sido empregado um método analítico de variação no tempo apresentado por Melchers (1999) para quantificar a probabilidade de falha de um duto sujeito a corrosão, de modo que se possa determinar o tempo até a ocorrência da falha, Mahmoodian e Li (2017) buscaram determinar com confiança a necessidade e o momento da realização de reparos. A técnica de simulação de Monte Carlo foi aplicada para verificar os resultados do método analítico. O cálculo da pressão de falha foi feito aplicando um modelo desenvolvido por Kiefner e Vieth (1990). Foi estudada a relação entre a probabilidade de falha e diversas variáveis envolvidas na análise de confiabilidade. Realizou-se uma análise de sensibilidade de forma ampla, demonstrando como a probabilidade de falha se comporta com a variação de cada uma das variáveis individualmente. Foi verificado que alterações no valor do coeficiente de correlação entre defeitos geram pequenos impactos na probabilidade de falha. Definindo-se as outras variáveis em três conjuntos, tem-se o primeiro conjunto representado pelas variáveis envolvidas com o defeito, como profundidade, largura e taxas de corrosão, que representam as variáveis com maior impacto no cálculo da probabilidade de falha. O segundo conjunto representa as variáveis da geometria do duto, como diâmetro e espessura, que apresentaram um impacto mediano na probabilidade de falha. Por fim, as

propriedades do duto, como as tensões do aço, não demonstraram ter tanto impacto na análise.

A avaliação da confiabilidade de dutos enterrados, considerando o efeito do tempo foi realizado por Tee e Pesinis (2017). Foi adotado um processo de corrosão externa. Para o cálculo da resistência da função de falha utilizou-se uma versão modificada da expressão empírica B31G Modificada, este método é denominado como método modificado 0.85dL ou usualmente chamado de método RPA. Por sua vez, a solicitação foi modelada empregando um modelo de onda quadrada de Poisson (*Poisson Square Wave Process* – PSWP). Para geração do defeito ao longo do tempo, empregou-se o Processo não homogêneo de Poisson (NHPP). Já para o crescimento do mesmo ao longo do tempo, empregou-se um modelo empírico de Lei de Potência, este modelo leva em consideração a corrosão inicial e algumas propriedades do solo que circunda o duto, com esta formulação pode-se relacionar o crescimento da corrosão aos efeitos causados pelo solo. A probabilidade de falha foi avaliada empregando-se a função de estado limite, sendo adotada a técnica de simulação de Monte Carlo para o cálculo do risco de falha e avaliou-se o efeito para diferentes quantidades de defeitos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Princípios de estatística e probabilidade

2.1.1 Variáveis aleatórias

Se os resultados dos experimentos de um determinado fenômeno são previsíveis, o fenômeno é chamado de determinístico (ALMEIDA, 2008), ou seja, com os mesmos valores iniciais a resposta final, ou o resultado do experimento, sempre terá o mesmo valor. Por exemplo, quando se analisa o tempo de queda de um objeto, mantendo as mesmas condições iniciais, a resposta final será a mesma, independentemente do número de repetições que se faça.

Por outro lado, se os resultados dos experimentos não forem previsíveis o fenômeno é chamado de aleatório não determinístico (ALMEIDA, 2008). Neste caso, cada experimento deve ser associado a um valor de probabilidade de ocorrência do evento relacionado ao fenômeno em observação. Assim, em um fenômeno aleatório o resultado não se repete obrigatoriamente. Por exemplo, ao se jogar um dado repetidas vezes o resultado pode alternar várias vezes. Porém, o que se pode fazer é atrelar a probabilidade de ocorrência de cada resultado, ou seja, a probabilidade de que ao se jogar o determinado resultado seja obtido.

Uma variável aleatória é uma função do espaço amostral nos reais, para a qual é possível calcular a probabilidade de ocorrência de seus valores (MAGALHÃES, 2006). Em outras palavras, uma variável aleatória real $X(w)$ é uma função real que atribui a cada ponto amostral w de um espaço amostral Ω um valor real x tal que o conjunto $\{X \leq x\}$ é um evento para qualquer número real x (BECK, 2012).

O evento $\{X = x\}$ pode ser descrito como “a variável aleatória X assume o valor x ”. O evento $\{X \leq x\}$ significa “a variável aleatória X assume qualquer valor menor ou igual do que x ”. Sendo X uma variável aleatória, a ocorrência deste evento só pode ser determinada em termos de probabilidades.

O domínio da função variável aleatória $X(w)$ é o espaço amostral Ω . Quando este domínio é formado por um número finito de pontos, diz-se que a

variável aleatória é do tipo discreta. Quando o domínio é formado por um número infinito de pontos, tem-se uma variável contínua.

2.1.2 Função cumulativa de probabilidade

Para um número real x qualquer, o conjunto $\{X \leq x\}$ formado por todos os pontos amostrais w tais que $X(w) \leq x$ representa um evento. A probabilidade de ocorrência deste evento é um número que depende de x , e que é dado pela função $F_X(x)$. A função de distribuição acumulada de probabilidade de uma variável aleatória X é a função:

$$F_X(x) = P[\{X \leq x\}] \quad (1)$$

definida para qualquer número x no intervalo $(-\infty \leq x \leq +\infty)$. Em outra notação pode ser representada por:

$$F_X(x) = \int_{-\infty}^x f_X(x) dx \quad (2)$$

onde $f_X(x)$ é a função densidade de probabilidade. Em outras palavras, a função $F_X(x)$ corresponde à probabilidade de que a variável aleatória X assuma qualquer valor menor do que x . Esta definição é válida para qualquer tipo de variável aleatória, seja ela discreta ou contínua.

Uma função cumulativa de probabilidades é definida pelas seguintes propriedades:

$$\begin{cases} F_X(-\infty) = 0 \\ 0 \leq F_X(x) \leq 1 \\ F_X(\infty) = 1 \end{cases} \quad (3)$$

Com base na segunda propriedade, podem-se entender as três propriedades, e todo conceito de função cumulativa de probabilidade. De acordo com a segunda propriedade, o valor da função cumulativa será maior ou igual a zero, ou seja, a menor probabilidade de ocorrer o evento será zero. Ao mesmo tempo em que o valor máximo adotado por esta função será igual a um. Isso

porque como esta função indica uma probabilidade de ocorrência do evento, a maior probabilidade que se pode ter é a de 100%.

As outras duas propriedades reafirmam esse comportamento. A primeira demonstra que o valor inicial da função cumulativa é zero e ela passa a acumular valores a medida que o espaço amostral é analisado. A terceira propriedade demonstra que quando todos os pontos são considerados, tem-se a o acúmulo total na função cumulativa, atingindo 100% de probabilidade.

2.1.3 Função de densidade de probabilidade

A derivada em relação a x da função de distribuição acumulada de probabilidades é chamada de função de densidade de probabilidades, ou $f_X(x)$:

$$f_X(x) = \frac{dF_X(x)}{dx} \quad (4)$$

Para avaliar, a probabilidade da variável aleatória X assumir valores entre a e b , tem-se a seguinte expressão:

$$P(a \leq X \leq b) = \int_a^b f_X(x) dx \quad (5)$$

Qualquer que satisfaça as seguintes condições pode ser considerada como uma função de densidade de probabilidade:

$$\left\{ \begin{array}{l} f_X(x) \geq 0.0 \quad \text{para qualquer } x \\ \int_{-\infty}^{+\infty} f_X(x) dx = 1 \\ \int_a^b f_X(x) dx = P(a \leq X \leq b) \end{array} \right. \quad (6)$$

Como a função de distribuição de probabilidades pode não ter derivadas em todo x , faz-se uma distinção entre variável aleatória contínua e discreta. Esta distinção condiz com o domínio destes tipos de variáveis.

2.2 Valores característicos de uma variável aleatória

2.2.1 Média ou valor esperado

O valor médio, ou a média, ou o valor esperado de uma variável aleatória X é definido como:

$$E(X) = \mu_X = \int_{-\infty}^{+\infty} X f_X(X) dx \quad (7)$$

Onde $f_X(X)$ é a função densidade de probabilidade de X . Outro resultado interessante é o valor médio quadrático de X definido como:

$$E(X^2) = \int_{-\infty}^{+\infty} X^2 f_X(X) dx \quad (8)$$

2.2.2 Variância

A variância mede a dispersão dos valores da variável em torno da média e é definida como:

$$Var(X) = \int_{-\infty}^{+\infty} (X - \mu_X)^2 f_X(X) dx \quad (9)$$

Expandindo a expressão (9):

$$Var(X) = \int_{-\infty}^{+\infty} X^2 f_X(X) dx - 2\mu_X \int_{-\infty}^{+\infty} X f_X(X) dx + \mu_X^2 \int_{-\infty}^{+\infty} f_X(X) dx \quad (10)$$

Têm-se então:

$$Var(X) = E(X^2) - \mu_X^2 \quad (11)$$

2.2.3 Desvio padrão

O desvio padrão de X é S_X sendo definido como a raiz quadrada da variância:

$$S_X = \sqrt{\text{Var}(X)} \quad (12)$$

2.2.4 Coeficiente de variação

O coeficiente de variação COV é definido como a razão entre o desvio padrão e a média, ou seja,

$$COV = \frac{S_X}{\mu_X} \quad (13)$$

O coeficiente de variação mede, de forma adimensional (ao contrário da variância) a dispersão dos dados da variável aleatória em torno da média. Coeficientes de variação baixos indicam que os valores da variável aleatória estão distribuídos próximos à média, enquanto que valores altos indicam uma forte dispersão em torno da mesma.

Estes princípios são aplicados na análise de confiabilidade uma vez que se trabalha com variáveis aleatórias na resolução dos problemas, assim esses valores característicos ajudam na interpretação do comportamento da variável aleatória e colaboram na construção dos modelos matemáticos.

2.3 Distribuições de probabilidade

O uso prático desta função depende da capacidade da mesma de representar estatisticamente um determinado fenômeno que está sendo investigado. Porém, na literatura já existem várias funções que atendem às condições citadas anteriormente e que podem ser utilizadas na engenharia.

As distribuições de probabilidade mais usuais em engenharia são: a distribuição Normal (ou Gaussiana) e a distribuição Log-normal. Assim como as distribuições de Valores Extremos também aparecem com muitas aplicações em engenharia.

Além das distribuições citadas, existem muitas outras disponíveis na literatura clássica como apresentadas por Ang e Tang (1984a) ou Ang e Tang (1984b).

2.4 Requisitos de sistemas estruturais

Estruturas e elementos estruturais são projetados, construídos e mantidos de modo a cumprir uma determinada função (estrutural) sob determinadas condições. Esta função deve ser cumprida:

- Durante um determinado período, chamado de vida útil ou vida de projeto;
- Com um nível adequado de segurança;
- De maneira economicamente viável.

Em particular, (BECK, 2019) estruturas e elementos estruturais devem cumprir os seguintes requisitos básicos:

- Requisito de serviço: uma estrutura deve manter-se em condições apropriadas para a execução da função à qual se destina durante todo o período de vida útil;
- Requisito de segurança: uma estrutura deve suportar carregamentos extremos esporádicos e carregamentos repetitivos aos quais a mesma esteja sujeita dentro do período de vida previsto, sem entrar em colapso ou apresentar severos danos permanentes;
- Requisito de robustez: uma estrutura não deve ser danificada por eventos acidentais como incêndio, explosões, impacto, terremotos ou erros humanos de maneira desproporcional à severidade do evento causador do dano.

Em geral, os requisitos básicos são atendidos através de projeto e dimensionamento adequados, exaltando-se a importância de que sejam seguidas as considerações normativas.

Estruturas e elementos estruturais devem satisfazer ainda aos seguintes requisitos:

- Requisito econômico: uma estrutura deve atender aos três requisitos básicos sem comprometer sua capacidade de gerar lucro, sob pena de tornar-se economicamente inviável;
- Requisito social: uma estrutura deve atender aos quatro requisitos anteriores com níveis de risco aceitáveis por parte do público ou usuário.

Para atender ao requisito econômico, devem-se levar em conta os custos de projeto, construção, manutenção e operação da estrutura. Em geral, isto representa uma análise detalhada do compromisso entre segurança e o custo

total esperado de uma estrutura. Uma boa análise estrutural pode servir para a determinação do nível adequado de segurança para a estrutura, procurando garantir todos os requisitos.

Em geral, a escolha do nível adequado de segurança deve levar em conta as consequências de falha em termos de risco de morte ou danos à saúde, potencial para prejuízos econômicos e ambientais, e inconveniência social.

2.5 Métodos de verificação de segurança

Tomando como base o texto da NBR 6118 (ABNT, 2014) e ampliando-se o princípio para todos os tipos de estruturas, deve-se projetar e construir de modo que, sob as condições ambientais previstas na época do projeto e quando utilizadas, conforme preconizado em projeto, uma estrutura venha a conservar sua segurança, estabilidade e aptidão em serviço durante todo o prazo correspondente à sua vida útil.

Para tentar garantir a condição de segurança da estrutura tem-se basicamente três métodos de dimensionamento: o método das tensões admissíveis, o método probabilístico e o método semi probabilístico.

O Método das Tensões Admissíveis foi o primeiro método a ser utilizado para garantir a segurança. No entanto, o fato de não levar em consideração a combinação prevista de ações, não quantificar a segurança e o valor do coeficiente de segurança aplicado não ser necessariamente uma garantia de segurança, tornaram o método não eficiente, incentivando a busca por outros métodos.

O Método Probabilístico substitui a aplicação de coeficientes de segurança pelo conceito de probabilidade de ruína (ou probabilidade de falha). Por fim, tem-se o Método Semi Probabilístico que (PINHEIRO; MUZARDO; SANTOS, 2007) continua com números empíricos, baseados na tradição, mas são introduzidos dados estatísticos e conceitos probabilísticos, configurando um cenário mais completo de análise e verificação, sendo de certa forma uma união dos outros dois métodos citados e o mais aplicado nas análises atuais.

2.5.1 Métodos das tensões admissíveis

No método das tensões admissíveis as cargas de projeto são deterministicamente admitidas como os valores máximos concebidos para atuarem ao longo da vida útil da estrutura (ATAÍDE; CORRÊA, 2006). As máximas tensões que poderão ocorrer na estrutura ($\bar{\sigma}$) serão obtidas através da relação entre o valor das correspondentes tensões de ruptura ou de escoamento dos materiais (σ_{rup}), divididas por um coeficiente de segurança interno, γ_i , maior que a unidade. Esta tensão máxima de projeto é demonstrada na expressão abaixo:

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma_{rup}}{\gamma_i} \quad (14)$$

Assim têm-se a seguinte condição de segurança:

$$\sigma \leq \bar{\sigma} \quad (15)$$

Com σ sendo as tensões atuantes. O coeficiente de segurança interno (γ_i) varia conforme o material, para garantir a segurança.

Pode-se também descrever este método como o adotado para assegurar que, nas zonas críticas da peça, as resistências dos materiais divididas por um coeficiente de segurança previamente fixado não sejam ultrapassadas pelas tensões máximas produzidas pelo carregamento.

O uso apenas do coeficiente interno não configura um estado seguro para a estrutura, uma vez que em configurações complexas ou certos estados de carregamentos, foi percebido que a estrutura se aproximava em demasia do carregamento que caracterizaria a ruptura da estrutura (ATAÍDE; CORRÊA, 2006). Logo, o dimensionamento adotando-se apenas um coeficiente interno não confere garantia total de segurança.

No intuito de se corrigir este defeito, tentando reparar esta lacuna que o método deixa, foi proposto o coeficiente de segurança externo (γ_e). Sua utilização

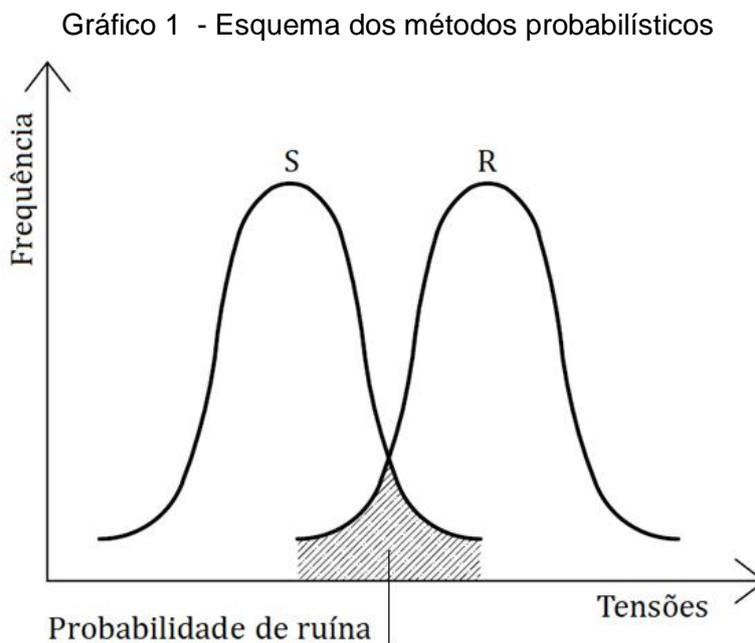
prioriza elementos que podem apresentar problemas de flambagem e que não possuam contenções laterais adequadas.

O princípio do coeficiente externo é o mesmo do coeficiente interno, buscando reduzir o valor da tensão máxima que pode ocorrer na estrutura, distanciando-a da tensão que levaria à ruptura, ou seja, o princípio de reduzir o valor da tensão para buscar garantir a segurança da estrutura é aplicado duplamente.

Vale salientar que com a aplicação deste método, não se pode fazer a verificação de situações de serviço que poderiam invalidar o uso da estrutura, como por exemplo, o surgimento de grandes deformações, fissurações, entre outros. Sendo assim, este método não oferece meios suficientes para a análise completa de todos os fatores que determinam o projeto estrutural.

2.5.2 Método probabilístico

Os métodos probabilísticos para verificação da segurança são baseados na probabilidade de ruína, conforme indica o Gráfico 1.



Fonte: O Autor (2019)

O valor da probabilidade de ruína ($Prof_f$) é fixado por normas e embutido nos parâmetros especificados, levando em consideração aspectos técnicos, políticos, éticos e econômicos (PINHEIRO; MUZARDO; SANTOS, 2007). A condição de ruína se caracteriza quando a resistência R é alcançada pela solicitação S , logo:

$$Prof_f = P[R \leq S] \quad (16)$$

Ocorre um problema de suprimento *versus* demanda, onde se avalia a probabilidade de que a demanda (S) exceda a capacidade de suprimento (R), durante a vida útil da mesma.

Deve-se salientar que não existe segurança absoluta. O risco sempre existe, mesmo que o projeto, execução e controle estejam dentro dos mais rigorosos padrões.

Uma probabilidade ($Prof_f$) pode ser concebida de duas maneiras:

- Limite para o qual tende a frequência relativa da ocorrência do evento, para um número n grande de repetições;
- Medida subjetiva do grau de confiança na ocorrência do evento.

Quanto menor a probabilidade de ruína maior será o nível de segurança. Assim, deve-se utilizar o valor de $Prof_f$ que compatibilize economia com segurança adequado para a necessidade.

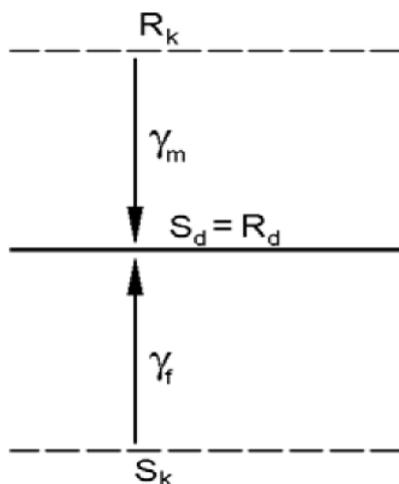
2.5.3 Método semi-probabilístico

Constitui um progresso em relação aos anteriores, pois:

- Introduz dados estatísticos e conceitos probabilísticos de maneira racional e sistemática;
- Aborda de forma mais dinâmica estruturas de comportamento não linear, tendo uma melhor compreensão de como a estrutura responde diante de cargas e deslocamentos;
- A crítica mais séria é que, em se tratando de método híbrido, não é possível determinar-se um coeficiente global de segurança.

Este método pode ser representado pelo esquema da Figura 1, sendo R_k e S_k os valores característicos de resistência e de solicitação, respectivamente. Já R_d e S_d são os valores de cálculo de resistência e de solicitação, respectivamente.

Figura 1 - Esquema do método semi probabilístico.



Fonte: Pinheiro, Muzardo e Santos (2007)

A ideia básica é:

- Majorar ações e esforços solicitantes (valores representativos das ações), resultando nas ações e solicitações de cálculo, de forma que a probabilidade desses valores serem ultrapassados é pequena;
- Reduzir os valores característicos das resistências (f_k), resultando nas resistências de cálculo, com pequena probabilidade dos valores reais atingirem esse patamar;
- Equacionar a situação de ruína, fazendo com que o esforço solicitante de cálculo seja igual à resistência de cálculo.

Neste método, o nível de segurança de uma estrutura é determinado pela capacidade que ela possui de suportar as várias ações que vierem a solicitá-la durante sua vida útil, sem atingir qualquer estado limite.

Os estados limites últimos estão relacionados ao esgotamento da capacidade resistente da estrutura, ou seja, ao colapso. Estes deverão ter uma

probabilidade de ocorrência pequena, pois pode resultar em perda de vidas humanas (ATAÍDE; CORRÊA, 2006).

Como definido pela Norma Brasileira NBR 6118 (ABNT, 2014), os estados-limites de serviço são aqueles relacionados ao conforto do usuário e à durabilidade, aparência e boa utilização das estruturas, seja em relação aos usuários, seja em relação às máquinas e aos equipamentos suportados pelas estruturas.

O método semi-probabilístico permite um processo mais racional para o dimensionamento, pois envolve a identificação de todos os modos de colapso ou situações em que a estrutura deixaria de atender aos requisitos para os quais foi projetada, e a determinação de níveis satisfatórios de segurança para cada estado limite.

Graças aos avanços tecnológicos e em pesquisas científicas, a aplicação deste método vem se tornando cada vez mais intensa, como por exemplo, no processo de atualização de normas antigas que usualmente adotavam o método das tensões admissíveis. Atualmente busca-se substituir o emprego deste método e atualizar as normas para adoção do método semi-probabilístico, que permite uma análise mais eficiente e de melhor adaptação às condições de carregamento e geometria.

2.6 Corrosão

O processo de corrosão se configura como a perda de material, ou seja, um desgaste da estrutura. Esse desgaste ocasiona o enfraquecimento estrutural, criando pontos ou áreas frágeis onde o risco de falha se eleva bastante se comparado com os demais pontos da estrutura.

Dentro dos problemas de falhas na indústria dutoviária, estima-se que grande parte está atribuída a processos de corrosão (LEMOS; OLIVEIRA; SILVA, 2016), como pode ser observado na Tabela 1.

Tabela 1 - Mecanismos causadores de falha na indústria.

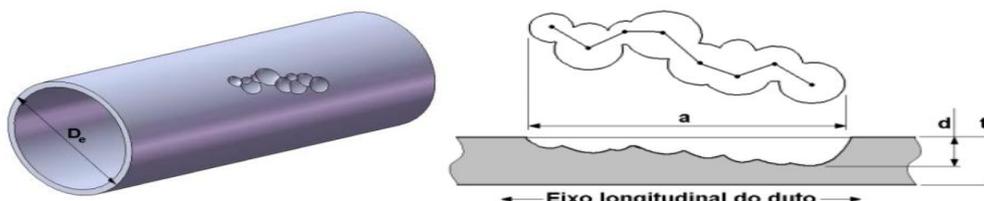
Mecanismo	Porcentagem
Corrosão	29
Fadiga	25
Fratura frágil	16
Sobrecarga	11
Corrosão em alta temperatura	7

FONTE: Adaptado de Lemos, Oliveira e Silva (2016)

Embora as tubulações sejam uma forma muito segura de transporte de energia, no caso de falhas dos dutos, o óleo e o gás derramados podem causar um perigo considerável para o ambiente e para a população circundante. (MAHMOODIAN; LI, 2017).

Os processos de corrosão são considerados reações químicas heterogêneas ou reações eletroquímicas que se passam geralmente na interface do metal com o meio corrosivo (SILVA, 2016). A reação química que causa a corrosão, exemplificada na Figura 2, produz deterioração no material espontaneamente, mudando suas propriedades e levando a perda da resistência e durabilidade.

Figura 2 - Representação de defeitos de corrosão em dutos.

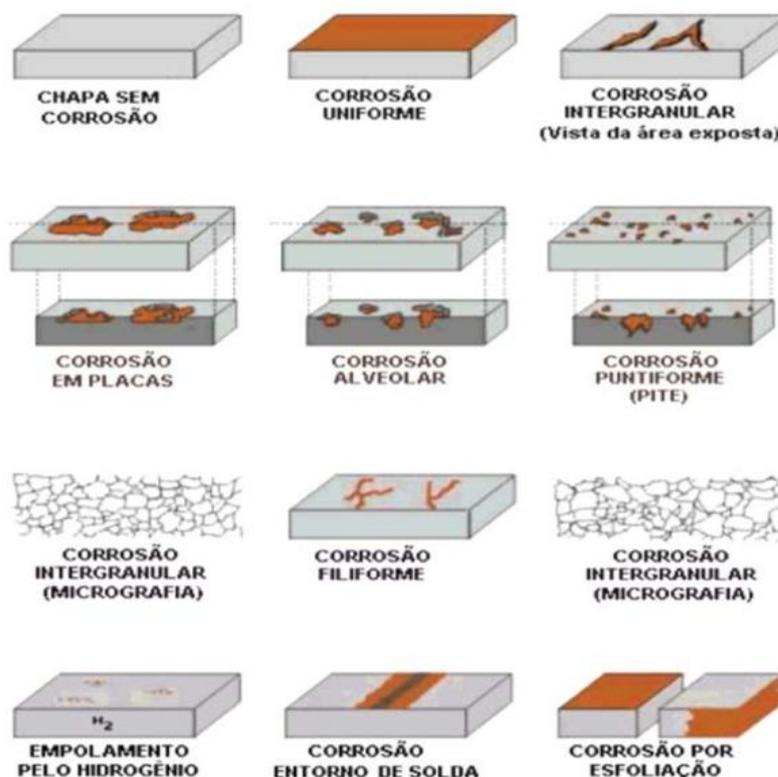


FONTE: Toro (2014)

A corrosão pode se apresentar em variadas formas e pode ser classificada através de sua aparência no metal corroído (TORO, 2014). As principais características, para a classificação (Figura 3), são as seguintes:

- Uniforme: a corrosão encontra-se distribuída ao longo de toda a superfície da estrutura e é produzida pelo contato com o meio corrosivo, causando perda uniforme na espessura.
- Por placas: localiza-se em alguns setores da superfície sendo não uniforme, formando placas ou cavações de profundidade constante.
- Alveolar: manifesta-se na superfície metálica produzindo cavidades com fundo arredondado e profundidade menor que o seu diâmetro.
- Puntiforme ou por pites: caracteriza-se por ser uma forma localizada na superfície metálica, comumente seu fundo tem forma angulosa e sua profundidade é maior que seu diâmetro.
- Intergranular ou intercristalina: a corrosão se produz entre os grãos da rede cristalina do material metálico, o qual perde suas propriedades mecânicas e pode fraturar quando solicitado por esforços mecânicos, tendo-se a corrosão sob tensão fraturante.
- Intrangular ou transgranular ou transcristalina: a corrosão se produz nos grãos da rede cristalina que perdendo suas propriedades mecânicas, pode fraturar a baixa solitação mecânica, tendo-se também corrosão sob tensão fraturante.
- Por esfoliação: A corrosão se processa de forma paralela à superfície metálica. Este tipo de corrosão ocorre em chapas, cujos grãos foram achatados ou alongados.

Figura 3 - Formas de corrosão.



FONTE: Toro (2014)

2.7 Confiabilidade estrutural

2.7.1 Formulação dos problemas de confiabilidade estrutural

A confiabilidade estrutural é uma ferramenta que permite ao engenheiro estrutural quantificar as incertezas nas variáveis do seu projeto e auxiliá-lo na tomada de decisões com mais segurança (SAGRILO, 1994).

O estudo da confiabilidade estrutural tem como foco o cálculo e a predição da probabilidade de que seja violado o estado limite da estrutura em qualquer estágio durante o seu tempo de vida (MELCHERS; BECK, 2018).

A probabilidade de violação do estado limite é uma medida numérica da chance desse evento ocorrer. Esta medida pode ser obtida a partir de medições da frequência de ocorrência do evento em longo prazo para estruturas similares,

ou pode ser simplesmente uma estimativa subjetiva do valor numérico (MELCHERS; BECK, 2018). Na prática, pode-se considerar que não é possível observar uma estrutura por um período de tempo suficientemente longo, assim o que se faz é uma combinação de estimativas e observações de frequência em componentes estruturais e em certas propriedades e a partir desta combinação prever a probabilidade de violação do estado limite da estrutura.

Os métodos de análise de confiabilidade estrutural são baseados em conceitos probabilísticos e procuram avaliar a probabilidade de falha de uma maneira racional (SAGRILLO, 1994). Mesmo que os princípios de confiabilidade estrutural sejam muito antigos, só com o maior desenvolvimento de técnicas matemáticas e estatísticas por volta da década de 80 foi possível avançar nos estudos. Nos últimos tempos, os avanços tecnológicos permitiram um desenvolvimento ainda maior das técnicas de confiabilidade, uma vez que se tornou possível a aplicação de poderosos processadores computacionais que permitem a realização de cálculos, antes considerados impossíveis.

Para abordar de forma apropriada os problemas de confiabilidade estrutural é fundamental perceber que os carregamentos em estruturas variam ao longo do tempo (BECK, 2012). Desta forma, em um problema de confiabilidade estrutural típico, os carregamentos são representados por processos estocásticos.

Em problemas envolvendo um único carregamento, o interesse central está no máximo valor que este carregamento atinge ao longo de determinado período de utilização ou ao longo da vida útil da estrutura. O valor máximo de um processo estocástico em determinado intervalo de tempo é uma variável aleatória. Isto permite converter um problema de confiabilidade estrutural dependente do tempo em um problema independente do tempo, pois o carregamento aplicado no estudo será o seu valor máximo já considerando as variações futuras provocadas pelo fator tempo.

Em geral, mais de um carregamento atua simultaneamente em uma estrutura. Em alguns casos, podem-se utilizar técnicas de combinação de carregamentos para determinar um carregamento equivalente. Isto pode ou não permitir a conversão para um problema de confiabilidade estrutural independente

do tempo, a depender da capacidade desta técnica de combinação em reunir num único valor todos os esforços máximos que podem vir a agir sobre a estrutura.

A resistência de estruturas e membros estruturais também varia com o tempo, ainda que de forma mais lenta do que os processos de carregamento. A propagação de trincas de fadiga, a corrosão e o desgaste são fenômenos típicos que levam à redução da resistência ao longo do tempo. A fluência é outro fenômeno dependente do tempo que afeta a resistência estrutural.

As variáveis podem apresentar diferentes comportamentos, assim como a estrutura apresentará uma reação diferente para cada configuração e mesmo dentro de uma mesma configuração, pode-se ter um comportamento distinto. Isso ocorre porque as variáveis envolvidas sempre carregam consigo um grau de incerteza associado.

Este grau de incerteza leva a possibilidade de que uma estrutura tenha respostas diferentes e se comporte de forma diferente a um mesmo carregamento, por exemplo. Considerar as incertezas inerentes às variáveis no desenvolvimento do projeto é uma importante ferramenta fornecida pela confiabilidade estrutural que permite minimizar os riscos de que a estrutura venha a falhar.

2.7.2 Classificação das incertezas na análise estrutural

Diversos sistemas naturais podem resultar numa análise muito limitada se descritos apenas deterministicamente (KROETZ, 2015). Em diversas situações cotidianas as descrições clássicas servem muito bem, mas quando os sistemas estudados se tornam mais complexos, ou quando a precisão das previsões necessita ser maior, é comum que as descrições clássicas se tornem inadequadas.

Devido, tanto a complexidade de inúmeros fenômenos, quanto ao caráter naturalmente estocástico de outros fenômenos, tem-se o fato de que melhores descrições e representações dos citados fenômenos são realizadas ao serem aplicadas ferramentas da probabilidade e da estatística.

As várias incertezas relacionadas ao projeto, fabricação e uso de uma estrutura podem ser classificadas em incertezas normais e incertezas associadas a erros humanos e outros fatores que independem do engenheiro estrutural (SAGRILO, 1994).

As incertezas normais podem ser ainda subdivididas em incertezas inerentes ou fundamentais e incertezas devido ao incompleto ou imperfeito conhecimento na avaliação das cargas, solicitações e resistência de uma estrutura. As incertezas inerentes ou fundamentais resultam da variabilidade natural de uma determinada variável, por exemplo, altura de onda, velocidade do vento, entre outras. Estas incertezas não podem ser eliminadas com um maior número de informações.

As incertezas devido ao imperfeito ou incompleto conhecimento, também denominadas como epistêmicas, estão diretamente relacionadas à quantidade limitada de dados para definir estatisticamente as incertezas fundamentais e à imperfeição nos modelos matemáticos usados para calcular cargas, solicitações e a capacidade resistente de uma estrutura. Estas incertezas podem ser reduzidas a partir de um número maior de informações ou através do emprego de modelos matemáticos mais precisos.

Incetezas associadas a erros humanos e outros fatores, tais como sabotagem, colisões, entre outras, estão presentes no projeto, execução, manutenção e uso de uma estrutura e podem ser reduzidas através de mecanismos como controle de qualidade, inspeções, sistemas de alarme, etc.

As incertezas normais podem ser representadas através de variáveis aleatórias enquanto que as incertezas associadas a fatores humanos não podem. Estas últimas podem ser tratadas através de uma taxa de ocorrência a partir de um histórico de observações e contempladas no âmbito da confiabilidade de sistemas.

A análise de confiabilidade estrutural determina a probabilidade de uma estrutura falhar associada às incertezas normais e não contempla aquelas relacionadas a erros humanos.

2.7.3 Definição de probabilidade de falha

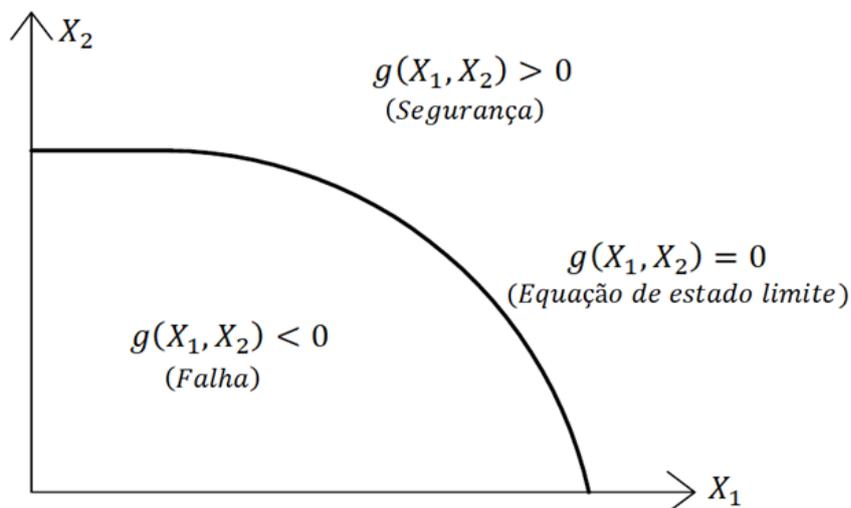
Sagrilo (1994) explica que a avaliação da probabilidade de falha é baseada numa função de desempenho do sistema analisado. Esta função é conhecida como função de estado limite, ou função de falha ou margem de segurança e é denominada $g(\mathbf{X})$, onde \mathbf{X} como já citado é um vetor que inclui todas as variáveis aleatórias consideradas na análise.

Esta função segue o conceito de formular uma expressão que relacione resistência (R) e sollicitação (S), assim tem-se a função base de toda a análise de confiabilidade:

$$g(\mathbf{X}) = Z = R - S \quad (17)$$

No caso bidimensional, ou seja, com duas variáveis aleatórias X_1 e X_2 e considerando a equação de estado limite como $g(\mathbf{X}) = g(X_1, X_2) = 0$ tem-se que $g(\mathbf{X})$ é uma superfície conhecida como superfície de falha. O Gráfico 2 mostra as regiões de segurança e de falha.

Gráfico 2 - Definição de função de falha.

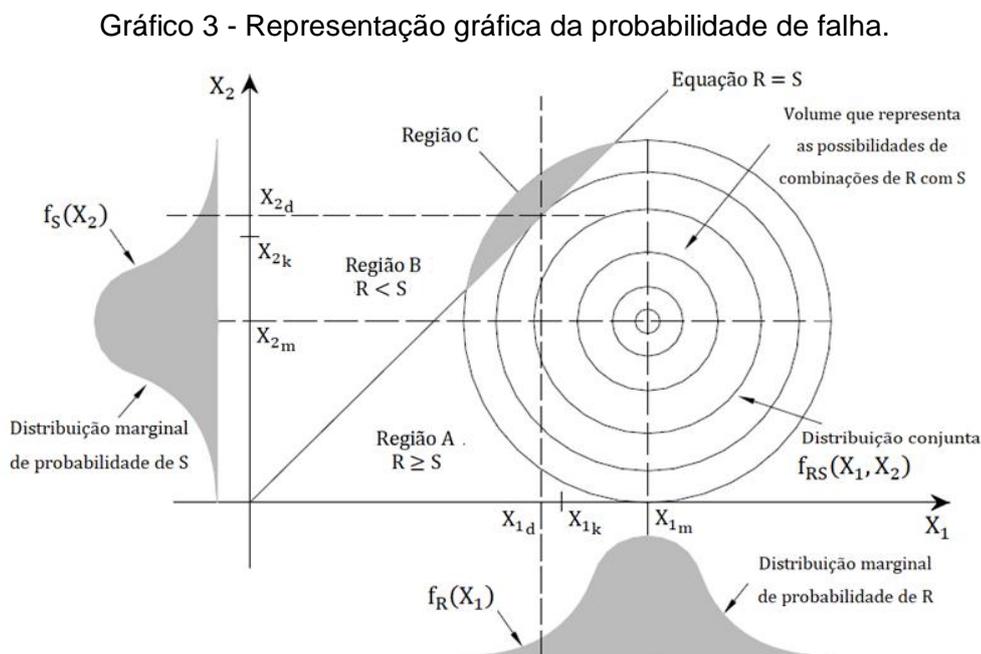


FONTE: O Autor (2019)

Sendo a função de falha escrita em termos de resistência e solitação, têm-se as três combinações para a função de falha que representam os três possíveis resultados para a função:

- Valores positivos ($R > S$);
- Valores negativos ($R < S$);
- Valores nulos ($R = S$).

A representação do comportamento da probabilidade de falha pode ser observada no Gráfico 3, sendo R e S estatisticamente independentes, representadas pela distribuição de probabilidade de cada uma delas. A partir da combinação entre as distribuições individuais de probabilidade tem-se a função densidade de probabilidade conjunta $f_{RS}(X_1, X_2)$ das variáveis R e S representada pelas curvas de nível do Gráfico 3, que caracteriza a representação 2D do comportamento da função densidade de probabilidade conjunta. Os índices m , k e d representam as faixas que caracterizam os valores médio, característico e de calculo respectivamente.



FONTE: Adaptado de Paliga (2008)

2.7.4 Espaço normal padrão reduzido e índice de confiabilidade

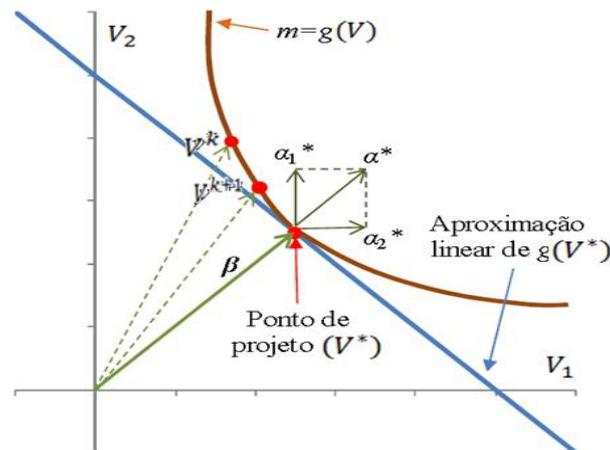
A avaliação da probabilidade de falha para um sistema $R - S$, com duas variáveis aleatórias gaussianas X_1 e X_2 , pode ser feita com a utilização de variáveis gaussianas normais padrão, V_1 e V_2 , no espaço reduzido (BECK, 2012). Assim, tem-se:

$$\begin{cases} V_1 = \frac{X_1 - \mu_{X_1}}{S_{X_1}} \\ V_2 = \frac{X_2 - \mu_{X_2}}{S_{X_2}} \end{cases} \quad (18)$$

O objetivo da transformação das variáveis aleatórias gaussianas em variáveis normais padrão é a eliminação da correlação entre as variáveis, permitindo aproximar a superfície de falha $g(\mathbf{X})$ por uma curva linear $g(\mathbf{V})$.

A aproximação pela curva linear é demonstrada no Gráfico 4, onde se observa a superfície de falha $g(V_1, V_2) = 0$ no espaço das variáveis reduzidas.

Gráfico 4 - Representação da superfície de falha no espaço reduzido.



FONTE: Adaptado de Carvajalino (2010)

A distância da reta $g(V_1, V_2) = 0$ até a origem, no espaço das variáveis reduzidas, é igual a:

$$\beta = |\mathbf{V}^*| \quad (19)$$

Tendo que a menor distância até a origem pode ser representada da seguinte forma:

$$\mathbf{V}^* = -\alpha\beta \quad (20)$$

onde, α é o vetor normal à superfície de falha no ponto de projeto. Assim, a superfície de falha pode ser escrita em termos do índice de confiabilidade e das variáveis normais padrão estaticamente independentes, conforme equação abaixo.

$$g(\mathbf{V}) = \beta - \sum_{i=1}^n \alpha_i V_i \quad (21)$$

Através da determinação do índice de confiabilidade pode-se buscar quantificar não o risco, mas o grau ou nível de segurança, podendo entender como a representação do quão confiável é a estrutura.

O Joint Committee on Structural Safety (JCSS) propôs em 2001 os índices de confiabilidade alvo para o estado limite último e suas respectivas probabilidades de falhas (Tabelas 2 e 3).

Tabela 2 - Índice de Confiabilidade alvo, segundo a JCSS (2001).

Custo relativo da medida de segurança	Consequências de Falha		
	Mínimas	Moderadas	Elevadas
Alta	3,1	3,3	3,7
Normal	3,7	4,2	4,4
Pequena	4,2	4,4	4,7

Fonte: Adaptado de JCSS (2001).

Tabela 3 - Probabilidade de Falha, segundo a JCSS (2001).

Custo relativo da medida de segurança	Consequências de Falha		
	Mínimas	Moderadas	Elevadas
Alta	10-3	5.10-4	10-4
Normal	10-4	10-5	5.10-6
Pequena	10-5	5.10-6	10-6

Fonte: Adaptado de JCSS (2001).

Para o estado limite de serviço irreversível são apresentados na Tabela 4 os valores propostos dos índices de confiabilidade alvo e de probabilidade associada.

Tabela 4 - Índice de confiabilidade e probabilidade de falha associada para estado limite de serviço irreversível, segundo JCSS (2001).

Custo relativo da medida de segurança	Índice de Confiabilidade	Probabilidade de Falha
Alta	1,3	10-1
Normal	1,7	5.10-2
Pequena	2,3	10-2

Fonte: Adaptado de JCSS (2001).

2.7.5 Probabilidade de falha anual e total

Os dados contidos nas Tabelas 2, 3 e 4 são referenciados para um período normalizado de um ano, período base utilizado na análise de confiabilidade. Logo esta probabilidade de falha citada corresponde a probabilidade de falha anual.

Para os casos onde o período de tempo da análise supera um ano, ou seja, para um período de n_L anos, supõe-se que a ocorrência dos carregamentos

extremos anuais sejam eventos estatísticos independentes. Assim, a probabilidade de falha total ($Prob_f^{n_L}$) para n_L anos pode ser obtida via:

$$Prob_f^{n_L} = 1 - (1 - Prof_f)^{n_L} \quad (22)$$

Sendo $Prof_f$ a probabilidade de falha anual.

2.7.6 Variável Erro do Modelo

Na expressão (17), tem-se duas parcelas constituintes, a solicitação e a resistência. Na análise de confiabilidade esses valores podem ser calculados de forma matemática através de formulações pré-determinadas. Isso faz com que os valores obtidos não sejam valores reais, que seriam os valores obtidos em testes de laboratório.

O valor utilizado não representa a condição real e sim uma aproximação feita através de cálculos. Isso leva ao fato de que o resultado obtido possa se distanciar da condição real, levando a uma análise ou a um dimensionamento que se distanciam das condições verdadeiras.

A variável Erro do Modelo busca justamente corrigir essa distorção entre os valores reais e os valores calculados, aplicando-se um fator de correção na expressão (17), alterando o valor obtido matematicamente e o aproximando ao valor que se configuraria como o real.

Pode-se aplicar a variável Erro do Modelo para as duas parcelas da expressão (17). Pode-se ter então um erro para a parcela de resistência e um erro para a parcela de solicitação.

A variável Erro do Modelo é obtida via comparação entre os resultados reais, obtidos em laboratório utilizando ensaios (experimentos), e valores teóricos, determinados por modelos matemáticos. A relação matemática usada na obtenção da variável pode ser descrita da seguinte forma:

$$X_M = \frac{P_{Experimental}}{P_{Teórico}} \quad (23)$$

Sendo X_M uma variável aleatória que representa o fator do Erro do Modelo, $P_{Experimental}$ é o valor real, ou seja, o valor obtido via laboratório e $P_{Teórico}$ é o valor predito pelo modelo de cálculo adotado.

Os valores da pressão de falha obtidos em ensaios laboratoriais são realizados a partir de testes de ruptura em dutos existentes que possuem o processo de corrosão e que foram retirados de uso ou em dutos novos em que o defeito de corrosão foi inserido mecanicamente produzidos por usinagem, como por exemplo, com o uso de uma fresadora

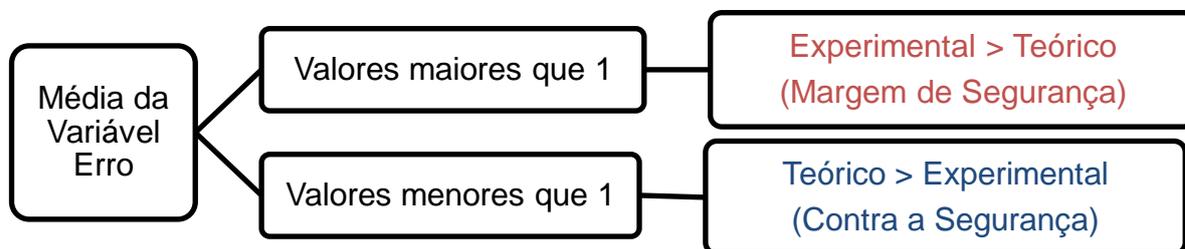
A variável Erro do Modelo é determinada a partir de uma sequência de análises, adotando como valor final a média dos valores obtidos, através da seguinte expressão:

$$\overline{X_M} = \frac{1}{s} \sum_{t=1}^s (X_M)_t \quad (24)$$

sendo, $\overline{X_M}$ o valor médio da variável aleatória e s o tamanho de amostras analisada. Após a determinação da variável Erro do Modelo, realiza-se sua caracterização por meio da construção de histogramas, que ajudam a encontrar a distribuição de probabilidade que melhor representa o comportamento dos dados (TORO, 2014). Tem-se por necessária a obtenção do desvio padrão da variável, que representa a dispersão do modelo.

Com o valor médio da variável Erro do Modelo, pode-se indicar o quão conservador é o mesmo, representando o caráter de tendenciosidade do modelo de cálculo adotado. Quando os valores de pressão de falha teóricos são inferiores aos valores de pressão de falha obtidos em laboratório obtém-se um valor de X_M superior à unidade, significando um resultado conservador. Para o caso inverso, quando os valores teóricos superam os valores reais tem-se a situação onde o modelo prediz valores de resistências superiores aos obtidos na prática, estando contra a segurança. Essa relação é demonstrada no Fluxograma 1.

Fluxograma 1 - Fluxograma do comportamento da variável Erro do Modelo.



FONTE: O Autor (2019)

Com o valor médio, é possível corrigir o modelo matemático utilizado, aproximando os resultados teóricos e reais. Para isso, utiliza-se a expressão:

$$P_{F,Corrigida} = P_F \overline{X_M} \quad (25)$$

onde P_F é a pressão de falha obtida pela modelagem e $P_{F,Corrigida}$ seu valor após a correção.

2.7.7 Variáveis utilizadas na confiabilidade estrutural

Visto que a ferramenta da análise de confiabilidade estrutural é um recurso que pode ser aplicado em diferentes estruturas, há para cada estrutura analisada um conjunto de variáveis que irão determinar a geometria e as características específicas de cada estrutura estudada. Por exemplo, para o caso do estudo de estruturas de concreto, a resistência à compressão será uma variável importante a ser considerada. Porém, para a análise em pás eólicas, aplicadas na produção de energia eólica, deve-se levar em consideração outro conjunto de variáveis como a resistência do elemento ao cisalhamento, tensões do material, módulo de elasticidade, velocidade máxima de rotação das pás, entre outros que se ache necessário analisar.

No entanto, a estrutura geral de formato de cálculo e análise se mantém, sendo o estudo realizado em cima da determinação de uma função de falha, que relacione a resistência e a sollicitação. Assim, pode-se afirmar que essas duas

variáveis serão recorrentes em todos os estudos, havendo sempre a determinação da parcela resistente e da parcela solicitante.

Outras variáveis que sempre estão presentes na análise de confiabilidade são as variáveis que representam os critérios de segurança, ou seja, a função de falha e o índice de confiabilidade. Pode-se afirmar que neste método sempre se terá a função de falha, obtendo-se como resultado final o índice de confiabilidade e a probabilidade de falha.

Até mesmo a variável Erro do Modelo, detalhada anteriormente, pode ser considerada uma variável recorrente na análise de confiabilidade estrutural, uma vez que ela é usada para corrigir alguma distorção entre o valor predito matematicamente para a parcela resistiva ou a parcela solicitante com seu valor real, oriundo de ensaios. Desta forma sempre que alguma das parcelas da função de falha for obtida de forma indireta, pode-se aplicar a citada variável para que se faça a correção do valor.

O que irá alterar de uma estrutura para outra é justamente as variáveis que embasam os cálculos das parcelas resistentes e solicitantes da função de falha, ou seja, as variáveis utilizadas na predição da resistência e da solicitação da estrutura.

As variáveis que se fazem presente no cálculo da parcela resistente podem ser observadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Variáveis utilizadas na confiabilidade de dutos sujeitos a corrosão.

Variável	Símbolo
Tensão circunferencial	σ_{rup}
Tensão de fluxo	σ_{flow}
Tensão de escoamento do aço	σ_Y
Tensão última do aço	σ_U
Diâmetro externo do duto	D
Diâmetro interno do duto	D_{int}
Espessura do duto	t
Profundidade máxima do defeito	d
Profundidade do defeito no tempo zero	d_0
Largura máxima do defeito	L_e
Largura do defeito no tempo zero	L_0
Variação temporal	ΔT
Taxa de corrosão radial	R_d
Taxa de corrosão longitudinal	R_L

Fonte: O Autor (2019)

A tensão de fluxo (σ_{flow}) é proporcional à tensão de escoamento (σ_Y) ou à tensão última (σ_U), podendo variar de acordo com o material e do modelo de cálculo da pressão de falha (TORO, 2014)

Cada variável representa um fator de contribuição dentro da análise, e gera um determinado impacto na resposta final da análise de confiabilidade. Assim, cada variável possui seu fator de importância verificado através de análise de sensibilidade.

Algumas variáveis possuem fatores de importância superiores, representando as variáveis mais representativas dentro do estudo e que devem ser consideradas variáveis aleatórias. As demais possuem fatores de importância menos expressivos e podem ser consideradas como determinísticas.

A escolha das variáveis aleatórias adotadas nesta pesquisa foi embasada nas análises de sensibilidade citadas na seção 1.3, optando-se pelas variáveis que se mantiveram com alto fator de importância entre os diversos estudos realizados, ou seja, a variável Erro do Modelo, a pressão aplicada e a profundidade do defeito.

Como visto, tem-se dois tipos de profundidade e dois tipos de largura, isso se deve ao fato de que com o passar do tempo o defeito de corrosão tende a se agravar, aumento em profundidade e em largura.

No momento em que é feita a vistoria do duto e o defeito é notado tem-se o tempo zero, tendo assim sua condição inicial. A medida que há uma variação temporal tem-se o aumento nas propriedades geométricas do defeito elevando a sua profundidade e largura.

A forma como é calculado esse crescimento realiza-se de diversas maneiras. Nos últimos anos, cada vez mais se pesquisam formas eficientes de representar esse crescimento do defeito, sendo um trabalho complexo uma vez que o defeito de corrosão é influenciado por diversos fatores, se comportando de diversas formas a depender do ambiente.

Na literatura já existem algumas formulações que determinam expressões não lineares para o crescimento do defeito de corrosão, como é comentado em Bisaggio (2014). No entanto, as formulações não lineares carregam um grau de complexidade mais elevado e possuem uma aplicação mais eficiente para dutos enterrados ou submersos, uma vez que tais formulações em geral, apresentam

variáveis estabelecidas em função do tipo do solo ou da água que ambienta o duto.

2.8 Método para análise de confiabilidade estrutural: método FORM

O método analítico para análise de confiabilidade estrutural FORM, do inglês *First Order Reliability Method*, é um método que possibilita o cálculo do índice de confiabilidade através de transformações nas variáveis aleatórias que definem o problema, evitando a integração numérica (MELCHERS, 1999).

O FORM propicia, na maioria dos problemas, uma precisão satisfatória com um tempo de análise computacional reduzido quando comparado a outros métodos, o que justifica sua larga utilização nas mais diversas aplicações de projeto (ALMEIDA, 2008).

Os principais desafios no método FORM são a transformação das variáveis em variáveis normais padrão e a busca ao ponto de projeto V^* .

A transformação de variáveis envolve a eliminação da correlação entre variáveis aleatórias e o cálculo das variáveis normais equivalentes. Representando assim, um mapeamento um a um e levando os pontos do espaço de projeto X para o espaço normal padrão V .

A metodologia mais difundida em confiabilidade estrutural para a transformação das variáveis aleatórias X em variáveis normais padrão e estaticamente independentes V , é baseada na transformação das variáveis normais correlacionadas em variáveis normais estatisticamente independentes. Para mais detalhes sobre o processo de transformação das variáveis, consultar Sagrilo (1994).

Um dos passos fundamentais para o cálculo do índice de confiabilidade pelo método FORM é o de encontrar o ponto V^* sobre a superfície de falha mais próximo à origem. Este ponto é chamado de ponto de projeto ou ponto mais provável de falha. Para encontrar o ponto de projeto no espaço das variáveis reduzidas, desenvolve-se uma expressão iterativa com as condições:

$$\begin{cases} \text{Minimize } |\mathbf{V}| \\ \text{Sujeito a } g(\mathbf{V}) = 0 \end{cases} \quad (26)$$

Para resolver este problema é utilizado o algoritmo da análise de confiabilidade estrutural, inicialmente desenvolvido por Hasofer e Lind (1974) e aprimorado por Rackwitz e Fiessler (1978). Este algoritmo é conhecido também como HL-RF e é resumido pela seguinte expressão recursiva:

$$\mathbf{V}^{k+1} = \frac{1}{|\nabla g(\mathbf{V}^k)|^2} [\nabla g(\mathbf{V}^k)^T \mathbf{V}^k - g(\mathbf{V}^k)] \nabla g(\mathbf{V}^k)^T \quad (27)$$

onde,

$\nabla g(\mathbf{V}^k)$ é o gradiente da função de falha no espaço reduzido, avaliado no ponto \mathbf{V}^k ;

$g(\mathbf{V}^k)$ é o valor da função de falha, também avaliado no ponto \mathbf{V}^k .

O algoritmo converge quando a seguinte condição é atendida:

$$\frac{|\mathbf{V}^{k+1}| - |\mathbf{V}^k|}{|\mathbf{V}^{k+1}|} \leq Tol \quad (28)$$

adotando Tol como uma tolerância limite e sendo \mathbf{V}^{k+1} o ponto avaliado e \mathbf{V}^k o ponto anteriormente avaliado.

2.9 Formas de obtenção da função de falha

Neste trabalho, a função de falha será definida pela diferença entre a resistência R e a solicitação S . Esta última representa o valor da solicitação ou esforço atuante, como a pressão interna atuando sobre as paredes do duto. Já a resistência representa o máximo esforço a que o duto é capaz de suportar sem entrar em colapso. A obtenção deste valor pode ser feita basicamente por três formas.

- Métodos semi-empíricos, representam a aplicação de formulações genéricas e de notório conhecimento na literatura. Podem implicar uma excessiva simplificação da geometria e apresentam um elevado grau de conservadorismo, no entanto representa a formulação com menor peso computacional e de maior aplicação na literatura representando uma forma ágil de se realizar o estudo.

- A segunda formulação consiste na construção de um modelo matemático substituto simplificado que representa uma aproximação à condição real da estrutura. O cálculo da pressão de falha é realizado neste modelo substituto. Cria-se um conjunto de modelos substitutos, obtendo-se um conjunto de valores de pressão de falha para com estes valores se criar uma superfície de falha constituída pela interpolação dos valores de pressão de falha obtidos para os modelos substitutos. A partir desta superfície, os valores de pressão de falha são obtidos diretamente pela mesma. Possui um custo computacional mais elevado do que a aplicação de formulações empíricas e um tempo de processamento relativamente maior, uma vez que a análise de cada modelo substituto é feita com a aplicação de técnicas de Elementos Finitos. No entanto, definida a superfície de falha, a obtenção do valor de pressão é determinada de maneira mais rápida. Esta formulação tende a apresentar resultados mais precisos.
- O método dos Elementos Finitos possui dentre as três formulações a melhor acurácia. No entanto, este método apresenta um elevado custo computacional. Representa uma forma mais rápida e econômica se comparado com os experimentos laboratoriais.

Nesta pesquisa aplica-se apenas os métodos semi-empíricos, sendo detalhados com mais ênfase no próximo item.

2.10 Modelos analíticos semi-empíricos

A formulação básica dos modelos de predição da falha do duto é baseada nos critérios da equação NG – 18 *Surface Flaw Equation* (MELCHERS, 1999), apresentada abaixo.

$$\sigma_{rup} = \sigma_{flow} f_R \quad (29)$$

onde, σ_{rup} é a tensão circunferencial da parede do duto no instante da ruptura, σ_{flow} é a tensão de fluxo, podendo ser proporcional a tensão de escoamento ou tensão última e f_R é o fator de redução. Assim σ_{rup} representa uma tensão fragilizada, ou seja, o fator de redução representa a fragilização que o processo de corrosão causa na seção intacta.

O fator de redução pode ser definido da seguinte forma:

$$f_R = \frac{1 - \lambda \frac{A}{A_0}}{1 - \lambda \left(\frac{A}{A_0}\right) M^{-1}} \quad (30)$$

Onde, $A_0 = L_e t$ é a área original da região corroída, $A = L_e d$ é a área corroída, λ é o fator empírico relacionado com a forma geométrica do defeito utilizada para representar a área de material perdido, L_e é o comprimento do defeito, d é a profundidade máxima do defeito, M é o fator de dilatação (fator Folias) e t é a espessura do duto.

A tensão circunferencial (*hoop stress*) é obtida a partir de uma relação da pressão interna do duto pela área da seção transversal da parede, conhecida como fórmula de Barlow. Sendo D o diâmetro externo do duto, tem-se:

$$\sigma_{rup} = \frac{P D}{2 t} \quad (31)$$

No estado limite, considera-se que a pressão interna (P) é igual a pressão de falha (P_f):

$$\sigma_{rup} = \frac{P_f D}{2 t} \quad (32)$$

Substituindo esse valor na relação estabelecida pela equação NG – 18 *Surface Flaw Equation* (expressão 29), tem-se:

$$P_f = \frac{2 t \sigma_{flow}}{D} f_R \quad (33)$$

Pode-se, então substituir o valor do fator de redução (expressão 30), resultando na seguinte expressão para pressão de falha:

$$P_f = \frac{2 t \sigma_{flow}}{D} \frac{1 - \alpha \frac{d}{t}}{1 - \alpha \left(\frac{d}{t}\right) M^{-1}} \quad (34)$$

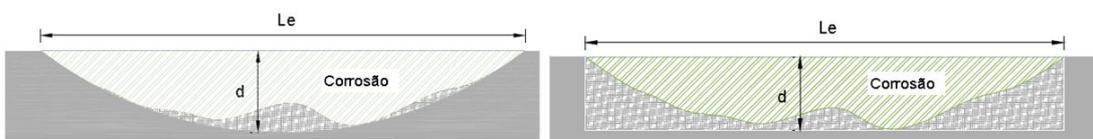
Como mencionado anteriormente, no estado limite, a pressão interna é igual a pressão de falha. Logo a pressão resistente, que representa a resistência (R) do duto na função de falha $g(X)$, torna-se igual a pressão de falha (P_f) (TORO,2014).

Seguindo a formulação da NG – 18 *Surface Flaw Equation*, diversas expressões semi-empíricas para o cálculo da pressão de falha foram propostas. Neste trabalho, serão apresentadas e detalhadas seis expressões semi-empíricas (ASME B31G, ASME B31G Modificada, BS-7910, DNV RP-F101, Formulação de Ahammed e o modelo PCORRC), sendo descritas a seguir. Em todas as expressões as unidades adotadas seguem o Sistema Internacional de Unidades.

2.10.1 ASME B31G

A expressão semi-empírica B31G é estabelecida como uma norma da Associação Norte-Americana de Engenheiros Mecânicos, em inglês *American Society of Mechanical Engineers* – ASME. A expressão determinada pela conhecida ASME B31G considera a forma irregular do defeito de corrosão, como um perfil em forma parabólica como pode ser visto na Figura 4 (a), onde d representa a profundidade do defeito e L_e é a largura do mesmo. Quando o comprimento do defeito aumenta, a representação parabólica da área de perda de metal se torna menos precisa. Para defeitos longos a ASME B31G considera a área de perda de metal como um perfil retangular, sendo mostrado na Figura 4 (b).

Figura 4 - Definição da área corroída considerada



(a) Área parabólica para defeitos curtos (b) Área retangular para defeitos longos

FONTE: Toro (2014)

Quando $L_e \leq (20D t)^{0,5}$:

$$P_f = 1,1\sigma_y \frac{2t}{D} \frac{1 - \frac{2}{3} \frac{d}{t}}{1 - \frac{2}{3} \left(\frac{d}{t}\right) M^{-1}} \quad (35)$$

Obtendo-se M por meio de:

$$M = \left\{ 1 + 0,8 \frac{L_e^2}{D t} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (36)$$

Quando $L_e > (20D t)^{0,5}$:

$$P_f = 1,1\sigma_y \frac{2 t}{D} \left(1 - \frac{d}{t} \right) \quad (37)$$

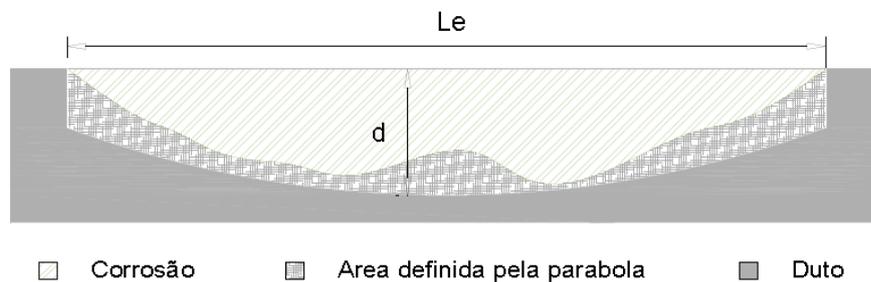
Para esta formulação considera-se que $M \rightarrow \infty$. Sendo σ_y a tensão de escoamento do aço, t é a espessura do duto, D é o diâmetro externo do duto.

2.10.2 ASME B31G Modificada

Os pesquisadores Kiefner e Vieth (1990) desenvolveram algumas modificações nas equações do método B31G, denominando-o B31G Modificado. Tais modificações foram implementadas no programa computacional comercial Rstreng, usado no cálculo da pressão de ruptura e da pressão máxima de operação para o tubo. Por isso, este método também recebe o nome de RSTRENG 085dL. A Associação Norte-Americana de Engenheiros Mecânicos (ASME) agrupa esta formulação também como um processo normativo.

A expressão definida pela norma B31G Modificada apresenta uma aproximação mais exata e menos conservadora do que a expressão B31G no que se refere ao fator de dilatação (M) e para tensão de escoamento média (σ_{flow}), levando em consideração um maior detalhamento na forma do defeito causado pela corrosão, assumindo uma forma parabólica, como pode ser visto na Figura 5.

Figura 5 - Forma geométrica parabólica para área de corrosão.



FONTE: Toro (2014)

A expressão para a pressão de falha é definida como:

$$P_f = (\sigma_y + 68,95MPa) \frac{2t}{D} \frac{1 - 0,85 \frac{d}{t}}{1 - 0,85 \left(\frac{d}{t}\right) M^{-1}} \quad (38)$$

Quando $\left[L_e^2 \left(\frac{1}{Dt} \right) \right] \leq 50$, o fator de dilatação é calculado da seguinte forma:

$$M = \left\{ 1 + 0,6275 \frac{L_e^2}{Dt} - 0,003375 \frac{L_e^4}{D^2 t^2} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (39)$$

Para $\left[L_e^2 \left(\frac{1}{Dt} \right) \right] > 50$, tem-se:

$$M = 0,032 \frac{L_e^2}{Dt} + 3,3 \quad (40)$$

2.10.3 BS-7910

Usando a tensão a tração última do material no lugar da tensão de escoamento na expressão (34), a norma britânica BS – 7910 (2013) define uma expressão mais direta para o cálculo da pressão resistente, uma vez que não necessita de verificações na análise do defeito (no caso de ser curto ou longo) como é realizado nas formulações B31G e B31G Modificada.

As equações apresentadas pela norma britânica BS-7910 (2013) podem ser aplicadas para os casos de defeitos de corrosão localizados na superfície

interna ou externa do duto, múltiplos defeitos de corrosão que interagem entre si e corrosão em soldas.

O formato atual da norma BS-7910 (2013) fornece a seguinte definição para a pressão de falha em termos de tensão:

$$\sigma_{2,ref} = \left[\frac{1 - \left(\frac{d}{t}\right) M^{-1}}{1 - \frac{d}{t}} \right] \sigma_{rup} \quad (41)$$

onde, $\sigma_{2,ref}$ é a tensão de referência, neste caso a tensão última. Utilizando o valor de σ_{rup} obtido na expressão (31), pode-se, isolando o termo de P_f , obter uma expressão para o cálculo da pressão de falha. Assim, são definidas as seguintes formulações:

$$P_f = \sigma_u \frac{2t}{D} \frac{1 - \frac{d}{t}}{1 - \left(\frac{d}{t}\right) M^{-1}} \quad (42)$$

Sendo o fator de dilatação calculado da seguinte forma:

$$M = \left(1 + 0,31 * \frac{L_e^2}{D t} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (43)$$

2.10.4 DNV RP-F101

A formulação semi-empírica DNV RP-F101 surgiu de diversos ensaios experimentais da pressão interna e análise tridimensional não linear, por elementos finitos, desenvolvidas pela BG Technology e a Det Norske Veritas em parceria com diversas empresas, dentre elas a Petrobras. A formulação é normatizada dentro dos processos da Det Norske Veritas que emite recomendações práticas sobre condições de segurança.

A seguinte expressão fornece o valor da pressão de falha:

$$P_f = \sigma_u \frac{2t}{(D-t)} \frac{1 - \frac{d}{t}}{1 - \left(\frac{d}{t}\right) M^{-1}} \quad (44)$$

Sendo M calculado da seguinte forma:

$$M = \left(1 + 0,31 * \frac{L_e^2}{D t} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (45)$$

2.10.5 Formulação de Ahammed

Na expressão estabelecida por Ahammed (1998) é empregado o valor de σ_{flow} , obtida experimentalmente por alguns investigadores (método ASME B31G Modificado). Para a determinação de M , também é usado como base o método ASME B31G Modificado. A principal diferença está na consideração do formato do defeito onde as expressões estabelecidas por Ahammed consideram uma área retangular para a perda de material, ou seja, $\lambda = 1$.

A formulação para a pressão de falha é determinada como:

$$P_f = (\sigma_y + 68,95MPa) \frac{2 t}{D} \frac{1 - \frac{d}{t}}{1 - \left(\frac{d}{t}\right) M^{-1}} \quad (46)$$

Quando $\left[L_e^2 \left(\frac{1}{D t} \right) \right] \leq 50$:

$$M = \left\{ 1 + 0,6275 \frac{L_e^2}{D t} - 0,003375 \frac{L_e^4}{D^2 t^2} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (47)$$

Para o caso onde $\left[L_e^2 \left(\frac{1}{D t} \right) \right] > 50$:

$$M = 0,032 \frac{L_e^2}{D t} + 3,3 \quad (48)$$

2.10.6 Modelo PCORRC

O laboratório Battelle conduziu ensaios à escala real (*full-scale*), investigação por Elementos Finitos e análise teórica, descobrindo que materiais mais dúcteis falham por colapso plástico (TORO, 2014). Foi desenvolvido um *software* de Elementos Finitos conhecido como PCORR, que avalia a corrosão em um duto sujeito a pressão interna e/ou carregamento axial.

Eles também desenvolveram uma alternativa para avaliar um defeito de corrosão, por meio de uma análise de regressão de resultados obtidos através de um estudo paramétrico, utilizando o software PCORR. O modelo desenvolvido ficou conhecido como PCORRC (*Pipe CORROsion failure Criterion*). Assim como, na BS-7910 adota-se a tensão última na definição de σ_{flow} (expressão 34).

Seguindo esta formatação, tem-se para P_f :

$$P_f = \sigma_u \frac{2t}{D} \left[1 - \left(\frac{d}{t} \right) M \right] \quad (49)$$

Sendo o fator de dilatação definido da seguinte maneira:

$$M = 1 - \exp \left[\frac{-0,157L_e}{\sqrt{\frac{D(t-d)}{2}}} \right] \quad (50)$$

2.11 Otimização

Otimização é a técnica de se obter o melhor resultado sob determinadas circunstâncias (RAO, 2009). Uma vez que diversas situações práticas podem ser expressas como uma função de certas variáveis, otimização pode ser definida como o processo de encontrar as condições que resultam no máximo ou mínimo valor da função.

Novaes et al. (2017) determina que a otimização tem como objetivo melhorar o desempenho de um sistema, de um processo ou de um produto de forma a obter deles o máximo de benefícios possíveis.

Essa condição de melhor resultado, ou o melhor desempenho varia para diferentes sistemas. De forma geral, afirmar que o resultado obtido é o melhor implica que o sistema é econômico, eficiente, confiável e durável (ARORA, 2011).

Costa (2015) afirma que para se definir um problema de otimização, três fatores devem ser determinados:

- Variáveis de Projeto: são os parâmetros que definem o sistema, como por exemplo dimensões e propriedades dos materiais envolvidos;

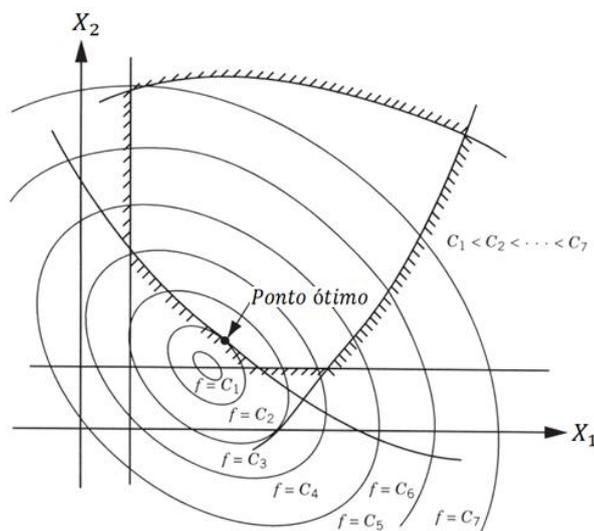
- Restrições de Projeto: estabelece os limites ou condições que devem ser respeitados no processo de busca do resultado ótimo;
- Função Objetivo: é uma função das variáveis de projeto. Seu ponto mínimo ou máximo é o interesse do processo de otimização.

Assim, o processo de otimização é um processo iterativo, que busca convergir para a condição ideal ou o mais próximo que se possa chegar dela, respeitando os limites e restrições pré-determinados. O processo iterativo (ARORA, 2011) implica em sucessivas análises de determinadas configurações, uma após a outra até que uma formatação aceitável seja obtida.

Em geral, haverá para a função objetivo ($fun(x)$) mais de uma configuração aceitável, ou seja no conjunto das respostas há diversos pontos que podem ser considerados aceitáveis. O objetivo do processo de otimização é escolher a melhor configuração dentre as muitas disponíveis (RAO, 2009), encontrando o ponto mínimo. A busca da configuração mais eficiente se dá pela análise das condições limitantes.

Adotando a configuração bidimensional, exemplifica-se, através do Gráfico 5, o comportamento do ponto de projeto. Nela pode-se verificar que o conjunto de todos os pontos que satisfazem a expressão $f(x) = C$ formam uma hipersuperfície no espaço, e cada valor de C corresponde a um membro diferente de uma família de superfícies. A estas superfícies dar-se o nome de superfícies da função objetivo.

Gráfico 5 - Contorno da função objetivo



FONTE: Rao (2009)

A eficiência do processo de iteração está ligada diretamente à formulação inicial (ARORA, 2011). Deve-se ter bastante cuidado na hora de formular o problema, etapa onde a condição real é ajustada por um modelo matemático. Em contra partida, deve-se ressaltar que um excesso de restrições ou se estão são inconsistentes, podem levar a impossibilidade de obter um resultado. Assim, deve-se buscar uma formulação matemática coerente e próxima da condição real, mas matematicamente viável.

O conjunto de possíveis soluções, ou soluções admissíveis é dado pelo conjunto de pontos dentro da área delimitada pelas curvas de restrição. Assim todos os conjuntos de pontos estabelecidos dentro desse limite podem ser solução para o problema.

Dentro do conjunto de resultados admissíveis, o processo de otimização vai buscar o ponto que resulta no maior ou menor valor para a função objetivo.

Não existe um método único disponível para resolver todos os problemas de otimização eficientemente, cada situação exige uma configuração própria e conseqüentemente os problemas podem ser estruturados de formas

completamente distintas (RAO, 2009). Uma série de métodos de otimização foram desenvolvidos para resolver diferentes tipos de problemas ao longo dos anos.

A solução de problemas de otimização estrutural é de grande aplicabilidade na busca por concepções estruturais econômicas, alto desempenho, de fácil execução e manutenção e, também, mais recentemente, incorporando aspectos ambientais, desde sua construção até à sua utilização.

2.11.1 Ponto de projeto de otimização baseado em confiabilidade

A formulação mais simples e usual de implementação da otimização de uma estrutura baseando-se na confiabilidade é aquela implementada em laço duplo, onde a otimização é dividida em 2 laços:

- No laço externo é feita a avaliação da função objetivo, definindo-se as variáveis de projeto e as configurações iniciais do processo de otimização, como determinação das condições limitantes. Nesta pesquisa, esta etapa se estrutura com aplicação de função de otimização já configurada na plataforma MATLAB, com aplicação da Programação Quadrática Sequencial (SQP).
- No laço interno é realizado o processo de análise da confiabilidade com os valores iniciais definidos no nível anterior, sendo, nesta pesquisa, aplicado o Método de Confiabilidade de Primeira Ordem (FORM).

De acordo com Corso (2016), o RBDO (*Reliability-Based Design Optimization*) tem como objetivo otimizar uma determinada função objetivo, satisfazendo as restrições probabilísticas de confiabilidade especificada, a qual é colocada como critério inicial do problema, estabelecendo-se um índice de confiabilidade alvo ou uma probabilidade de falha máxima que o projeto deve garantir.

Análises de probabilidade de falha são realizadas ao longo do processo de otimização, a fim de verificar a adequação das condições estabelecidas e guiar a otimização em direção ao nível de segurança requerido.

Um modelo de otimização determinístico para minimização pode ser definido genericamente em três partes:

1. Construção da função de minimização a partir das variáveis de projeto (\mathbf{X}) e dos parâmetros fixos (\mathbf{p}) do problema. Assim tem-se:

$$\text{Minimizar } fun(\mathbf{X}, \mathbf{p}) \quad (51)$$

2. Estabelecer as funções de restrição, também construídas em função das variáveis de projeto e/ou dos parâmetros fixos. Sujeita-se a função de otimização a:

$$\begin{cases} g_i(\mathbf{X}, \mathbf{p}) = 0 & i = 1, \dots, n_e \\ g_j(\mathbf{X}, \mathbf{p}) < 0 & j = n_e + 1, \dots, n_r \end{cases} \quad (52)$$

Onde, $g_i(\mathbf{X}, \mathbf{p}) = 0$ é a i -ésima restrição de igualdade do modelo (tendo um total n_e restrições de igualdade e $n_r - n_e$ restrições de desigualdade).

3. Por fim se estabelece os valores limitantes para as variáveis de projeto, ou seja:

$$\mathbf{X}_i \leq \mathbf{X} \leq \mathbf{X}_s \quad (53)$$

Tendo que \mathbf{X}_i é o vetor que contém os limites inferiores das variáveis de projeto e \mathbf{X}_s é o vetor que contém os limites superiores das variáveis de projeto do modelo.

No entanto, uma otimização determinística não considera as incertezas nas próprias variáveis e nem nos parâmetros de projeto. No RBDO, as restrições determinísticas são adicionadas as restrições de probabilidade. A probabilidade de falha pode ser definida em função do índice de confiabilidade (e vice-versa) como:

$$Prob_f(\mathbf{X}, \mathbf{p}) = \Phi(-\beta) \quad (54)$$

onde Φ é a função de distribuição cumulativa normal padrão. Como geralmente $Prob_f$ é pequena para estruturas, na ordem de 10^{-3} a 10^{-6} é comum usar $Prob_f$ como a medida de confiabilidade de uma estrutura. Esta confiabilidade (C) é definida como o complemento da probabilidade de falha $Prob_f$, ou seja:

$$C = 1 - Prob_f \quad (55)$$

Na estruturação do processo iterativo aplicado na otimização a função de restrição com relação à confiabilidade pode ser expressa como:

$$g_j(\mathbf{X}, \mathbf{p}) = 1 - \frac{\beta}{\beta_{alvo}} = 0 \quad j = 1, \dots, m \quad (56)$$

onde $g_j(\mathbf{X}, \mathbf{p})$ é a razão expressa adimensionalmente entre o índice de confiabilidade calculado na iteração em curso (β) e o índice de confiabilidade alvo (β_{alvo}) e m representa a quantidade de pontos analisados no processo de otimização.

Isso quer dizer que, se o índice de confiabilidade β calculado no fim do laço de iteração for maior que o índice de confiabilidade alvo β_{alvo} estipulado, então $g_j(\mathbf{X}, \mathbf{p}) = 0$ e o critério probabilístico estará satisfeito. Quando o critério não é satisfeito, um incremento é acrescido ou retirado do valor das variáveis de projeto. Assim, tem-se novos valores para estas variáveis, iniciando um novo laço de iteração.

Para determinar e quantificar a citada penalização, assim como comandar o processo de otimização que se configura como o primeiro nível do processo de RBDO, podem ser aplicados diferentes algoritmos. Muitos deles já podem ser encontrados implementados em plataformas comerciais, como na plataforma MATLAB.

Os algoritmos mais comuns aplicados na otimização estrutural são: a linearização convexa (*Convex Linearization* – CONLIN), o método das assíntotas móveis (*Method of Moving Asymptotes* – MMA), a programação linear sequencial (*Sequential Linear Programming* – SLP) e a programação quadrática sequencial (*Sequential Quadratic Programming* – SQP), entre outros (SILVA, 2009).

Mesmo cada um deles apresentando vantagens e desvantagens um com relação ao outro, o SQP representa a opção mais robusta, considerando o termo quadrático na criação da função Lagrangiana, tendo ainda uma convergência quadrática que resulta na redução do número de iterações.

A plataforma MATLAB também possui funções de otimização já implementadas que podem ser estruturadas para aplicar diferentes algoritmos de otimização, como é o caso da função FMINCON aplicada nesta pesquisa que será configurada para que o processo siga a metodologia da Programação Quadrática Sequencial (SQP) como algoritmo de otimização.

2.11.2 Programação quadrática sequencial (SQP)

Programação quadrática sequencial, ou sucessiva, ou recursiva, ou iterativa, ou ainda métodos da métrica variável com restrição, são as várias formas de referenciar o método SQP (Wilson, 1963).

A programação quadrática sequencial apresenta boa característica, portanto, é um dos principais métodos de otimização (RAO, 2009). Tendo um problema de minimização de uma função sujeita a um conjunto de restrições, constrói-se uma sequência de subproblemas nos quais a função objetivo é substituída por uma aproximação quadrática e as restrições são substituídas por aproximações lineares. A formulação SQP incorpora ao problema, informações de segunda ordem com relativa facilidade (ARORA, 2011).

Ao contrário de outros métodos que tentam converter o problema em uma sequência de subproblemas de otimização sem restrições (TELES; GOMES, 2010), o SQP tenta resolver o problema de otimização iterativamente, onde a solução em cada passo é obtida pela solução de uma aproximação do problema não linear onde a função objetivo é substituída por uma aproximação quadrática e as restrições não lineares são substituídas por aproximações lineares.

O método busca empregar o método de Newton (ou Quasi-Newton) para resolver as condições de Karush-Kuhn-Tucker (KKT) do problema original (BELEGUNDU; CHANDRUPATLA, 2011). Com isso, tem-se a divisão do problema original em uma série de problemas menos complexos. Em cada iteração resolve-se um subproblema de minimização quadrática (PQ) que consiste em uma aproximação quadrática da função Lagrangeana otimizada sobre uma aproximação linear das restrições.

As condições necessárias de primeira ordem de KKT devem ser satisfeitas para que a solução encontrada seja um ponto ótimo de um problema com restrições (ARORA, 2011). Para um problema de programação não linear com função objetivo e restrições diferenciáveis, estas condições são satisfeitas desde que os gradientes das restrições sejam linearmente independentes, o gradiente da função Lagrangeana seja nulo e a condição de complementaridade seja satisfeita.

Algumas propriedades interessantes do método de programação quadrática sequencial são:

- Trata-se de um método que tem a capacidade de caminhar por pontos infactíveis, ou seja, os pontos que violam alguma restrição, sendo assim não é necessário que a aproximação inicial pertença ao conjunto de restrições;
- Subproblemas quadráticos são fáceis de resolver e suas soluções podem resumir-se às de um sistema linear, quando consideramos apenas as restrições ativas no laço de iteração corrente;
- Os métodos SQP possuem boa velocidade de convergência, podendo ser quadrática ou superlinear dependendo da construção dos subproblemas quadráticos.

Como todo método baseado em gradientes no SQP existe a necessidade de calcular, durante o processo de busca da solução ótima, as derivadas tanto da função objetivo como dos vínculos ou restrições (RAO, 2009).

Diante da robustez e eficiência, o método SQP se torna cada vez mais popular, existindo (BELEGUNDU; CHANDRUPATLA, 2011) muitas variações do método na literatura e possuindo bastante abrangência, chegando a plataformas comerciais como o MATLAB.

Para um maior detalhamento do método da Programação Quadrática Sequencial, recomendam-se os trabalhos de Rao (2009), Arora (2011) e Belegundu e Chandrupatla (2011).

3 METODOLOGIA

O método de confiabilidade adota o método semi-probabilístico em sua estruturação. O método da confiabilidade estrutural exige a definição de uma função de falha. A função de falha neste projeto é calculada em termos da pressão solicitante (ou pressão atuante) e da pressão resistente do duto (pressão de falha). Esta última é calculada por meio de expressões semi-empíricas.

Busca-se estabelecer o erro associado a cada metodologia de cálculo de pressão resistente, ou seja, o erro atrelado a cada formulação semi-empírica. Para isso, faz-se a inserção da variável Erro do Modelo, que representa uma forma de ajuste no cálculo, buscando aproximar os resultados teóricos (obtidos de forma indireta) com os resultados reais (oriundos de análises de laboratório).

Um projeto ótimo, considerando as incertezas do problema foi desenvolvido, utilizando técnicas de otimização que visem a busca de um índice de confiabilidade alvo presente no projeto.

Nesta pesquisa, para o dimensionamento ótimo do duto, aplicou-se a função FMINCON, já programada na plataforma MATLAB, configurando a citada função para aplicar o algoritmo de Programação Quadrática Sequencial (SQP) no comando da otimização do processo.

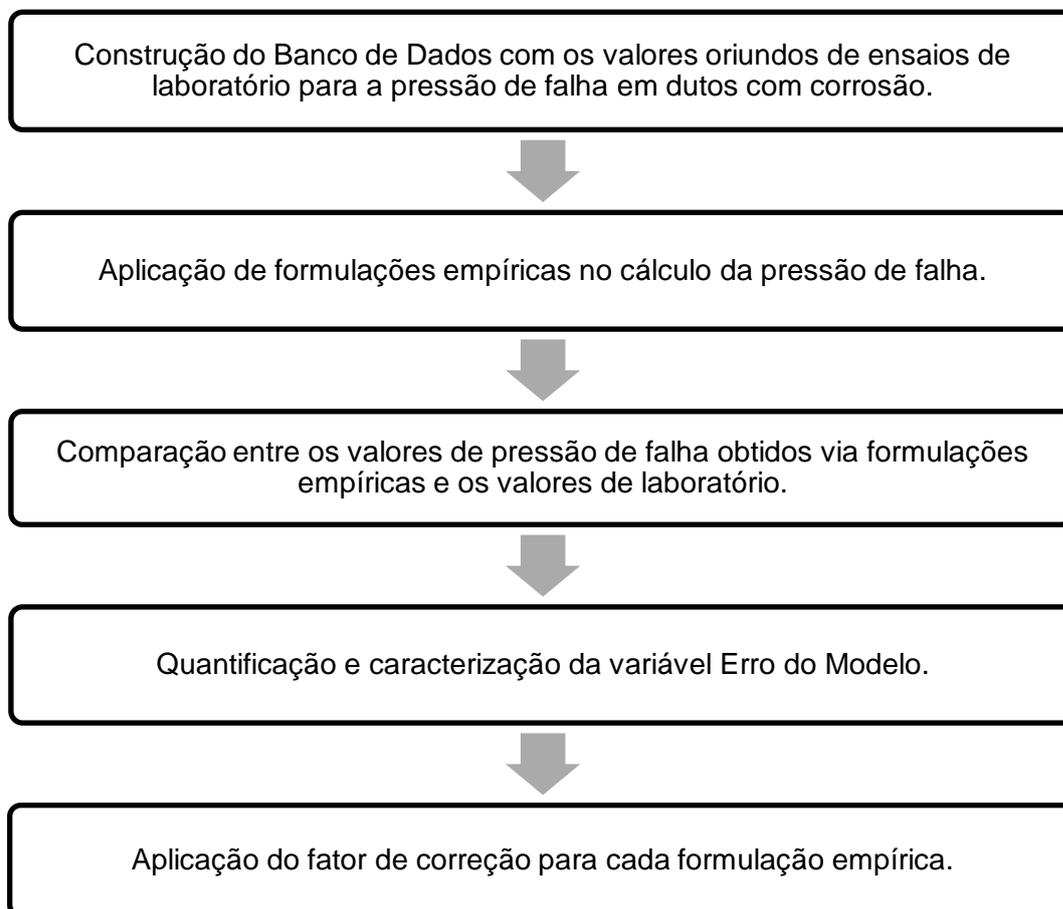
Definindo-se as variáveis de projeto como sendo o diâmetro externo e a espessura do duto, buscam-se os valores que garantam as condições pré-definidas de segurança, ou seja, o valor alvo para o índice de confiabilidade que se correlaciona com a máxima probabilidade de falha que se deseja admitir para o duto.

Neste contexto é inserido um processo de análise de confiabilidade por meio do método analítico de confiabilidade de primeira ordem (FORM) para o cálculo do índice de confiabilidade da análise. Por meio desta técnica torna-se possível a avaliação dos níveis de segurança.

3.1 Cálculo do Erro do Modelo

Na etapa inicial da pesquisa o foco está na análise e estudo das pressões de falha. Sendo o principal objetivo desta etapa a avaliação de diferentes formulações semi-empíricas com a caracterização da variável Erro do Modelo, elucidando assim um parâmetro que fornece base a uma eficiente comparação e definição de qual formulação melhor se adapta à esta pesquisa. Para melhor entendimento desta etapa da pesquisa, as atividades desenvolvidas para o cálculo do erro são escalonadas no fluxograma apresentado no Fluxograma 2.

Fluxograma 2 – Atividades para o cálculo do Erro do Modelo.



FONTE: O Autor (2019).

3.1.1 Base de dados

No intuito de obter matematicamente a variável Erro do Modelo, comparam-se os resultados obtidos a partir das expressões semi-empíricas com a pressão de ruptura obtida em ensaios em escala real (*full-scale*) de dutos contendo defeitos de corrosão.

Neste trabalho, utilizou-se um banco de dados com 84 experimentos obtidos na literatura. A quantidade de experimentos apresentados por diversos autores da literatura pode ser visto na Tabela 6.

Tabela 6 - Quantificação de experimentos de laboratório adotados nesta pesquisa.

Trabalho	Número de Experimentos utilizados na pesquisa
Kiefner et al. (1973)	48
Mok, Pick e Glover (1990)	15
Chouchaoui e Pick (1994)	10
Freire et al. (2006)	9
Bjornoy, Sigurdsson e Cramer (2000)	2

FONTE: O Autor (2019).

Os dados que constituem o banco de dados detalham as características geométricas do duto e do defeito, fornecendo todos os parâmetros iniciais para que se possa calcular a pressão de falha, aplicando as expressões semi-empíricas. Posteriormente, realizou-se a comparação entre os valores de pressão de falha calculados por meio das expressões semi-empíricas e os valores de pressão de falha contidos no banco de dados que representam os valores oriundos de laboratório.

Encontrou-se uma forte barreira na constituição de uma considerável base de dados uma vez que a obtenção das condições exatas do ensaio e do duto ensaiado é de grande dificuldade, pois geralmente tais informações não estão disponíveis ou não foram detalhadas nos trabalhos publicados. Descreve-se a seguir a base de dados usada na pesquisa.

Kiefner et al. (1973) realizaram um total de 140 experimentos onde 92 destes continham defeitos que se aprofundavam por toda a parede do duto, não sendo o objetivo desta pesquisa. Sendo assim, foram utilizados para construção do banco de dados os 48 ensaios de ruptura, onde a profundidade máxima do defeito encontra-se dentro da espessura da parede do duto.

Estes ensaios de ruptura compõem a base do desenvolvimento dos modelos de falha para dutos corroídos da Sociedade Norte-americana de Engenheiros Mecânicos (em inglês *American Society of Mechanical Engineers* – ASME). Os parâmetros experimentais são listados na Tabela 7.

Tabela 7 - Parâmetros experimentais (Kiefner et al., 1973).

Parâmetro	Valor Mínimo	Valor Máximo
Diâmetro do Duto (mm)	406,4	1066,8
Espessura do Duto (mm)	6,35	15,65
Comprimento do Defeito (mm)	63,5	609,6
Profundidade do Defeito (mm)	3,12	11,23
Tensão Última (MPa)	479,19	633,63
Pressão de Ruptura (MPa)	6,14	50,61

FONTE: O Autor (2019).

Os ensaios foram realizados em dutos que continham diferentes geometrias de defeitos de corrosão reais. Estes ensaios foram realizados em espécimes removidos de serviço depois de alguns anos de operação.

Mok, Pick e Glover (1990) realizaram duas séries de ensaios totalizando 18 ensaios de ruptura em dutos de aço do tipo X60 com 508 milímetros de diâmetro possuindo dois valores de espessura do duto, 6,35 e 6,40 milímetros. Destes ensaios, 12 continham defeitos de corrosão artificial que tinham orientação longitudinal e helicoidal e 6 ensaios continham reparações e defeitos longitudinal e circunferencial. Neste trabalho foram utilizados 15 destes resultados, correspondendo aos dutos que continham defeitos simples. Assim como o diâmetro que possui um valor único (508 mm), a tensão última do material também é única, sendo igual a 542 MPa. Os parâmetros constam na Tabela 8.

Tabela 8 - Parâmetros experimentais (Mok et al., 1990).

Parâmetro	Valor Mínimo	Valor Máximo	Valor Único
Diâmetro do Duto (mm)	-	-	508
Espessura do Duto (mm)	6,35	6,40	-
Comprimento do Defeito (mm)	25,4	204,8	-
Profundidade do Defeito (mm)	2,18	3,46	-
Tensão Última (MPa)	-	-	542
Pressão de Ruptura (MPa)	8	15,84	-

FONTE: O Autor (2019).

Chouchaoui e Pick (1994) realizaram 10 ensaios de ruptura em um duto de aço do tipo X46 que continha corrosão interna por pites, que consiste em uma forma de corrosão externamente localizada que leva à criação de pequenos furos no metal, orifícios que adentram formando um pequeno “poço”. Estes ensaios

foram realizados em dutos que foram removidos de serviço por causa da corrosão.

O duto estava em serviço transportando petróleo bruto desde 1956. Dois dos espécimes ensaiados continham corrosão por pites. Também foi considerado que a separação dos defeitos era adequada para trabalhar de forma independente e os espécimes restantes continham corrosão simples. Na Tabela 9 apresentam-se os parâmetros dos ensaios realizados por estes autores.

Tabela 9 - Parâmetros experimentais (Chouchaoui e Pick, 1990).

Parâmetro	Valor Mínimo	Valor Máximo
Diâmetro do Duto (mm)	322	325
Espessura do Duto (mm)	6,18	6,85
Comprimento do Defeito (mm)	19,88	108
Profundidade do Defeito (mm)	2,41	3,77
Tensão Última (MPa)	359	403
Pressão de Ruptura (MPa)	13,98	18,85

FONTE: O Autor (2019).

Freire et al. (2006) realizaram 9 ensaios de ruptura em dutos de aço do tipo X60 de 323,9 mm de diâmetro, que continham defeitos de corrosão externa artificial (usinados). Todos os espécimes utilizados nos ensaios tinham 2 metros de comprimento. Cada ensaio foi instrumentado com extensômetros de grande alongamento. Os parâmetros podem ser conferidos na Tabela 10.

Tabela 10 - Parâmetros experimentais (Freire et al., 2006).

Parâmetro	Valor Mínimo	Valor Máximo	Valor Único
Diâmetro do Duto (mm)	-	-	323,9
Espessura do Duto (mm)	9,66	9,94	-
Comprimento do Defeito (mm)	-	-	95,3
Profundidade do Defeito (mm)	2,6	2,9	-
Tensão Última (MPa)	-	-	542
Pressão de Ruptura (MPa)	11,3	14,4	

FONTE: O Autor (2019).

Bjornoy, Sigurdson e Cramer (2000) realizaram 12 ensaios experimentais em um duto de aço do tipo X52 de 324 milímetros de diâmetro nominal com 10,3 milímetros de espessura, que continham defeitos de corrosão artificial. Desse total de experimentos, 10 foram formatados com combinação de pressão interna e carregamento externo, configuração que não caracteriza o foco deste estudo. Sendo assim, os outros 2 experimentos foram acrescentados ao banco de dados desta pesquisa. Ambos configuram testes realizados apenas com pressão interna. Os parâmetros são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 - Parâmetros experimentais (Bjørnøy et al., 2000).

Parâmetro	Valor Mínimo	Valor Máximo	Valor Único
Diâmetro do Duto (mm)	-	-	324
Espessura do Duto (mm)	-	-	10,3
Comprimento do Defeito (mm)	30,9	154,5	-
Profundidade do Defeito (mm)	-	-	5,15
Tensão Última (MPa)	-	-	563
Pressão de Ruptura (MPa)	22,0	23,20	-

FONTE: O Autor (2019).

3.1.2 Cálculo da pressão de falha via modelos semi-empíricos

Para estudo do erro associado a cada formulação semi-empírica, calcula-se inicialmente a pressão de falha com a aplicação das formulações detalhadas na seção 2.10.

Nesta pesquisa a configuração do duto foi estabelecida como um duto ao ar livre, assim, optou-se pela aplicação da taxa de corrosão linear para cálculo da profundidade máxima e largura máxima do defeito que são aplicados no cálculo da pressão de falha. Opta-se pela formulação mais prática, levando em conta que o método mais comumente empregado na indústria para predição da taxa de corrosão é o que presume que esta tem um valor constante (BISAGGIO, 2014).

Sendo assim, são aplicadas as seguintes formulações:

$$d = d_0 + \Delta T R_d \quad (57)$$

$$L_e = L_0 + \Delta T R_L \quad (58)$$

sendo que d e L_e representam a profundidade e largura finais do defeito, respectivamente. Tem-se que d_0 e L_0 correspondem a profundidade e largura iniciais do defeito. ΔT é a variação temporal, já R_d e R_L carregam os valores da taxa de corrosão radial e da taxa de corrosão longitudinal, respectivamente, tendo que estes valores são obtidos na literatura, embasa-se a taxa de corrosão radial no trabalho de Zhou (2010), adotando-se um valor de 0,15 mm/ano com coeficiente de variação de 0,6 e a taxa de corrosão longitudinal no trabalho de Ahammed (1998) com valor de 0,10 mm/ano e coeficiente de variação de 0,1.

Uma vez que a base de dados é constituída pelos parâmetros dos ensaios laboratoriais de rompimento de dutos com defeitos de corrosão, como detalhado na seção 3.1.1, como resultado irá se ter oitenta e quatro valores de pressão de falha para cada uma das seis formulações citadas.

3.1.3 Cálculo do erro associado

Aplicando-se a expressão (23) é possível realizar a comparação entre os valores semi-empíricos de pressão de falha e os valores oriundos dos ensaios de laboratório.

Para cada uma das seis formulações, a expressão (23) é calculada oitenta e quatro vezes, sendo em seguida utilizada a expressão (24) para o cálculo da média desses valores. Logo, para cada uma das formulações semi-empíricas pode-se quantificar através da média o desvio que tal formulação apresenta em relação a condição real.

Faz-se então a caracterização dos dados obtidos através da expressão (23), calculando-se e obtendo como resultado para esta etapa a média, desvio padrão, coeficiente de variação e determinando a distribuição de probabilidade que melhor se adéqua a cada conjunto de dados.

Com essa caracterização, permite-se definir a variável Erro do Modelo, como sendo uma variável aleatória. Uma vez que esta variável é uma das que possui maior impacto na análise de confiabilidade do duto, ela deve ser passada como aleatória e não como determinística (TORO, 2014).

Obtida a variável Erro do Modelo, torna-se possível corrigir o valor da pressão de falha calculada de forma indireta, por meio da aplicação de formulações semi-empíricas.

Por meio da expressão (25) pode-se ajustar o valor da pressão de falha obtido de forma indireta. Com isso, a análise torna-se mais confiável e o dimensionamento do duto pode ser considerado mais eficiente.

Podem haver dois coeficientes de correção para o erro, que atuam na correção das parcelas constituintes da expressão (17). Nesta pesquisa, o carregamento interno das paredes do duto, que representa a parcela da solicitação, foi obtido a partir de dados da literatura, considerando-se estes dados como sendo os valores reais, e conseqüentemente adota-se que não há erro para a parcela de solicitação. Calcula-se apenas o erro atrelado ao valor da pressão de falha.

Tendo a caracterização do erro de cada formulação, verificou-se o que apresentou um melhor comportamento, para adotar esta formulação e concomitantemente o seu respectivo valor para a variável Erro do Modelo no projeto geométrico. A avaliação do melhor comportamento, foi feita buscando-se verificar a formulação semi-empírica cujos resultados eram mais coesos entre si, ou seja, apresentavam uma menor dispersão dos valores finais de pressão de falha e cuja média não tivesse um valor tão distante da unidade.

A formulação semi-empírica adotada neste trabalho para calcular a parcela de resistência da expressão (17) foi a DNV-RP-F101. A escolha desta formulação se deu seguindo os citados critérios que levaram a considerá-la a mais apropriada, visto que apresentou bons resultados de média e uma baixa dispersão dos resultados. Outro importante fator que pesou na adoção desta metodologia é o fato de que este modelo se trata de um modelo normatizado, não apenas de uma formulação da literatura, garantindo assim um maior respaldo de que o modelo está sempre sendo atualizado e revisado por equipes técnicas no intuito de manter a norma atual.

3.2 Projeto otimizado do duto

Neste trabalho busca-se realizar o projeto otimizado do diâmetro e da espessura do duto, aplicando-se técnicas de otimização já implementadas na plataforma comercial MATLAB, usando como base quatro exemplos da literatura.

Para realizar o dimensionamento otimizado do duto, é necessário inserir a configuração inicial do duto a ser estudado, assim como do defeito de corrosão que age no mesmo. Deve-se ter o conhecimento não apenas dos valores médios das variáveis envolvidas, mas também de sua caracterização estatística, assim, optou-se por selecionar na literatura exemplos de dutos para que fosse viável a obtenção de todos os valores usados como parâmetros de entrada no dimensionamento otimizado do duto.

Para verificar se os resultados obtidos apresentam alguma tendência no comportamento, utilizaram-se os dados de quatro exemplos oriundos da literatura. Os dados são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 - Valores dos parâmetros utilizados no cálculo da espessura ótima.

Exemplo	Autor	d (mm)	P (MPa)	L (mm)	σ_u (MPa)
1	Zhang e Zhou (2013)	1,95	5,66	31	455
2	Bazan e Beck (2013)	2,64	7,056	90	496
3	Zhou (2010)	1,59	7,056	610	496
4	Leira, Naess e Naess (2016)	5	5,8	305	472

FONTE: O Autor (2019).

São necessários os valores do coeficiente de variação e a distribuição de probabilidade das variáveis adotadas como aleatórias. Para as variáveis, profundidade do defeito e pressão aplicada, esses dados foram retirados dos

exemplos da literatura cujos valores são mostrados na Tabela 13. Para a variável Erro do Modelo foram utilizados os resultados obtidos nesta pesquisa.

Tabela 13 - Caracterização dos parâmetros utilizados no cálculo da espessura ótima.

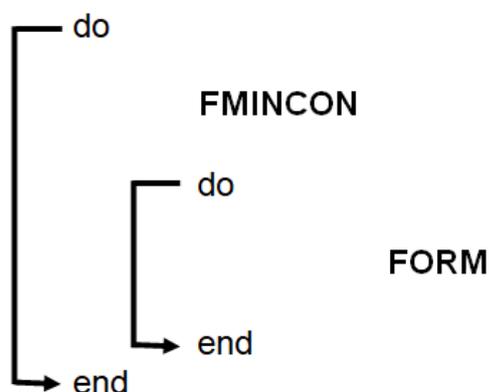
Exemplo	COV (d)	Distribuição (d)	COV (P)	Distribuição (P)
1	0,05	Nomal	0,02	Gumbel
2	0,05	Normal	0,05	Gumbel
3	0,389	Normal	0,05	Gumbel
4	0,1	Normal	0,05	Normal

FONTE: O Autor (2019).

O diâmetro e espessura do duto, variáveis adotadas como variáveis de projeto foram obtidas para cada um dos exemplos acima, utilizando como formulação para o cálculo da pressão de falha o modelo normatizado DNV RP-F101, modelo este detalhado na seção 2.10.4.

A busca pelo dimensionamento otimizado do duto se configura num processo de duplo laço. De uma forma simplificada, a estruturação computacional deste processo é apresentado na Figura 6.

Figura 6 – Estruturação numérica do processo de duplo laço.



FONTE: O Autor (2019).

No laço externo encontra-se a formulação que controla o processo de otimização comandado pelo FMINCON, sendo responsável pelo incremento nas variáveis de projeto, ou seja, realiza a alteração nos valores do diâmetro e espessura, com o intuito de fazer o processo convergir para o valor final. No laço interno encontra-se a análise de confiabilidade, regido pelo método de confiabilidade de primeira ordem (FORM), que calcula o valor do índice de confiabilidade de cada iteração.

O algoritmo para obtenção dos valores ótimos pode ser descrito pelos seguintes passos:

- 1º - Definição do valor alvo para o índice de confiabilidade (β_{alvo}) que a estrutura deve apresentar;
- 2º - Definição do ponto de partida da variável de projeto x_o . Neste estudo, foram adotadas como variáveis de projeto o diâmetro e a espessura do duto;
- 3º - Início da iteração do método de duplo laço com a aplicação da função de otimização;
- 4º - Início do algoritmo FORM, definindo as variáveis aleatórias X : profundidade do defeito, a pressão aplicada e a variável erro do modelo.

- 5º - Determinação do índice de confiabilidade da iteração β , com avaliação da discrepância entre o valor do índice de confiabilidade da iteração e o valor do índice de confiabilidade alvo.
- 6º - Determinação do passo da iteração com a definição dos novos valores para as variáveis de projeto.
- 7º - Análise até que, havendo convergência, a discrepância se torne inferior à tolerância adotada, sendo igual a 10^{-3} .

Nesta pesquisa optou-se por realizar o processo de otimização na plataforma comercial MATLAB, uma vez que disponibiliza a utilização das suas ferramentas de otimização já programadas e devido ao fato de que a análise de confiabilidade ter sido estruturada, numericamente, nesta plataforma. Buscando assim uma maior integração e levando em consideração que a citada plataforma é equipada com poderosas ferramentas de processamento.

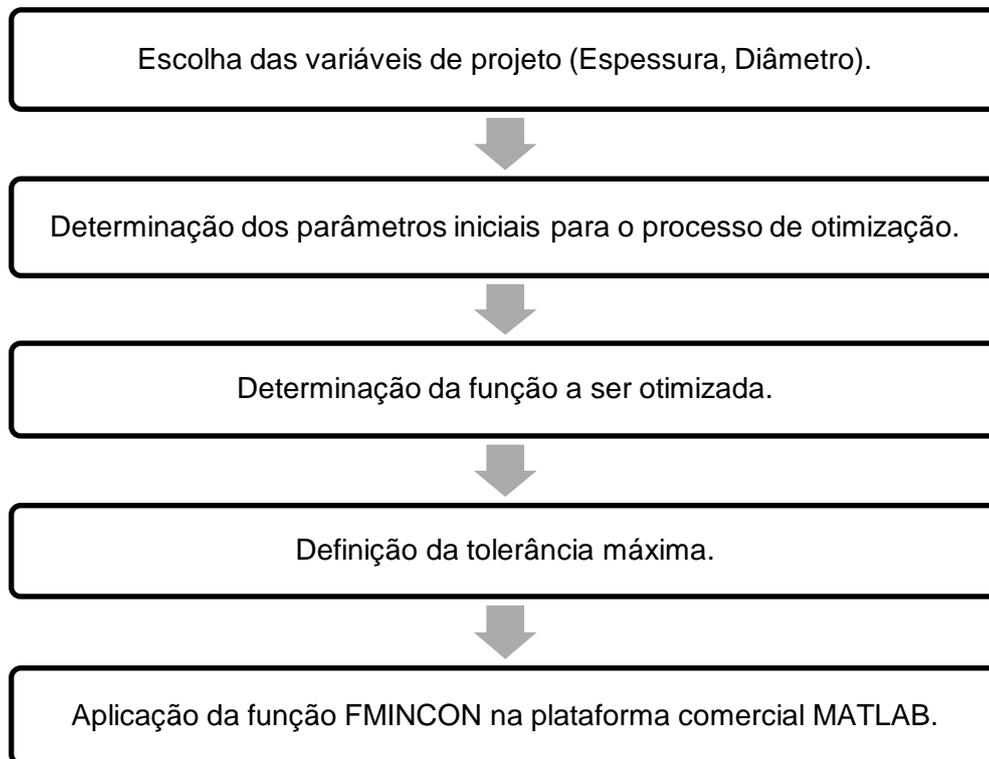
É realizado o dimensionamento do duto para uma série de espaços temporais, permitindo assim a análise do comportamento do projeto para diferentes períodos. Nesta pesquisa, adotam-se as variações temporais (ΔT) de 1, 10, 20, 30, 40 e 50 anos.

3.2.1 Laço externo do processo de otimização

O laço externo é guiado pela parte de otimização, sendo aplicada a função de otimização e estabelecido a forma de evolução do processo. A função principal que comanda o processo de otimização é a função já programada no MATLAB nomeada de FMINCON.

O fluxograma apresentado no Fluxograma 3 mostra o procedimento realizado no primeiro plano do processo de otimização. O processo é aplicado para cada um dos quatro exemplos analisados.

Fluxograma 3 – Laço externo do processo de dimensionamento otimizado.



FONTE: O Autor (2019).

A função FMINCON tenta encontrar um mínimo restrito de uma função escalar de várias variáveis, começando em uma estimativa inicial. Geralmente é aplicado em otimização não linear com ou sem restrições.

A inserção dos dados na plataforma computacional é feita seguindo a seguinte formulação.

$$[x, fval] = fmincon(@fun, x_0, A, b, Aeq, beq, lb, ub, options) \quad (59)$$

Na Tabela 14, detalha-se o significado de cada termo de entrada da função de otimização.

Tabela 14 – Detalhamento dos termos de entrada da função FMINCON.

Termo	Significado
$[x, f_{val}] = fmincon(...)$	Retorna o valor da função objetivo na solução x .
$@fun$	Função a ser minimizada.
x_0	Ponto inicial para o processo iterativo.
A, b	Matrizes das funções de desigualdade.
A_{eq}, b_{eq}	Matrizes das funções de igualdade.
l_b, u_b	Limites inferiores e superiores das variáveis de projeto.
$options$	Alterações nas configurações padrões da função.

FONTE: O Autor (2019).

A função a ser minimizada é determinada como sendo a diferença entre o índice de confiabilidade alvo e o índice de confiabilidade da iteração em questão, como mostrado na expressão seguinte:

$$fun = Beta_{alvo} - Beta \quad (60)$$

A adoção de um índice de confiabilidade alvo busca garantir as condições pré-estabelecidas de segurança. O índice de confiabilidade alvo funciona como uma espécie de fator de segurança. A determinação sobre o valor alvo para este índice deve buscar garantir que os estados limites sejam atendidos. O processo de corrosão pode afetar a aparência física da estrutura e causar desconforto visual aos usuários, assim deve-se levar em conta o estado limite de serviço. No entanto nesta pesquisa considera-se a configuração de dutos usados no sistema de transporte de gases e líquidos, logo o principal foco está em evitar que o estado limite último seja atingido.

Para determinação do índice de confiabilidade alvo levou-se em conta duas indicações. A primeira segue indicações do chamado Probabilistic Model Code fornecido pelo Joint Committee on Structural Safety (JCSS, 2001). O documento trata de um conjunto de regras, regulamentos e explicações necessários a concepção de novas estruturas ou a avaliação das existentes sob um ponto de vista probabilístico, sendo muito aplicado no campo da confiabilidade. A partir disto é obtido, para o estado limite último, os índices de confiabilidade alvo e a probabilidade de falha em função do custo relativo da medida de segurança e da consequência de falha, como pode ser conferido nas Tabelas 2 e 3, respectivamente. Como também, para o estado limite de serviço informa os valores do índice de confiabilidade alvo e a probabilidade de falha em função do custo relativo da medida de segurança, podendo ser visto na Tabela 4.

A segunda indicação foi retirada da literatura que indica um índice de confiabilidade alvo para análises de confiabilidade entre 3,0 e 3,5 (MELCHERS, 1999).

Assim, optou-se pelo menor valor da tabela do JCSS para o estado limite último como consta na Tabela 2, sendo um valor que supera todos os valores da Tabela 4 garantindo assim que os estados limites de serviço sejam atendidos. Adotou-se um índice de confiabilidade alvo igual a 3,1.

Como foi citado na seção 2.7.5, existe a probabilidade de falha anual, que realiza um ajuste no valor da probabilidade de falha com o passar do tempo, para verificar o impacto desse ajuste sobre o dimensionamento. Foram adotadas duas frentes de pesquisa, uma utilizando o índice de confiabilidade alvo fixo determinado através da Tabela 2 e a outra onde o valor do índice de confiabilidade alvo é corrigido ao longo do tempo.

Para realizar a correção do índice de confiabilidade alvo se verifica a probabilidade de falha para n_L anos com o auxílio da expressão (22) e em seguida, utilizando a expressão (54), se obtém o índice de confiabilidade alvo para n_L anos. Os valores calculados para o índice de confiabilidade alvo, aplicando a correção à medida que há a variação temporal, podem ser conferidos

na Tabela 15. Este índice de confiabilidade será chamado de índice de confiabilidade variante (B_Variando).

Tabela 15 - Valores do índice de confiabilidade alvo corrigidos pela variação temporal.

Beta ($\Delta T=1$)	Beta ($\Delta T=10$)	Beta ($\Delta T=20$)	Beta ($\Delta T=30$)	Beta ($\Delta T=40$)	Beta ($\Delta T=50$)
3,1	2,33	2,05	1,88	1,75	1,64

FONTE: O Autor (2019).

É importante evidenciar que o índice de confiabilidade alvo é imutável dentro do processo de otimização. Ele é determinado uma vez e seu valor não se altera ao longo das análises. Mesmo no cenário de avaliação do projeto geométrico do duto com a adequação do índice de confiabilidade alvo ao longo do tempo, a mudança no valor do índice de confiabilidade alvo se dá anteriormente a otimização.

No processo de otimização não há alteração no intervalo temporal (ΔT), cada dimensionamento geométrico é feito para um período fixo, ou seja, há um dimensionamento para 10 anos, outro para 20 anos e assim sucessivamente até o intervalo de 50 anos.

O índice de confiabilidade da iteração (Beta) é obtido na primeira iteração a partir dos valores iniciais de diâmetro e espessura do duto. Este ponto é passado como ponto de partida em x_0 . O índice de confiabilidade, como já detalhado na seção 2.7.4, é calculado pelo método de confiabilidade FORM. Os valores do ponto de partida são:

- Diâmetro inicial = 400 mm
- Espessura inicial = 5 mm

Tendo estes valores iniciais para as variáveis de projeto, as demais variáveis, como tensão última, pressão aplicada, profundidade e comprimento do

defeito, são definidas utilizando os valores dos exemplos informados nas Tabelas 13 e 14.

Não são passadas matrizes de igualdade uma vez que o processo não possui restrição de igualdade. Há a inserção de uma formulação de restrição de desigualdade, estabelecida no intuito de garantir que o valor da espessura do duto assegure que a profundidade máxima da corrosão não supere 85% da espessura total, ou seja:

$$d \leq 0,85t \quad (61)$$

Sendo d a profundidade do defeito e t a espessura do duto. Deixando em função da variável de projeto que é a espessura:

$$t \geq \frac{d}{0,85} \quad (62)$$

Como a formulação base é estabelecida rigidamente para que se adota apenas o sinal de menor ou igual, não permitindo que se coloque a espessura como maior ou igual, se inverte os sinais pra possibilitar a inserção da expressão como uma restrição no programa:

$$-t \leq -\frac{d}{0,85} \quad (63)$$

Os valores limites para as variáveis de projeto são definidos a partir de valores convencionais de dutos utilizados no transporte de gases e petróleo. O intuito de estabelecer que haja um limite, tanto máximo (u_b) quanto mínimo (l_b), nos valores finais é o de não permitir que os resultados sejam muito baixos nem tão elevados, aproximando-se de uma condição de projeto mais realista. Os valores adotados foram:

- Diâmetro máximo: 1200 mm
- Diâmetro mínimo: 100 mm
- Espessura máxima: 100 mm
- Espessura mínima: 10 mm

Para um melhor processamento, configura-se a função FMINCON para que o processo de otimização se dê com aplicação da Programação Quadrática Sequencial (SQP) como já detalhada na seção 2.11.2. Para isso se alteram as configurações padrões, determinando em *options* a escolha pela aplicação da forma SQP.

O termo *options* é estruturado e inserido da seguinte forma:

$$options = optimoptions('fmincon','Algorithm','sqp','TolFun',0.001) \quad (64)$$

Na Tabela 16 detalha-se o significado de cada termo de entrada da função de otimização.

Tabela 16 – Detalhamento dos termos de entrada do termo options.

Termo	Significado
<i>optimset(...)</i>	Edita e altera os valores dos parâmetros especificados.
<i>Algorithm</i>	Escolha do algoritmo de otimização, adotando-se o SQP.
<i>TolFun</i>	Máxima tolerância para a função a ser minimizada, adotada como 10^{-3} .

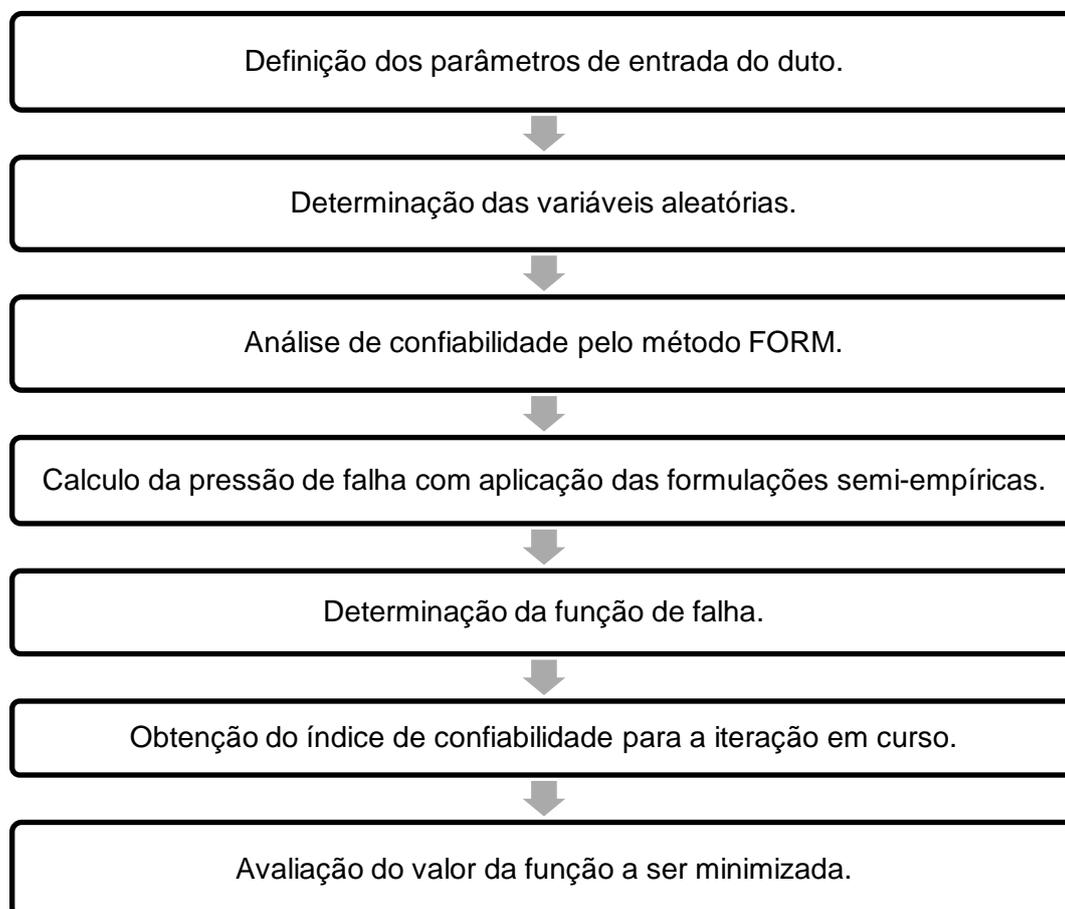
FONTE: O Autor (2019).

3.2.2 Laço interno do processo de otimização

O laço interno do processo de duplo laço consiste na aplicação da confiabilidade estrutural na análise do duto, calculando-se o índice de confiabilidade para a iteração em questão.

O fluxograma apresentado no Fluxograma 4 demonstra o procedimento realizado no laço interno do processo de otimização.

Fluxograma 4 – Laço interno do processo de dimensionamento otimizado.



FONTE: O Autor (2019).

O método de primeira ordem FORM é estruturado como um método iterativo. Existe a busca pelo ponto mais próximo a origem do espaço constituído pelas variáveis aleatórias no espaço normal padrão, estando este ponto sobre a curva limite da função de falha.

O processo de iteração do FORM recebe os valores passados pela função de otimização e realiza a análise de confiabilidade, calculando o índice de confiabilidade e a probabilidade de falha. Para isso o método põe em prática um dos pilares da confiabilidade estrutural que é a análise da estrutura não somente através dos valores médios, mas levando em conta as incertezas das variáveis.

Assim, as variáveis adotadas como aleatórias, são analisadas não somente a partir de seu valor médio, mas é estudado também o comportamento estatístico, uma vez que se leva em conta o coeficiente de variação e o desvio padrão. Sendo assim, o método FORM vai analisando esse comportamento estatístico da variável para verificar qual é o pior cenário que se pode obter com aquela configuração, levando em conta as incertezas das variáveis aleatórias.

O laço interno é encerrado fazendo a avaliação da função a ser otimizada. Havendo convergência, a busca é encerrada quando módulo da diferença entre o índice de confiabilidade alvo e o índice de confiabilidade da iteração cai para um valor abaixo da tolerância de 10^{-3} , significando uma aproximação satisfatória entre os índices de confiabilidade.

Para o cenário onde o valor do módulo da função seja acima do valor da tolerância, a função de otimização FMINCON determina o incremento da iteração e realiza a alteração nos valores das variáveis de projeto sendo refeito o processo de cálculo para a obtenção de um novo índice de confiabilidade da próxima iteração.

3.3 Validação do programa

A validação do programa computacional foi realizada em três partes, verificação da etapa de análise de confiabilidade, em seguida verificou-se o processo de otimização e por fim foi verificado se o acoplamento do processo de otimização e da análise de confiabilidade geraram resultados coerentes.

O programa computacional que realiza a análise de confiabilidade foi baseado em Torres (2009). Para a validação do programa, utilizou-se um exemplo de duto sujeito a corrosão apresentado por Carvajalino (2010). Neste trabalho, o citado autor avalia a probabilidade de falha do duto, adotando a DNV RP-F101, usando o algoritmo FORM e aplicando a linguagem *VBA for EXCEL*. A probabilidade de falha por ruptura do um duto, condição igual à estudada neste trabalho, foi estabelecida em $7,95.10^{-4}$.

Aplicando o citado exemplo no programa computacional utilizado neste trabalho, cuja formulação é feita na plataforma MATLAB, o resultado da

probabilidade de falha foi de $7,8998.10^{-4}$. Observando-se assim resultados próximos que garantem a validação do programa.

Para validar o processo de otimização, optou-se por empregar expressões matemáticas com conhecidos pontos de mínimos, para verificar a proximidade entre o resultado teórico e o resultado obtido pelo programa de otimização. Os exemplos foram retirados de Montaz, Khompatraporn e Zabinsky (2005).

No primeiro exemplo busca-se minimizar a função *Camel Back – 6 Six Hump Problem* (CB6). Na Tabela 17, são apresentados os resultados oriundos da literatura e os obtidos com a aplicação da função de otimização FMICON, onde foram aplicados duas variáveis de projeto, X(1) e X(2) e verificou-se o valor da função avaliada no ponto de projeto, F(X*).

Tabela 17 – Resultados para a função Camel Back.

Fonte	X(1)	X(2)	F(X*)
Literatura	0,089842	-0,712656	-1,0316
FMINCON	0,089842	-0,712656	-1,0316

FONTE: O Autor (2019).

Verificou-se que a função retornou os valores exatos da literatura. Para completar a análise, buscou-se minimizar a função *Hosaki Problem* (HSK). Verifica-se na Tabela 18 os resultados obtidos.

Tabela 18 – Resultados para a função Hosaki Problem.

Fonte	X(1)	X(2)	F(X*)
Literatura	4	2	-2,3458
FMINCON	3,99999	1,99999	-2,345812

FONTE: O Autor (2019).

Para analisar se o acoplamento entre o processo de otimização e a análise de confiabilidade levam a um resultado coerente, realizou-se o dimensionamento do exemplo 3, retirado de Zhou (2010), para a condição do índice de confiabilidade alvo fixo com um período de tempo de 50 anos.

Aplicaram-se os valores na metodologia desta pesquisa, com isso, obtém-se um diâmetro de 1,2 m e uma espessura de 1,487 cm. Para verificar se o ponto obtido encontra-se realmente numa região de mínimo verifica-se o comportamento do módulo da função objetivo (fun) em função do diâmetro e da espessura obtidos com o programa implementado. Este comportamento é demonstrado no Gráfico 6.

Gráfico 6 – Comportamento da função a ser otimizada.



FONTE: O Autor (2019).

Assim verifica-se que a área em azul escuro representa os menores valores da função objetivo (fun). Logo, confirma-se que o programa implementado apresenta resultados confiáveis, obtendo um resultado que se insere numa região de mínimo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Cálculo e caracterização da variável Erro do Modelo

Através da análise dos resultados obtidos com a aplicação da expressão (23) pode-se verificar o comportamento que cada formulação semi-empírica apresenta na predição dos valores de pressão de falha, comparando-se com os valores de laboratório.

A caracterização foi feita com a construção de histogramas para analisar o comportamento do conjunto de dados. Vale lembrar, que para cada formulação se tem oitenta e quatro valores calculados por meio da expressão (23), possibilitando verificar qual distribuição de probabilidade melhor se adéqua a cada conjunto de dados, sendo posteriormente realizado o cálculo da média, desvio padrão e coeficiente de variação.

Todos os cálculos foram feitos na plataforma comercial MATLAB, onde também foram construídos os histogramas. No intuito de se verificar qual distribuição de probabilidade melhor se adéqua a cada histograma realizaram-se testes de aderência nos valores da variável Erro. Foi aplicado o teste de hipótese de Kolmogorov-Smirnov na plataforma MATLAB e realizou-se ainda a análise no programa comercial STATISTICA – versão 10.0. Para mais informações sobre o teste de hipótese conferir Siegel (1956) e Morettin e Bussab (2003).

Para efeitos de comparação dos resultados foram usados como base dois trabalhos, Zhou e Huang (2012) e Toro (2014) que calcularam o Erro do Modelo para as formulações B31G, B31G Modificada, PCORRC e DNV RP-F101. A formulação BS-7910 e a formulação empírica de Ahammed não puderam ser comparadas por falta de trabalhos na literatura que utilizem estas formulações para o cálculo da variável Erro do Modelo.

4.1.1 Histogramas e distribuição de probabilidade

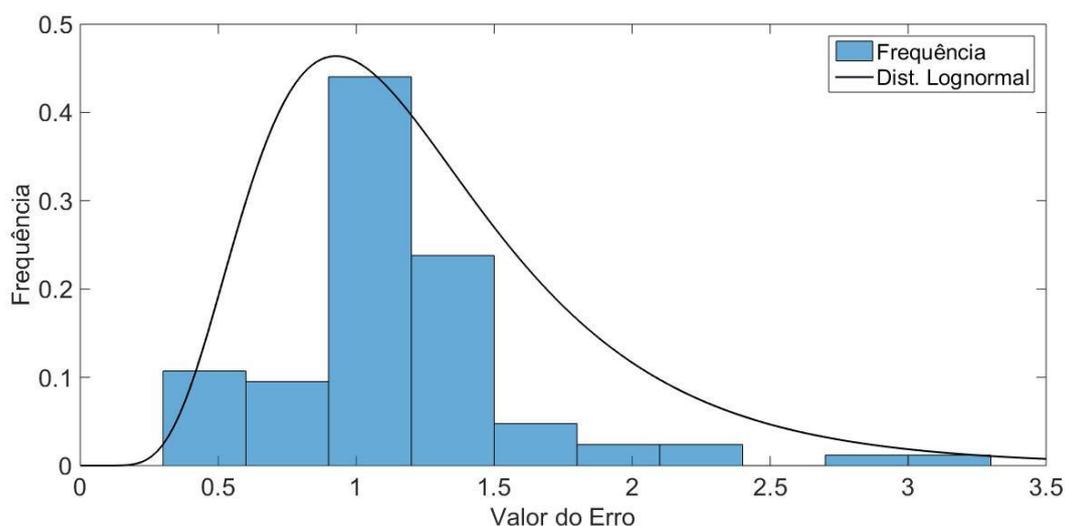
Com a construção do histograma é possível verificar quais os valores, ou a faixa de valores, que possui maior frequência dentro do conjunto de dados. Assim, pode-se concluir como o conjunto de resultados está distribuído.

Juntamente com o histograma, a distribuição de probabilidade busca representar o comportamento do conjunto de dados, sendo que a curva de distribuição de probabilidade tem uma representação contínua dos dados. Logo, a curva de distribuição de probabilidade que melhor representará o conjunto de dados será aquela que tiver um bom ajuste ao histograma.

O cálculo da variável Erro do Modelo é feito para cada uma das seis formulações semi-empíricas. Sendo assim, realizou-se o procedimento de construção do histograma e verificação de distribuição de probabilidade para cada uma das formulações. O teste de Kolmogorov-Smirnov foi aplicado para oito distribuições (Normal, Lognormal, Frechét, Gumbel, Weibull, Gama, Extremo Valor e Rayleigh), verificando-se quais hipóteses eram aceitas e sendo adotada a que obteve o maior grau de concordância entre a distribuição e o conjunto de dados.

No Gráfico 7 é apresentado o histograma da variável Erro do Modelo para a formulação empírica de Ahammed com a curva de distribuição Lognormal que foi a que melhor se adequou ao conjunto de dados.

Gráfico 7 - Histograma da variável Erro do Modelo e distribuição de probabilidade lognormal para o formulação de Ahammed.

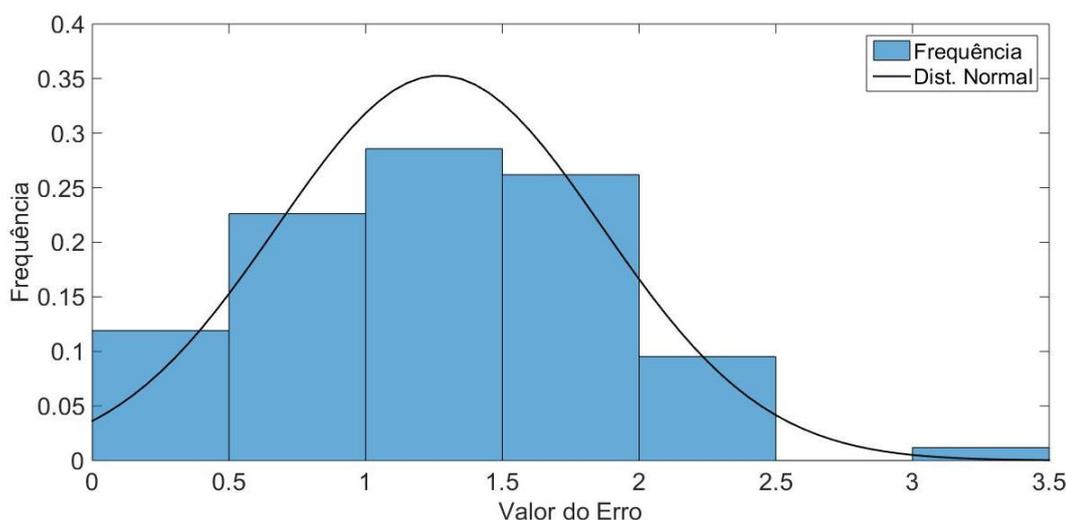


FONTE: O Autor (2019).

Pelo Gráfico 7, verifica-se que alguns valores de Erro são demasiadamente altos, como valores em torno de três, mas como pode ser visto no próprio gráfico, em torno de 70% dos valores situam-se entre 1,0 e 1,5.

Apresenta-se no Gráfico 8 o histograma da variável Erro do Modelo para a formulação semi-empírica BS-7910. Neste trabalho foi adotada a versão da norma atualizada em 2013, sendo a versão mais recente até a elaboração desta pesquisa. A distribuição Normal apresentou os melhores resultados no teste de aderência.

Gráfico 8 - Histograma da variável Erro do Modelo e distribuições de probabilidade normal para o modelo BS-7910.

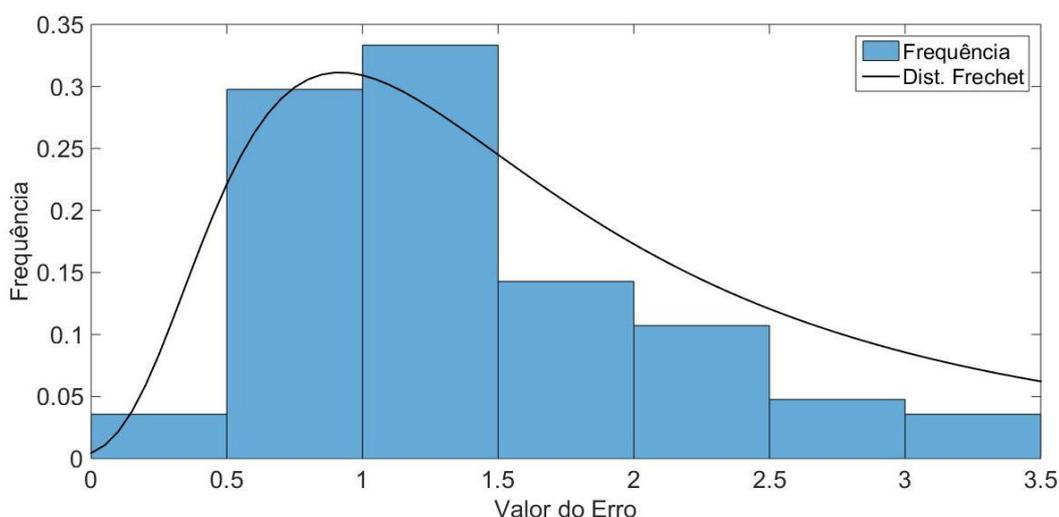


FONTE: O Autor (2019).

Os dados obtidos com esta formulação se apresentam de forma menos concentrada, não havendo uma única faixa de valores que possui uma frequência elevada. Esta observação é evidenciada pelo fato de que a faixa de valores de Erro que fica entre 1,0 e 1,5 é a de maior representatividade e possui uma frequência menor que 30%. Tem-se na realidade três faixas de valores que somadas representam em torno de 80% dos valores, tais faixas englobam os valores de Erro de 0,5 até 2,0.

No Gráfico 9 pode ser visto o histograma da variável Erro do Modelo para a formulação semi-empírica B31G. Dentre as distribuições analisadas, a distribuição Frechet demonstrou os melhores resultados na descrição do comportamento dos dados.

Gráfico 9 - Histograma da variável Erro do Modelo e distribuições de probabilidade para o modelo B31G.



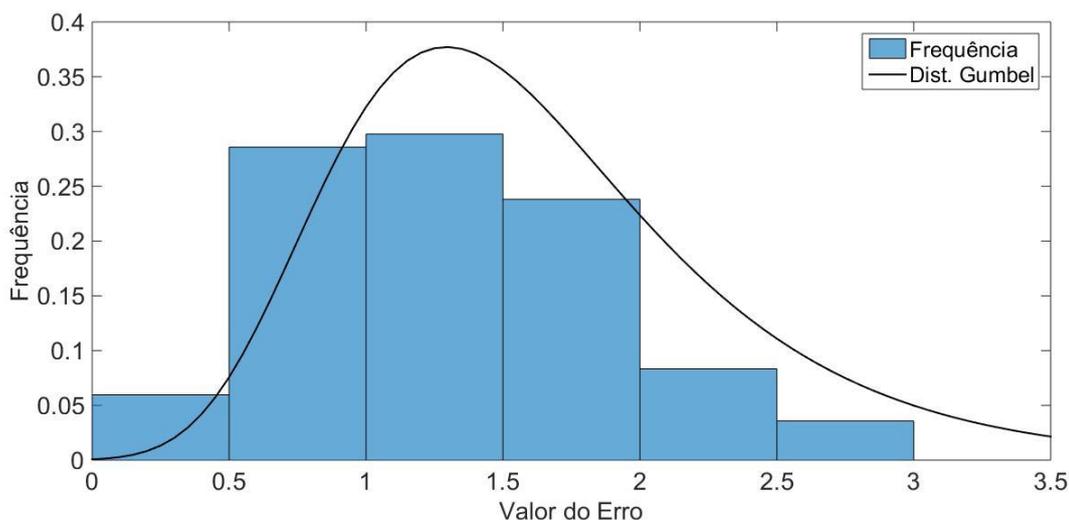
FONTE: O Autor (2019).

Na distribuição dos resultados, mais de 60% dos valores da variável Erro se agrupa em torno do valor unitário, estando num intervalo entre 0,5 e 1,5. Após o valor de 1,5 há uma tendência decrescente a medida que o valor da variável Erro aumenta. Mesmo assim, a citada formulação apresenta valores que podem ser considerados altos, demonstrando valores de Erro acima de 2,0 e chegando até valores acima de 3,0.

Comparando com resultados da literatura, tanto Zhou e Huang (2012) quanto Toto (2014) adotaram o mesmo tipo de distribuição de probabilidade para a formulação B31G, tendo sido adotada a Frechet como representante do comportamento.

No Gráfico 10 pode ser visto o histograma da variável Erro do Modelo para a formulação semi-empírica B31G Modificada. A distribuição Gumbel demonstrou o melhor comportamento no teste de aderência.

Gráfico 10 - Histograma da variável Erro do Modelo e distribuições de probabilidade Gumbel para o modelo B31G Modificada.



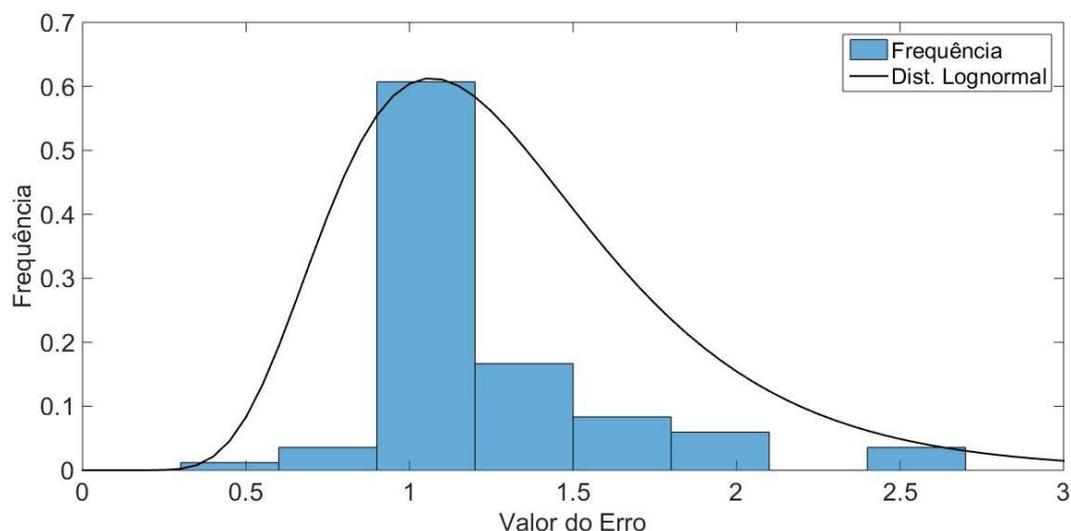
FONTE: O Autor (2019).

Os resultados obtidos assemelham-se aos resultados oriundos da formulação B31G. No entanto, representam um melhor ajuste, como pode ser constatado pelo fato dos valores de Erro não superarem o patamar de 3,0. Diferente da formulação precedente, cujos valores atingiam a marca de 3,5.

Comparando com resultados da literatura, observa-se que tanto Zhou e Huang (2012) quanto Toro (2014) também concluem que a distribuição de probabilidade aplicada para a formulação B31G Modificada é a distribuição Gumbel.

No Gráfico 11 pode ser visto o histograma da variável Erro do Modelo para a formulação semi-empírica DNV RP-F101. A distribuição aplicada neste histograma foi a distribuição Lognormal.

Gráfico 11 - Histograma da variável Erro do Modelo e distribuições de probabilidade lognormal para o modelo DNV RP-F101.



FONTE: O Autor (2019).

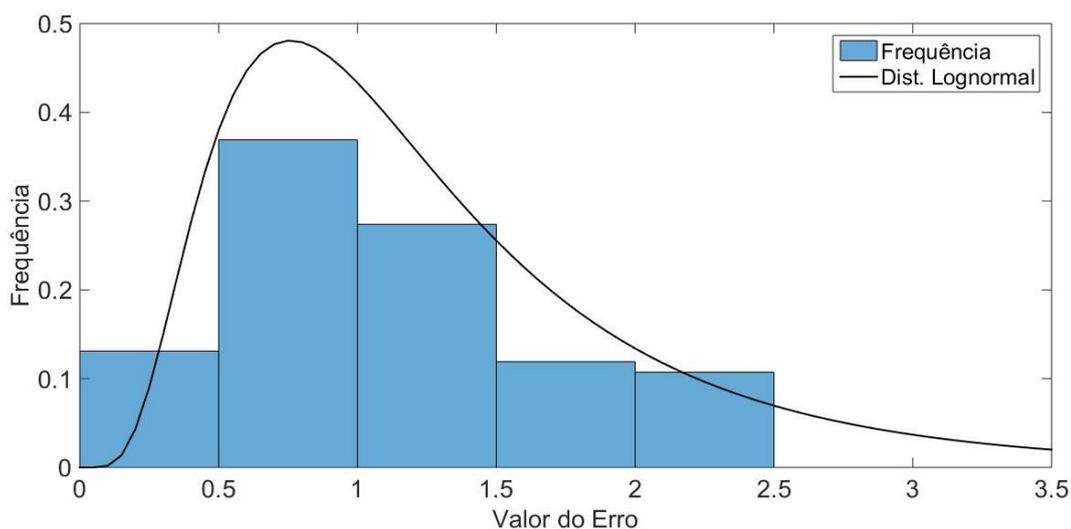
Como pode ser visto no Gráfico 11, o comportamento desta variável é bastante satisfatório dentro da ideia central de cálculo do erro, que busca a condição onde a maior faixa de valores de Erro esteja próximo do valor unitário. Pode-se analisar que em torno de 60% dos valores estão na faixa do valor unitário, não havendo uma grande quantidade de altos valores de erro. Apenas 5% dos valores estão na faixa de 2,5, sendo todos os outros valores abaixo de 2,0.

Para este conjunto de resultados foi determinado que a distribuição Lognormal representa de forma eficiente o comportamento dos dados, sendo este o mesmo resultado encontrado por Zhou e Huang (2012) e Toro (2014).

No Gráfico 12 pode ser visto o histograma da variável Erro do Modelo para a formulação semi-empírica PCORRC. O citado gráfico apresenta um comportamento que pode ser considerado satisfatório, uma vez que aproximadamente 60% dos valores do erro estão na faixa entre 0,5 e 1,5. Os valores máximos para o erro também não se configuram em um patamar tão

elevado, estando abaixo de 2,5. A distribuição de probabilidade mais próxima à configuração do histograma foi a distribuição Lognormal.

Gráfico 12 - Histograma da variável Erro do Modelo e distribuições de probabilidade para o modelo PCORRC.



FONTE: O Autor (2019).

Observa-se que o resultado obtido para esta formulação está em conformidade com as conclusões encontradas por Toro (2014), no entanto destoam do obtido em Zhou e Huang (2012) que indicam a distribuição Gumbel como a distribuição que melhor se adequa para a formulação PCORRC.

As divergências encontradas podem ser explicadas visto que a base de dados nos trabalhos não são as mesmas. Cada base de dados foi construída por uma quantidade diferente de ensaios laboratoriais retirados de diferentes fontes da literatura.

Nos seus estudos Toro (2014) utiliza defeitos reais, outros artificiais para constituir uma base de dados, chegando a utilizar 405 ensaios, para formulações que impõem delimitações. Como o caso da DNV RP-F101 que delimita uma relação mínima entre espessura do duto e profundidade do defeito, sendo utilizado em torno de 290 ensaios. A base de dados de Zhou e Huang (2012) é mais reduzida chegando, no máximo, a 150 ensaios. No entanto, no caso de

formulações com mais restrições utilizam-se em torno de 70 ensaios. A base de dados deste trabalho, composta por 84 experimentos, foi montada para que todos os dados atendessem aos critérios, podendo ser utilizada a mesma quantidade em todas as seis formulações.

4.1.2 Caracterização estatística

Na Tabela 19, podem ser conferidos os resultados obtidos na caracterização estatística de cada conjunto de resultados. Nesta tabela estão presentes os valores de média, desvio padrão e coeficiente de variação de cada uma das seis formulações estudadas.

Utilizou-se a plataforma comercial MATLAB para realizar o cálculo da Média, Coeficiente de Variação (CV) e Desvio Padrão de cada conjunto de valores. Como já mencionado na seção 2.7.6, de posse do valor médio torna possível corrigir o modelo matemático utilizado no cálculo da pressão de falha, aproximando os resultados teóricos aos valores reais. Os demais valores, coeficiente de variação e desvio padrão, foram calculados uma vez que são dados necessários para a aplicação do Método de Confiabilidade de Primeira Ordem (FORM).

Tabela 19 - Caracterização da Variável Erro do Modelo.

Modelo	Distribuição	Média	Desvio Padrão	CV
B31G	Frechet	1,3563	0,6702	0,4942
B31G Modificado	Gumbel	1,2939	0,5738	0,4434
BS-7910	Normal	1,2697	0,5951	0,4687
DNV RP-F101	Lognormal	1,2307	0,3789	0,3079
Ahammed	Lognormal	1,1478	0,4634	0,4037
PCORRC	Lognormal	1,0956	0,6069	0,5540

FONTE: O Autor (2019).

Pode-se concluir através da análise dos resultados que todas as formulações fornecem um valor de média acima da unidade. Sendo assim, pode-se afirmar que todos predizem um valor conservador para a pressão de falha.

Os valores de Erro superam a unidade quando a pressão de falha oriunda de ensaios laboratoriais é superior ao valor predito pelas formulações semi-empíricas. Verifica-se desta forma que os valores de pressão de falha calculados pelas formulações semi-empíricas tendem a ser menores que os valores obtidos em laboratório. Significa dizer que as formulações semi-empíricas predizem valores inferiores aos reais, garantindo uma faixa de segurança com a obtenção de valores conservadores.

No entanto, quanto maior for a discrepância entre os valores preditos e os valores reais, maior será o impacto no dimensionamento e análise do duto, uma vez que estabelecer um valor de resistência muito abaixo do real resulta num superdimensionamento da estrutura, encarecendo o processo construtivo.

Na medida que se adota a correção do valor de resistência com a aplicação da variável Erro do Modelo, aproxima-se à condição real e busca-se um dimensionamento realmente otimizado, visto que o valor de resistência não carrega um grau de conservadorismo tão elevado.

Dentre os modelos estudados, o modelo B31G representa o de maior conservadorismo na obtenção da pressão de falha tendo a média mais distante da unidade (1,3563). Frente ao estudo das características estatísticas, pode-se verificar que a citada formulação possui a segunda menor precisão tendo um coeficiente de variação em torno de 50%, evidenciando uma grande dispersão entre os resultados obtidos.

A formulação B31G Modificada representa um ajuste e uma espécie de adequação à B31G, resultando em um coeficiente de variação inferior (cerca de 44%) e um valor médio um pouco menor (1,2939). No entanto, ainda representa um valor distante do valor ideal que seria a média igual à 1,00.

Em seguida, tem-se a formulação BS-7910 que apresenta uma média inferior a B31G Modificada (1,2697). No entanto, apresenta um coeficiente de variação superior ao obtido com a B31G Modificada, chegando a quase 47%.

A formulação DNV RP-F101 apresenta um comportamento diferente das outras três formulações citadas. Ainda que apresente uma média (1,2307) próxima a média apresentada pela BS-7910, a DNV RP-F101 possui o menor coeficiente de variação (aproximadamente 31%) dentre todas as formulações estudadas. Este comportamento pode ser verificado na medida que diferentemente das outras três formulações que seguem uma estrutura parecida para seus histogramas, a DNV RP-F101 apresenta um comportamento distinto, tendo uma única faixa de valores em destaque, significando um maior agrupamento dos valores.

A formulação empírica de Ahammed apresenta resultados parecidos com os obtidos pela DNV RP-F101, possuindo uma configuração de histograma semelhante, como pode ser conferido nos gráficos das Figuras 17 e 21, o que reflete na segunda menor coeficiente de variação dentre as formulações analisadas, aproximadamente 40%. Com relação à média, seu resultado é inferior a obtida na DV RP-F101 sendo igual a 1,1478.

Se tratando de média, o melhor resultado foi obtido através da aplicação da PCORRC, tendo uma média de 1,0956. No entanto, quando se analisa o comportamento do conjunto de dados, verifica-se que a dispersão dos dados para esta formulação é a mais elevada, possuindo um coeficiente de variação que supera os 55%.

Esse comportamento pode ser conferido na análise do histograma da Figura 23, que evidencia o comportamento mais disperso do conjunto de valores do Erro. Essa análise é feita tomando como base o formato do histograma, que apresenta duas ou três faixas de valores com uma frequência mediana (em torno dos 30%) para cada uma das faixas, demonstrando que há dois ou três intervalos de valores que se fazem frequentes ao longo da amostra, deixando evidente certa dispersão dos resultados. Este comportamento se mantém semelhante nos

gráficos dos modelos BS-7910, B31G e B31G Modificada, que podem ser vistos nas Figuras 18, 19 e 20, respectivamente.

Conclui-se a partir do valor médio da variável Erro do Modelo, informados na Tabela 17, que as formulações B31G, B31G Modificada, BS-7910 predizem os valores de pressão de falha mais conservadores, procurando manter um maior intervalo de segurança em relação aos valores reais de pressão de falha.

A DNV RP-F101 também apresenta uma tendência a predizer valores inferiores do que os valores reais, mas já demonstra um comportamento menos conservador do que as outras três formulações citadas. As formulações de Ahammed e a PCORRC apresentam os comportamentos menos conservadores, obtendo-se os resultados mais próximos dos valores de laboratório, definindo assim um menor intervalo de segurança.

Quando se observa a dispersão dos resultados em torno da média, a formulação DNV RP-F101 apresenta o melhor comportamento dentre as formulações estudadas, seguido pela formulação de Ahammed. Já os modelos B31G, B31G Modificado, BS-7910 e PCORRC seguem configurações semelhantes com grande dispersão dos resultados.

Frente a estas análises, optou-se pela adoção da formulação semi-empírica DNV RP-F101 para se realizar o dimensionamento geométrico otimizado. A escolha se deve ao fato desta formulação apresentar os resultados mais coesos, estando em sua maior parte próximos, com a menor dispersão-

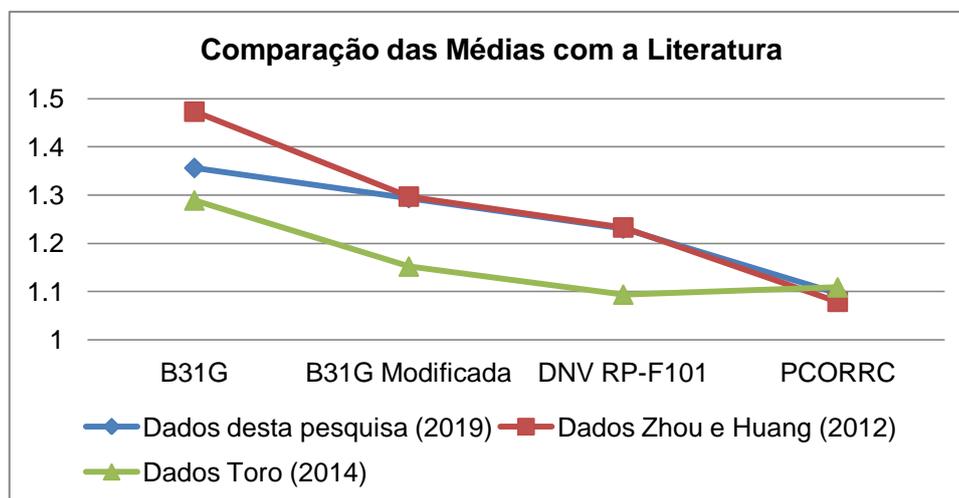
Sob a mesma justificativa era possível optar pela formulação semi-empírica de Ahammed que apresenta uma média menor a média apresentada pela formulação escolhida. No entanto, deu-se prioridade a uma formulação que possui normatização e com o menor grau de dispersão estabelecendo um resultado mais homogêneo.

4.1.3 Comparação com resultados da literatura

Comparando os resultados obtidos com os encontrados na literatura, pode-se perceber que os valores seguem os estudos já realizados, estando numa faixa aceitável. Tais resultados podem ser vistos no Gráfico 13, onde tem-se os valores

das médias obtidas nesta pesquisa e as médias obtidas por Toro (2014) e Zhou e Huang (2012).

Gráfico 13 - Comparativo com os valores da média da variável Erro do Modelo.

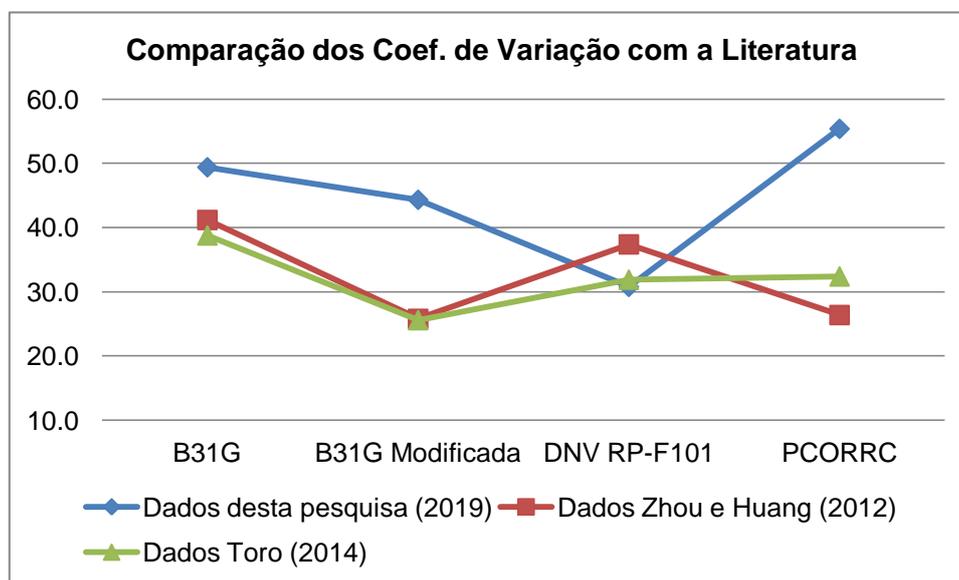


FONTE: O Autor (2019).

Os valores de média obtidos nesta pesquisa estão seguindo o mesmo comportamento da média dos outros trabalhos, tendo para os três trabalhos a formulação B31G como a metodologia mais conservadora e a PCORRC como a menos conservadora. Como já mencionado anteriormente, os autores não utilizaram as expressões empíricas de Ahammed e BS-7910.

Comparando-se os valores do coeficiente de variação, verifica-se que a exceção do modelo PCORRC, os demais resultados foram semelhantes aos obtidos em outras literaturas. Os dados obtidos constam no Gráfico 14.

Gráfico 14 - Comparativo com os valores do coeficiente de variação da variável Erro do Modelo.



FONTE: O Autor (2019).

Verificou-se que o resultado para a formulação PCORRC destoa dentre os outros uma vez que se obteve para essa formulação o maior coeficiente de variação, resultado não obtido pelas outras duas pesquisas. Assim, verifica-se que nesta pesquisa a aplicação desta formulação apresentou um resultado bastante disperso.

4.2 Cálculo do projeto ótimo

Como já detalhado nas Tabelas 12 e 13 foram usados os dados iniciais de quatro casos oriundos da literatura para realizar-se o dimensionamento geométrico otimizado do duto, determinando os valores ótimos de diâmetro externo e a espessura que garantam as condições pré-determinadas de segurança.

O estudo foi feito ao longo do tempo, se adotando variações temporais de 1, 10, 20, 30, 40 e 50 anos, realizando para cada variação temporal o dimensionamento do duto, adotando um índice de confiabilidade fixo e um índice de confiabilidade corrigido.

Como já detalhado na seção 2.7.5, o índice de confiabilidade corrigido é obtido através da probabilidade de falha total e o índice de confiabilidade fixo é determinado em função da probabilidade de falha anual. Como citado na seção 3.2.1 o índice de confiabilidade fixo adotado é igual a 3,1.

Para realizar o dimensionamento ótimo são aplicados os quatro exemplos detalhados na seção 3.2. Cada exemplo possui um conjunto de dados que servem como parâmetros de entrada para realizar o dimensionamento ótimo. Sendo assim, os exemplos fornecem os parâmetros de comprimento e profundidade do defeito, tensão última e pressão aplicada, e o processo de otimização busca os valores ótimos de espessura e diâmetro externo do duto, tendo que a análise de confiabilidade acoplada ao processo de otimização garante que o resultado final atende aos critérios de segurança pré-definidos.

Na análise dos resultados obtidos, verificou-se que com a aplicação da formulação DNV RP-F101, a variável de projeto diâmetro externo do duto se manteve com valor fixo, sendo que em todas os exemplos analisados, independente dos valores de entrada, a variável finalizou o processo de otimização tendo seu valor fixado pelo limite máximo imposto nas condições de contorno. Na aplicação da formulação B31G, usada em um exemplo para realizar a comparação dos resultados de otimização, foram obtidos outros valores para a variável diâmetro externo do duto.

Para realizar o estudo de como o dimensionamento do duto se comporta com a adoção de um índice de confiabilidade fixo e comparar com o comportamento adotado com um índice de confiabilidade variável aplicou-se os quatro exemplos analisados com os valores limitantes definidos na seção 3.2.1. Aplica-se a formulação DNV RP-F101 por ter apresentado os resultado com menor grau de dispersão. Nesta primeira etapa aplicando-se apenas a citada formulação, o resultado encontrado para o diâmetro externo foi de 1,20 metros. Assim, o processo de otimização ficou refletido sobre a segunda variável de projeto, a espessura do duto. Para evidenciar isto, serão apresentados os valores obtidos para cada caso.

Em todas as análises feitas, o valor final da função objetivo ficou abaixo do valor de 10^{-3} que representa o valor máximo da tolerância. Desta forma, garante-se que o valor do índice de confiabilidade alvo é atendido. Foram analisados outros valores de tolerância, sendo testados os valores de 10^{-5} e 10^{-7} , não havendo alterações significativas nos resultados obtidos mas elevando consideravelmente o tempo de processamento.

Para permitir comparações mais diretas e eficientes permitindo uma melhor visualização dos resultados, os mesmos também são apresentados em termos da área de aço da seção transversal do duto.

4.2.1 Exemplo 1 – Zhang e Zhou (2013)

Utilizando os dados deste primeiro exemplo, foi realizado o dimensionamento otimizado, adotando inicialmente um índice de confiabilidade alvo fixo (B_{fixo}) e em seguida o processo de otimização é refeito adotando-se o índice de confiabilidade corrigido (B_{Variando}).

Para ambos os cenários, o dimensionamento otimizado foi feito para um espaço temporal de 1, 10, 20, 30, 40 e 50 anos, permitindo o estudo do comportamento da estrutura com o avanço temporal.

Na Tabela 20 podem ser conferidos os resultados finais do dimensionamento otimizado para a espessura do duto. Como já citado, o valor do diâmetro externo resultou em 1,20 metros em todos os casos. Nesta Tabela são apresentados os valores da espessura tanto para a análise com o índice de confiabilidade alvo fixo quanto variando, exibindo-se ao lado de cada valor de espessura a respectiva área de aço da seção transversal.

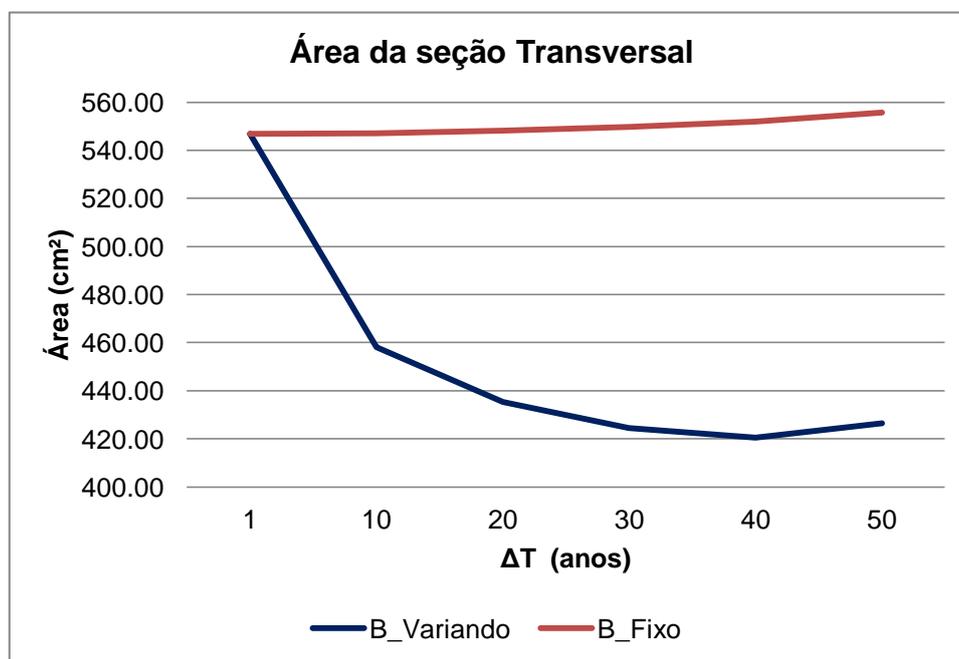
Tabela 20 – Valores obtidos no dimensionamento otimizado do exemplo 1.

ΔT (anos)	B_Fixo		B_Variando	
	Espessura (cm)	Área (cm ²)	Espessura (cm)	Área (cm ²)
1	1,469	546,91	1,469	546,91
10	1,469	547,01	1,228	458,18
20	1,472	548,09	1,166	435,39
30	1,476	549,65	1,136	424,37
40	1,482	551,94	1,126	420,45
50	1,493	555,70	1,142	426,49

FONTE: O Autor (2019).

No Gráfico 15 podem ser conferidos os resultados obtidos nesta pesquisa para o dimensionado otimizado nos dois cenários citados para o exemplo 1 organizados em forma de gráfico, permitindo assim uma melhor análise.

Gráfico 15 – Representação dos resultados do exemplo 1.



FONTE: O Autor (2019).

A partir do Gráfico 15 conclui-se que o comportamento com a aplicação do índice de confiabilidade fixo é aproximadamente constante, tendo que a medida que o período temporal aumenta, aumenta-se também a área de seção transversal. Esse comportamento já era esperado, visto que, baseando-se em estudos da literatura, citando-se, por exemplo, Torres (2009), pode-se afirmar que o aumento no espaço temporal exige um aumento da área de aço.

Analisando o caso onde há o ajuste do índice de confiabilidade alvo, tem-se um comportamento diferente. Há uma primeira faixa de valor, determinada entre 1 e 40 anos onde a área de seção transversal tende a diminuir e só após esse período que se inicia um aumento. Esse fato é explicado através da análise de que, à medida que o período temporal aumenta o índice de confiabilidade alvo corrigido diminui, partindo de 3,1 para o índice de confiabilidade anual para um valor de 1,64 para o período de 50 anos.

Baseando-se nos conceitos de confiabilidade, quando ocorre a diminuição do índice de confiabilidade é esperado que ocorra uma diminuição da área de aço necessária para resistir aos esforços, uma vez que se diminuiu a exigência de segurança com a redução do índice de confiabilidade. Assim, tendo uma redução no índice de confiabilidade alvo permite-se que a seção diminua já que o critério de segurança se torna mais flexível, conseguindo-se entender essa tendência inicial de redução da área de seção transversal.

No período após os 40 anos essa tendência se inverte, e tem-se que a área de seção transversal tende a aumentar. Na compreensão desse comportamento deve-se entender que fatores como a profundidade e a largura do defeito estão diretamente ligadas ao valor da variação temporal, ou seja, quanto maior a faixa temporal maior serão os valores de profundidade do defeito e de largura do mesmo. Assim, para esse segundo trecho, tem-se o comportamento clássico demonstrado em Torres (2009) que afirma que com o aumento do tempo deve-se ter um aumento da estrutura que resiste a ação, no caso a área de seção transversal.

Aumentando-se o defeito deve-se aumentar a seção transversal, explicando-se assim o comportamento de crescimento da área de aço da seção

transversal, que em suma, é o que rege o comportamento da primeira curva onde é estabelecido um índice de confiabilidade alvo fixo.

Para o índice de confiabilidade corrigido, pode-se entender que há a junção dos dois comportamentos citados, havendo uma redução da seção transversal influenciada pela diminuição do índice de confiabilidade e em sequência há o aumento da área de seção transversal que pode ser atribuída à um considerável aumento do defeito imposto por um período temporal elevado.

Conclui-se desta forma que no primeiro trecho, até 40 anos, a redução do índice de confiabilidade alvo é o fator que se sobressai, levando a uma redução da área de seção transversal. No segundo trecho, após os 40 anos, a redução do índice de confiabilidade perde o protagonismo passando a ser a profundidade e largura do defeito os fatores mais impactantes, ou seja, o fator tempo começa a influenciar mais na configuração do duto do que a redução do índice de confiabilidade alvo resultando em um aumento na seção transversal para compensar o aumento na geometria do defeito.

4.2.2 Exemplo 2 – Bazan e Beck (2013)

Adotando-se os valores do exemplo 2, detalhados na seção 3.2, buscou-se encontrar os valores otimizados para os dois cenários. Assim como foi analisado no exemplo anterior, adotou-se inicialmente o índice de confiabilidade alvo fixo (B_Fixo) e posteriormente analisa-se com o índice de confiabilidade alvo variante (B_Variante). Os resultados obtidos para a espessura, assim como os valores da área da seção transversal podem ser conferidos na Tabela 21.

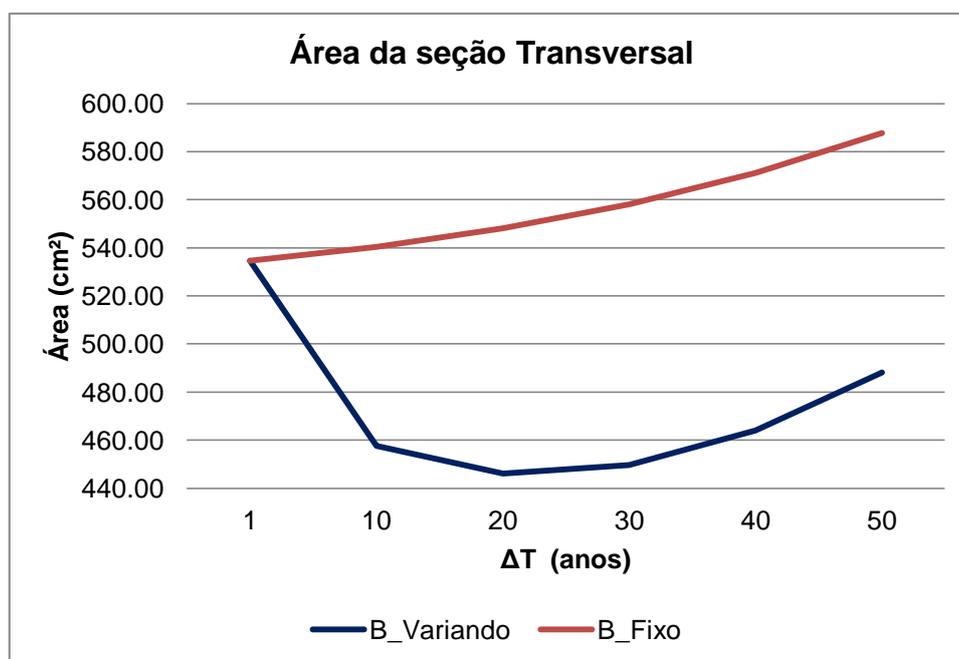
Tabela 21 – Valores obtidos no dimensionamento otimizado do exemplo 2.

ΔT (anos)	B_Fixo		B_Variando	
	Espessura (cm)	Área (cm ²)	Espessura (cm)	Área (cm ²)
1	1,43542	534,67	1,43542	534,67
10	1,45086	540,35	1,22614	457,52
20	1,47177	548,04	1,19514	446,07
30	1,499	558,05	1,20505	449,73
40	1,53429	571,02	1,24397	464,10
50	1,57999	587,80	1,30893	488,07

FONTE: O Autor (2019).

Os resultados são exibidos no Gráfico 16, onde é possível verificar o comportamento da curva da área da seção transversal em função da variação temporal adotado. Neste exemplo, assim como no anterior, foram realizados os dimensionamentos otimizados com o estudo para 1, 10, 20, 30, 40 e 50 anos.

Gráfico 16 - Representação dos resultados do exemplo 2.



FONTE: O Autor (2019)

Por meio dos resultados demonstrados pode-se verificar que o comportamento segue um formato semelhante ao do Exemplo 1. Para os valores de índice de confiabilidade alvo fixo tem-se um crescimento constante da área de seção transversal, uma vez que o único fator regente é o tempo que eleva as propriedades geométricas do defeito exigindo um aumento da área de aço.

Para o índice de confiabilidade corrigido o comportamento é semelhante, tendo um primeiro trecho onde o valor da área da seção transversal diminui, sendo neste exemplo o trecho entre 1 e 20 anos, seguido por um segundo trecho onde a área tende a ir aumentando, estabelecido na parte após os 20 anos.

4.2.3 Exemplo 3 – Zhou (2010)

O terceiro exemplo estudado, cujos parâmetros de entrada foram detalhados na seção 3.2, seguiu-se a mesma estruturação dos outros dois exemplos, onde estudou-se o comportamento do dimensionamento otimizado com a adoção do índice de confiabilidade alvo fixo (B_Fixo) e com o índice de confiabilidade alvo variando (B_Variando), procurando-se verificar se o comportamento dos resultados obtidos se mantinham.

Os resultados obtidos para a espessura do duto são demonstrados na Tabela 22. Nela é possível verificar também os valores da área da seção transversal para cada configuração. A área é calculada com base na espessura e no diâmetro do duto, ambos obtidos no processo de otimização. Reafirma-se que os valores finais para o diâmetro do duto, em todos os casos, se mantiveram constante, igual a 1,20 metros.

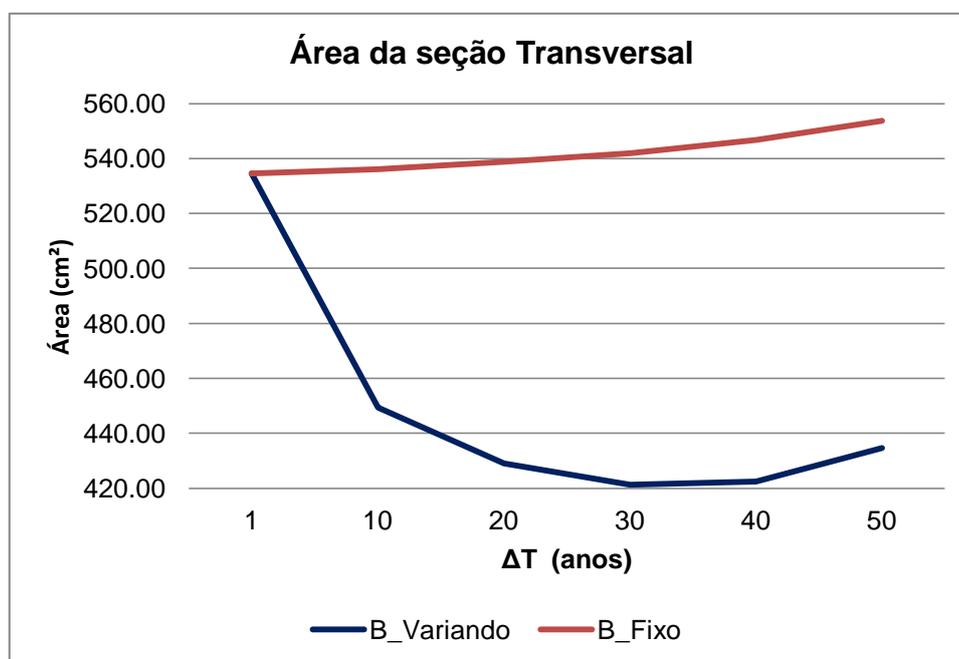
Tabela 22 – Valores obtidos no dimensionamento otimizado do exemplo 3.

ΔT (anos)	B_Fixo		B_Variando	
	Espessura (cm)	Área (cm ²)	Espessura (cm)	Área (cm ²)
1	1,435	534,55	1,435	534,55
10	1,439	536,04	1,204	449,30
20	1,446	538,72	1,149	428,92
30	1,455	541,86	1,128	421,23
40	1,468	546,68	1,131	422,43
50	1,487	553,66	1,164	434,58

FONTE: O Autor (2019).

No Gráfico 17 é possível verificar o gráfico com o comportamento da área de aço da seção transversal dimensionada a partir dos dados do exemplo 3, onde como já esperado, o comportamento para o índice de confiabilidade alvo fixo se repete configurando um crescimento constante.

Gráfico 17 - Representação dos resultados do exemplo 3.



FONTE: O Autor (2019).

Para o índice de confiabilidade corrigido a comportamento geral da curva se mantém quando comparada aos outros dois exemplos. Nesse o primeiro trecho se dá até os 30 anos, configurando a parte onde a área de seção transversal vai diminuindo.

O segundo trecho se dá após os 30 anos, quando a seção transversal vai aumentando. Observa-se que há um trecho intermediário localizado entre 30 e 40 anos onde existe apenas um pequeno aumento da seção transversal, apresentando um comportamento quase constante. No entanto, mesmo assim, o comportamento geral da curva é semelhante ao das outras duas curvas dos Exemplos 1 e 2.

4.2.4 Exemplo 4 – Leira, Naess e Naess (2016)

Realizou-se, ainda, o estudo de um quarto exemplo, como detalhado na seção 3.2. O principal intuito é verificar se o comportamento dos outros exemplos se mantém, permitindo um maior efeito comparativo. Os resultados obtidos podem ser verificados na Tabela 23.

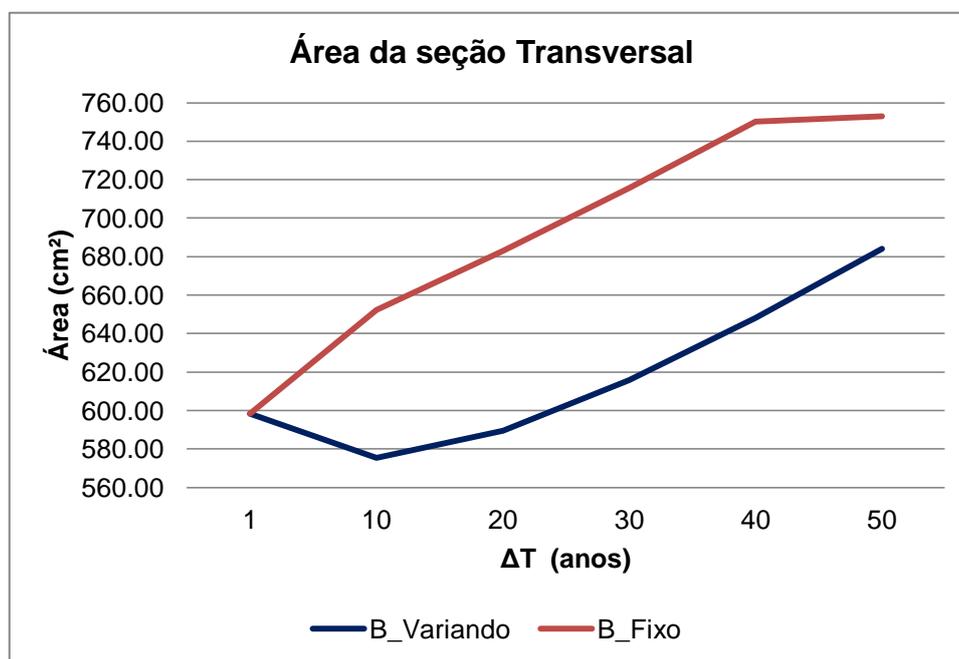
Tabela 23 – Valores obtidos no dimensionamento otimizado do exemplo 4.

ΔT (anos)	B_Fixo		B_Variando	
	Espessura (cm)	Área (cm ²)	Espessura (cm)	Área (cm ²)
1	1,609	598,42	1,609	598,30
10	1,756	652,24	1,546	575,34
20	1,839	682,83	1,584	589,45
30	1,929	715,58	1,656	615,79
40	2,024	750,08	1,745	648,11
50	2,032	753,02	1,843	684,21

FONTE: O Autor (2019).

Para este último exemplo, o comportamento pode ser visto no Gráfico 18.

Gráfico 18 - Representação dos resultados do exemplo 4.



FONTE: O Autor (2019).

Para o índice de confiabilidade fixo o comportamento se mantém, sendo que a medida que há um aumento no tempo há um aumento na seção transversal. Existe dois trechos onde até os 40 anos o crescimento é mais acentuado e entre 40 e 50 anos o crescimento é mais modesto, no entanto ainda assim há um crescimento.

A alteração de comportamento da curva pode ser explicada pelo fato de que a configuração obtida para os 40 anos já é uma estrutura robusta sendo capaz de ter um comportamento mais rígido e exigir um menor acréscimo de área no período posterior.

Existe uma alteração nesta curva de comportamento com aplicação do índice de confiabilidade corrigido com o tempo. Aqui, a faixa onde ocorreu a redução da área de aço da seção transversal representa apenas o trecho entre 1 ano e 10 anos, depois disso a área adota um comportamento crescente. Isso significa que para esta configuração o trecho onde a redução do índice de confiabilidade alvo é o fator que se sobressai representou apenas a faixa entre 1

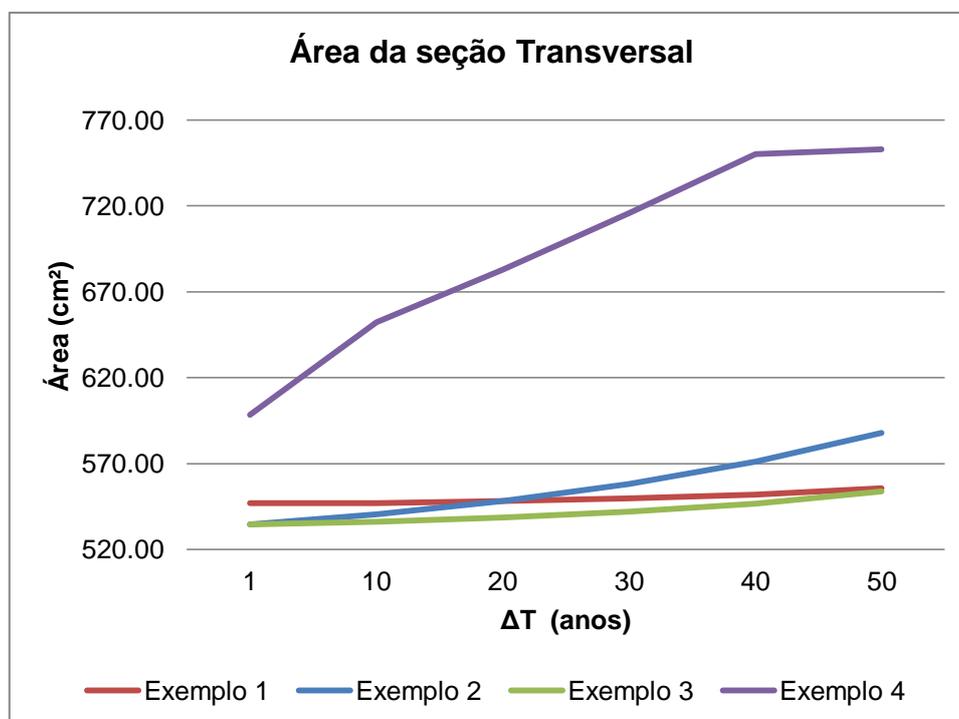
e 10 anos, sendo que para o resto do trecho o aumento da geometria do defeito em decorrência do efeito do tempo é o fator dominante.

Atribui-se que existe uma pequena faixa de redução porque o valor inicial da profundidade do defeito é consideravelmente elevado, sendo assim, a geometria do defeito começa a ser o fator mais impactante na análise mesmo para períodos temporais baixos uma vez que o defeito já se encontra em estado avançado.

4.3 Análise dos índices de confiabilidade

Para elucidar o comportamento dos resultados obtidos para a área de aço da seção transversal em função do índice de confiabilidade, apresenta-se o Gráfico 19 onde foram plotadas os resultados obtidos nos quatro exemplos analisados. Neste primeiro gráfico, apresenta-se a configuração onde foi adotado o índice de confiabilidade alvo fixo, cujo valor adotado corresponde a 3,1.

Gráfico 19 – Área de aço da seção transversal calculada com índice de confiabilidade alvo fixo.



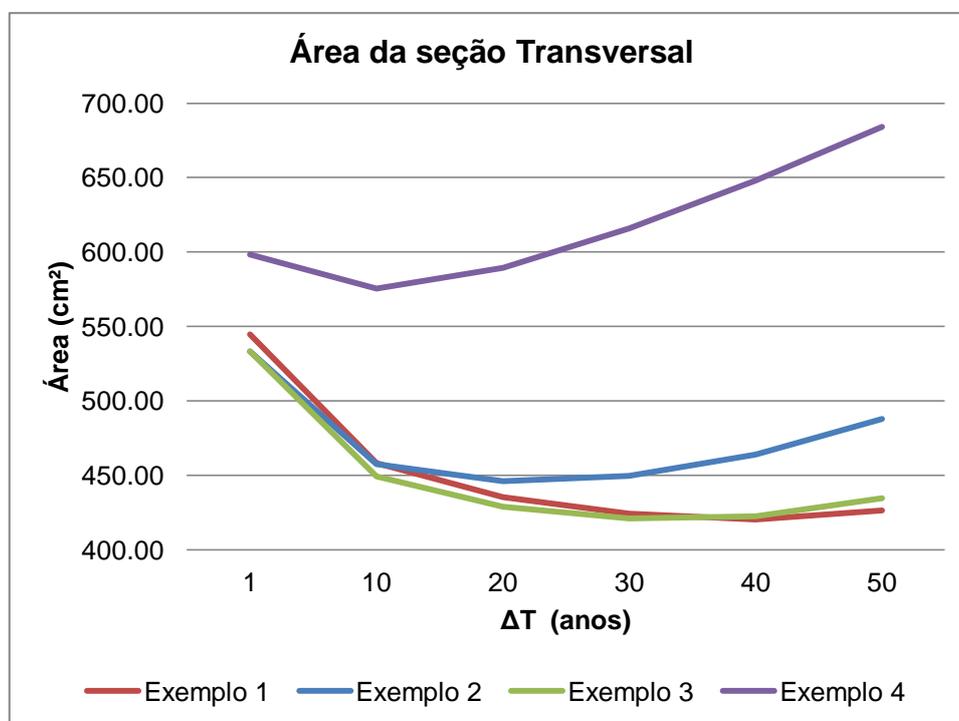
FONTE: O Autor (2019)

Dessa forma pode-se verificar que o comportamento geral dos gráficos é mantido nas quatro curvas referentes às áreas de aço da seção transversal encontradas na análise dos exemplos.

Tem-se que com o avanço temporal a seção tende a aumentar. Isso já era esperado uma vez que a medida que o período de tempo aumenta, a geometria do defeito também aumenta, deixando a estrutura mais frágil. Para compensar esse aumento de fragilidade, deve-se aumentar a área de seção transversal.

No Gráfico 20 são apresentados os resultados obtidos para o cenário onde o índice de confiabilidade alvo é corrigido e ajustável com o passar do tempo, como foi explicado na seção 3.2.1. O Gráfico 20 reúne as quatro curvas obtidas nos exemplos analisados, buscando-se assim analisar a coerência no comportamento dos resultados.

Gráfico 20 – Área de aço da seção transversal calculada com índice de confiabilidade alvo variante.



FONTE: O Autor (2019)

Analisando este gráfico verifica-se que o comportamento geral se mantém nas quatro curvas, mesmo para o caso do exemplo 4 que possui uma pequena faixa onde ocorre a redução da área de aço da seção transversal, mesmo tendo seu valor reduzido apenas entre 1 e 10 anos, ela ainda se enquadra no comportamento geral de possuir uma faixa decrescente e uma faixa crescente de valores da área.

De maneira geral, as respostas obtidas nos dimensionamentos ótimos adotando o índice de confiabilidade variante apresentam um comportamento semelhante entre si, demonstrando uma coerência entre os resultados obtidos e um comportamento que foi seguido por todos os conjuntos de resultados obtidos.

De acordo com o que foi verificado nos resultados, foi possível analisar que para a configuração onde, proporcionalmente à espessura do duto, o defeito possui uma profundidade pequena, a redução no índice de confiabilidade alvo variante é o fator que mais influencia o processo de otimização, levando ao trecho onde há a redução da área de aço da seção transversal.

Quando há um defeito mais profundo, o efeito sobre o resultado final exercido pelo fator tempo, que leva a um conseqüente aumento na geometria do defeito, passa a ter mais influência no dimensionamento otimizado, causando um maior impacto do que a redução no valor do índice de confiabilidade alvo, acarretando no aumento da área de aço da seção transversal.

4.4 Comparação entre formulações

A análise de comportamento foi realizada utilizando a formulação DNV RP-F101 considerada a mais relevante no momento da análise do erro. No intuito de verificar as variações entre as formulações, foi realizado o dimensionamento com a metodologia considerada menos eficiente, ou seja, a formulação B31G. Esta análise foi realizada com o exemplo 3 (Zhou, 2010) e os valores podem ser verificados na Tabela 24.

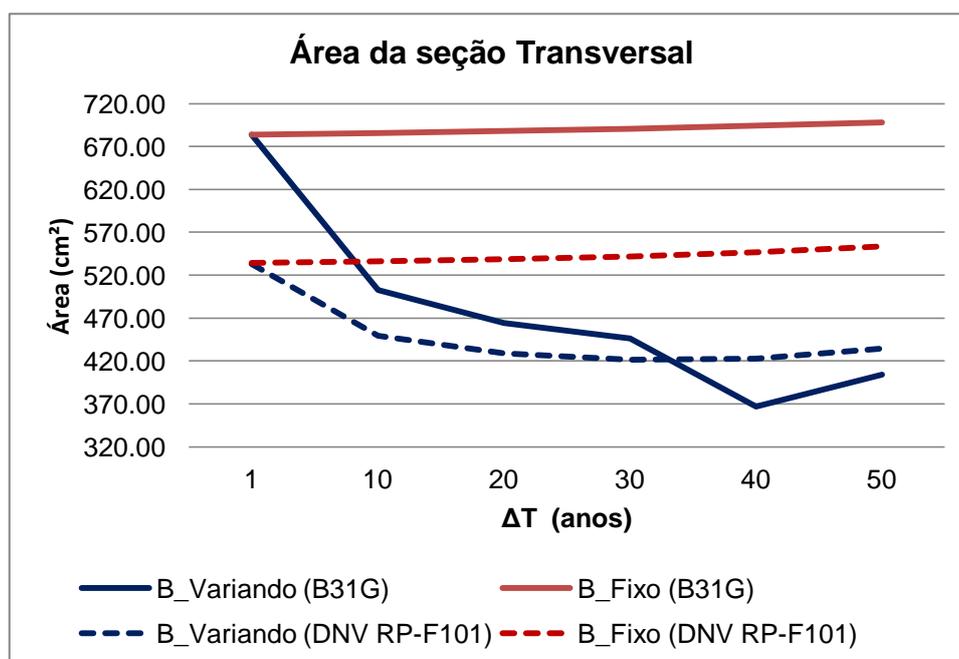
Tabela 24 – Valores obtidos no dimensionamento otimizado do exemplo 3 com aplicação da formulação B31G.

ΔT (anos)	B_Fixo			B_Variando		
	Diâmetro (cm)	Espessura (cm)	Área (cm ²)	Diâmetro (cm)	Espessura (cm)	Área (cm ²)
1	120	1,842	683,68	120	1,842	683,68
10	120	1,847	685,59	120	1,349	502,79
20	120	1,853	687,88	120	1,244	464,18
30	120	1,861	690,82	120	1,196	446,31
40	120	1,870	694,06	113,37	1,041	367,19
50	120	1,880	753,02	115	1,131	404,43

FONTE: O Autor (2019).

Os resultados obtidos são apresentados no Gráfico 21, onde as linhas sólidas mostram os resultados obtidos com a formulação B31G e as linhas tracejadas os resultados previamente conhecidos, oriundos da aplicação da formulação DNV RP-F101.

Gráfico 21 – Área de aço da seção transversal calculada a partir das formulações B31G e DNV RP-F101.



FONTE: O Autor (2019)

Verifica-se que o comportamento das curvas é semelhante para o caso onde o índice de confiabilidade alvo é fixo, adotado com o valor de 3,1. A adoção da formulação B31G leva a resultados mais conservadores com um valor maior para a área de aço da seção transversal. Seguindo a tendência de aumentar o valor da área com o incremento do tempo.

De modo geral, o comportamento da curva aplicando a B31G para o índice de confiabilidade variante apresenta um comportamento semelhante ao observado nas curvas originadas com a aplicação da DNV RP-F101, uma vez que ocorre uma faixa onde há a redução da área de aço e em seguida a área tende a aumentar.

Pode-se verificar também que os valores de área de aço para 40 e 50 anos chegam a ser inferiores aos obtidos com a aplicação da DNV RP-F101, no entanto, a curva originada na aplicação da DNV RP-F101 se caracteriza por um comportamento mais homogêneo, onde a redução da área de aço da seção transversal chega a no máximo 21%. A curva apresenta um comportamento menos suave para a formulação B31G, e pode-se observar que o valor da área de aço tem uma redução drástica chegando a diminuir mais de 46%.

Este comportamento irregular aliado ao alto valor da média e do coeficiente de variação obtido para o Erro do Modelo da B31G mostra que esta formulação pode atribuir valores com alto grau de conservadorismo ao coeficiente de correção, deixando de exercer a função de corrigir o erro para influenciar negativamente no resultado, distanciando da condição real. Como esta variável possui alta dispersão não apresenta um comportamento constante sendo assim sua função de correção pode se tornar questionável.

Assim, a formulação DNV RP-F101, apresenta resultados mais homogêneos, e portanto, representa a forma mais confiável de realizar o dimensionamento.

5 CONCLUSÕES

O objetivo inicial da pesquisa se baseou em caracterizar a variável Erro do Modelo, buscando contabilizar o erro associado a cada formulação, com isso pôde-se corrigir a predição do valor da pressão de falha, utilizada na função de falha aplicada no processo de confiabilidade estrutural. Esta correção busca fazer com que os resultados obtidos venham a ser mais próximos dos valores reais.

Com base nessa verificação do erro atrelado a cada formulação é possível concluir qual das seis formulações estudadas melhor se comporta em relação aos dados estudados. É importante salientar que diferentes conjuntos de dados geram diferentes resultados finais, assim as conclusões obtidas são aplicadas dentro das amplitudes estudadas.

Sendo aplicado este fator de correção realizou-se o projeto otimizado de dutos, onde foram obtidas as dimensões ótimas que atendem a condições pré-determinadas de segurança. Determinou-se por meio do processo de otimização realizado na plataforma MATLAB a espessura e o diâmetro ótimo do duto que, por meio da análise de confiabilidade, verificou-se que atendem ao critério de segurança, estabelecido por meio do índice de confiabilidade alvo.

Na primeira etapa desta pesquisa, realizou-se o estudo do erro para seis formulações semi-empíricas, usualmente aplicadas no campo da confiabilidade: B31G, B31G Modificada, BS-7910, DNV RP-F101, PCORRC e formulação de Ahammed. O intuito desta análise foi comparar os resultados de pressão de falha obtidos com a utilização destas formulações semi-empíricas e os resultados de ensaios de laboratório.

A variável Erro do Modelo após ser calculada e caracterizada possui um papel importante na correção dos valores preditos para a pressão de falha, aproximando os valores à condição real. Pode-se verificar que, dentre as formulações estudadas, a que apresentou uma maior aproximação com os resultados reais, oriundos de ensaios de laboratório foi a formulação PCORRC. No entanto, esta formulação apresenta uma alta dispersão nos valores. Por sua

vez, a formulação B31G apresenta a maior distância à condição real, uma vez que apresentou a maior média para a variável Erro do Modelo.

Em relação ao comportamento dos resultados, pode-se agrupá-los em dois grupos. O primeiro grupo engloba os resultados obtidos com a B31G, B31G Modificada, BS-7910 e PCORRC que apresentam as maiores dispersões dos valores, observados nos altos valores de coeficiente de variação e por histogramas que ilustram esse comportamento. O segundo grupo, é formado pela DNV RP-F101 e pela formulação de Ahammed, que apresentam os menores coeficientes de variação e englobam a maior parte dos seus resultados dentro de uma mesma faixa de valores, demonstrando assim um comportamento mais estável.

Na segunda etapa desta pesquisa, analisou-se o dimensionamento das características geométricas do duto. Nesta etapa, foram inseridos os resultados obtidos anteriormente, aplicando-se o valor da variável Erro do Modelo na correção do cálculo da pressão de falha. A formulação escolhida foi a DNV RP-F101, uma vez que concluiu-se que seus resultados apresentaram o melhor comportamento, com o menor grau de dispersão, levando a conclusão de que esta formulação apresentou os resultados mais coesos.

Baseando-se nos resultados dos quatro exemplos estudados é possível confirmar um comportamento já esperado no tocante a análise com o índice de confiabilidade alvo fixo, garantindo que a medida que o tempo avança a área de aço da seção transversal vai aumentando.

Quando se realiza a correção em função do tempo decorrido da probabilidade de falha anual passando-se a adotar a probabilidade de falha total tem-se uma alteração no comportamento dos resultados.

Os resultados obtidos com a adoção do índice de confiabilidade variante com o tempo fornecem dois trechos onde os resultados podem ser estruturados, o primeiro trecho representa a parte onde a redução no índice de confiabilidade alvo tem maior impacto no dimensionamento ótimo e ocasiona que ocorra neste trecho uma redução da área de aço da seção transversal. O segundo trecho representa

a parte onde o efeito do tamanho do defeito passa a ser o fator mais impactante sobre o dimensionamento ótimo levando a ocorrer neste trecho um aumento da área de aço da seção transversal.

Verificou-se também se o comportamento seria mantido, adotando-se outra formulação para o cálculo da pressão de falha. Os valores de área de aço da seção transversal também foram comparados. A formulação escolhida para embasar a comparação foi a B31G uma vez que essa apresentou os resultados mais conservadores.

No tocante ao comportamento em relação ao índice de confiabilidade alvo, o dimensionamento seguiu a tendência verificada anteriormente, uma vez que a medida que o tempo avança há um aumento na área de aço da seção transversal. Quando se adota o índice de confiabilidade variante, observam-se dois comportamentos, inicialmente ocorre a redução da área de aço da seção transversal e em seguida esta começa a aumentar.

Quando se compararam os resultados obtidos entre as duas formulações, verificou-se que, com a aplicação do índice de confiabilidade alvo fixo, a formulação B31G retorna valores mais conservadores, com uma área de aço da seção transversal maior do que a área obtida com a aplicação da DNV RP-F101. Quando se utiliza o índice de confiabilidade alvo variante, a B31G apresenta um comportamento mais disperso do que o apresentado pela outra formulação. No período entre 1 e 30 anos, os valores de área de aço foram superiores para B31G, já para 40 e 50 anos esta formulação apresenta valores de área de aço inferiores aos encontrados com a DNV RP-F101. No entanto, o comportamento coeso dos resultados da DNV RP-F101 garante um maior grau de segurança, sendo confirmado seu melhor desempenho.

A partir das análises é possível evidenciar o comportamento geral no dimensionamento dessas estruturas. Pode-se concluir que, para um índice de confiabilidade fixo a área de seção transversal aumentará com o aumento do tempo, visto que o aumento no tempo acarreta um aumento nas propriedades geométricas do defeito, como profundidade e largura do mesmo.

O efeito que, individualmente, o aumento no tempo gera no dimensionamento do duto, como foi citado na discussão dos resultados, já é conhecido dentro da literatura e foi demonstrado quando se analisou os exemplos, adotando-se um índice de confiabilidade fixo. Também já é conhecido o efeito, individual, da redução do índice de confiabilidade no dimensionamento de estruturas. O que se pode concluir dos resultados é como esse comportamento se estrutura quando as ações estão agindo simultaneamente.

O comportamento observado no índice de confiabilidade variante representa uma conclusão importante, uma vez que foi possível avaliar a ação conjunta do tempo e da redução no índice de confiabilidade. Isso permite que se possa ter uma melhor compreensão sobre como a estrutura vai responder quando influenciada por esses dois agentes.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A análise de confiabilidade está em constante evolução, graças aos avanços tecnológicos que possibilitam um maior detalhamento dos estudos, baseando-se em modelos matemáticos cada vez mais robustos.

Deve-se sempre buscar um aprimoramento nas pesquisas, evoluindo e chegando a resultados mais precisos, o que tem como consequência análises e projetos mais eficientes. Assim, indicam-se nesta seção alguns tópicos que podem ser adotados para a continuidade da pesquisa nesta área, aprimorando algumas considerações que foram apresentadas neste trabalho, ou propondo-se inserir outras propostas de estudo, possibilitando que os resultados obtidos nesta pesquisa sirvam de base de comparação.

Indicam-se as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

- Adoção de testes de aderência na verificação da distribuição de probabilidade que melhor se adéqua aos histogramas da variável Erro do Modelo.
- Aplicação de outras formas de cálculo da pressão de falha, como a utilização da superfície de resposta ou o estudo com o Método dos Elementos Finitos.
- Utilização de formulação não linear na análise temporal para o crescimento do defeito.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014

AHAMMED, M. Probabilistic estimation of remaining life of a pipeline in the presence of active defects. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, Vol. 75, pp. 321-329, 1998.

ANG, A. H-S.; TANG, W. H. **Probability concepts in engineering planning and design**. Volume I: Basic principles. New York: John Wiley & Sons, 1984a.

ANG, A. H-S.; TANG, W. H. **Probability concepts in engineering planning and design**. Volume II: Decision, risk, and reliability. New York: John Wiley & Sons, 1984b.

ALMEIDA, A. F. **Projeto ótimo baseado em confiabilidade de pórticos planos de concreto armado**. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

ALMEIDA, A. B., **Otimização estrutural em componentes mecânicos utilizando algoritmos genéticos**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2014.

ARORA, J. S. **Introduction to optimum design**. 3 ed. Iowa: Elsevier, 2011.

ATAÍDE, C. A. V.; CORRÊA, M. R. S. Estudo comparativo entre método das tensões admissíveis e o método dos estados limites para a alvenaria estrutural. **Cadernos de Engenharia de Estruturas**, São Carlos, vol. 8, n. 34, p. 105-134, 2006.

BAZAN, F. A. V.; BECK, A. T. Stochastic process corrosion growth models for pipeline reliability. **Corrosion Science**, vol. 74, p. 50-58, 2013.

BECK, A. T. **Curso de confiabilidade estrutural**. Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

BECK, A. T. **Confiabilidade e Segurança das Estruturas**. 1 ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2019.

BELEGUNDU, A. D.; CHANDRUPATLA, T. R. **Optimization concepts and application in engineering**. 2 ed. Estados Unidos: Cambridge University Press, 2011.

FREIRE, J.L.F.; VIEIRA, R.D.; DE CASTRO, J.T.P; BENJAMIN, A.C. Burst tests of pipeline with extensive longitudinal metal loss. **Experimental Techniques**, vol. 30, n.6, p. 60-65, Nov/Dec. 2006.

BJØRNOY, O.H.; SIGURDSSON, G.; CRAMER, E.H. Residual strength of corroded pipelines, DNV test results. **Tenth international conference on offshore and polar engineering** (ISOPE 2000), Seattle, USA, May/Jun. 2000.

BISAGGIO, H. C. **Análise preditiva da integridade de dutos corroídos baseada em conceitos de confiabilidade estrutural e inferência bayesiana**. 2014. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Oceânica) – Programa de Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

BRITISH STANDARD. BS-7910. **Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures**, 2013.

CARVAJALINO, J. J. L. **Acoplamento de Estados Limites na Avaliação da Confiabilidade Estrutural de Dutos e Estruturas**. 2010. Tese (Doutorado) - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

CHOUCHAOUI, B.A.; PICK, R.J. Behaviour of Isolated Pits within General Corrosion. **Pipes and Pipeline International**, vol. 39, n. 1, p. 12-21, Jan/Feb, 1994.

CORSO, L. L.; GOMES, H. M.; MEZZOMO, G. P.; MOLTER, A. Otimização baseada em confiabilidade para célula de carga multiaxial utilizando algoritmos genéticos. **Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño em Ingeniería**, vol. 32, n.4, p. 221-229, 2016.

COSTA, R. R. R. **Otimização do comportamento de sistemas estruturais pré-moldados de concreto com ligações viga-pilar deformáveis à flexão**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, Porto Uberlândia, 2015.

CANADIAN STANDARD ASSOCIATION. **Oil and gas pipeline systems**. CSA standard Z662-07. Canada: CSA, 2007.

DNV-RP-F101. **Recommended practice: corroded pipelines**. Høvik, Norway, Det Norske, Veritas, 2004.

HASOFER, A. M.; LIND, N. C. Exact and Invariant Second-Moment Code Format. **Journal of Engineering Mechanics** (ASME), Vol. 100, n. EM1, p. 111-121, 1974.

JOINT COMMITTEE ON STRUCTURAL SAFETY. JCSS: **Probabilistic Model Code – Part I**, 2001, Disponível em: <http://www.jcss.byg.dtu.dk>. Acesso em: 14 jan. 2019.

KESHTEGAR, B.; MIRI, M. Reliability analysis of corroded pipes using conjugate HL–RF algorithm based on average shear stress yield criterion. **Engineering Failure Analysis**, vol. 46, p. 104-117, 2014.

KIEFNER, J.F.; MAXEY, W.A.; EIBER, R.J.; DUFFY, A.R. Failure stress levels of flaws in pressurized cylinders. Progress in flaw growth and fracture toughness testing. **American Society for Testing and Materials**, ASTM STP536, p. 461-681, 1973.

KIEFNER, J.F.; VIETH, P.H. Evaluating pipe: new method corrects criterion for evaluating corroded pipe. **Oil & Gas Journal**, vol. 88, n. 32, p. 56-59, 1990.

KROETZ, H. M. **Meta-Modelagem em confiabilidade estrutural**. 2015. Dissertação (Mestrado), Programa de Engenharia Civil (Estruturas), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

LEIRA, B. J.; NÆSS, A.; NÆSS, O. E. B. Reliability analysis of corroding pipelines by enhanced Monte Carlo simulation. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, vol. 144, p. 11-17, 2016.

LEIS, B.N.; STEPHENS, D.R. An alternative approach to assess the integrity of corroded line pipe – part I: current status; part II: alternative criterion. **Proc. of the 7th International Offshore and Polar Engineering Conference**, ISOPE, 4, p. 624-641, 1997.

LEMOES, G. J.; OLIVEIRA, J. A. F.; SILVA, O. P. Previsão e Monitoramento da Vida Útil de Gasodutos Utilizando Modelos de Corrosão. **Revista de Engenharias da Faculdade Salesiana**, n. 2, p. 22-32, 2016.

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

MELCHERS, R. **Structural reliability: analysis and prediction**. 2 ed. Chichester, UK: Wiley, 1999.

MELCHERS, E. R.; BECK, A. T. **Structural reliability analysis and prediction**. 3 ed. Hoboken, Estados Unidos: Wiley, 2018.

MOK, D. R. B.; PICK, R. J.; GLOVER, A. G. Behavior of Line Pipe with Long External Corrosion. **Materials Performance**, vol. 29, n. 5, p. 75-79, 1990.

MONTAZ, A.; KHOMPATRAPORN, C.; ZABINSKY, Z. B. A numerical evaluation of several stochastic algorithms on selected continuous global optimization test problems. **Journal of Global Optimization**, vol. 31, p. 635-672, 2005.

MORETTIN, P. A.; BUSSAB, W. O. **Estatística básica**. 5 ed. São Paulo: Saraiva, 2003.

NOVAES, C. G.; YAMAKI, R. T.; PAULA, V. F.; NASCIMENTO JÚNIOR, B. B.; BARRETO, J. A.; VALASQUES, G. S.; BEZERRA, M. A. Otimização de métodos analíticos usando metodologia de superfícies de resposta – Parte I: Variáveis de Processo. **Revista Virtual de Química**, vol. 9, p. 1184-1215, 2017.

OSSAI, C. I.; BOSWELL, B.; DAVIES, I. J. Application of Markov modeling and Monte Carlo simulation technique in failure probability estimation — A consideration of corrosion defects of internally corroded pipelines. **Engineering Failure Analysis**, vol. 68, p. 159-171, 2016.

PALIGA, C. M. **Análise probabilística de vigas de concreto armado recuperadas à flexão, através do método de Monte Carlo utilizando um modelo de elementos finitos**. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

PANTOJA, J. C. **Geração automática via otimização topológica e avaliação de segurança de modelos de bielas e tirantes**. 2012. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

PEREIRA, L. A. C. **Implementação de um programa de fluxo de potência ótimo utilizando programação quadrática sequencial**. 1991. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia de Sistemas e Computação), Programa de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1991.

PEREIRA, J. T. **Condições de otimalidade para problemas de controle ótimo com restrições mistas**. 2016. Dissertação (Mestrado em Matemática Aplicada) – Instituto de Matemática, Estatística e Computação Científica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2016.

PINHEIRO, L. M.; MUZARDO, C. D.; SANTOS, S. P. **Fundamentos do concreto e projeto de edifícios**. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007. E-book. Disponível em: http://coral.ufsm.br/decc/ECC1006/Downloads/Apost_EESC_USP_Libanio.pdf. Acesso em: 03 fev. 2019.

RACKWITZ, R.; FIESSLER, B. Structural Reliability Under Combined Random Load Sequences. **Computer and Structures**, vol. 9, p. 489-494, 1978.

RAO, S. S. **Engineering optimization: theory and practice**. 4 ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2009.

SAGRILLO, L. V. S. **Análise de Confiabilidade Estrutural Utilizando os Métodos Analíticos FORM e SORM**. 1994. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) – Programa de Engenharia Civil, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1994.

SIEGEL, S. **Nonparametric statistics for the behavioral sciences**. New York: McGraw-Hill Book Company, 1956.

SILVA, E. S. **Análise da integridade estrutural de dutos com defeitos de corrosão interagentes através de modelagem multifísica**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2016.

SILVA, M. F. **Estratégias de aproximação para otimização estrutural**. 2009. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia e Geociências, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2009.

TEE, K. F.; PESINIS, K. Reliability prediction for corroding natural gas pipelines. **Tunnelling and Underground Space Technology**, vol. 65, p. 91-105, 2017.

TEIXEIRA, A. P.; SOARES, C. G.; NETTO, T. A.; ESTEFEN, S. F. Reliability of pipelines with corrosion defects. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, vol. 85, p. 228-237, 2008.

TELES, M. L.; GOMES, H. M. Comparação de algoritmos genéticos e programação quadrática sequencial para otimização de problemas em engenharia. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**, n. 15, p 29-39, 2010.

TORO, R. J. N. **Pressão de ruptura de dutos contendo defeitos de corrosão**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

TORRES, J. V. S. **Uma Metodologia para Verificação da Segurança e Dimensionamento Ótimo de Dutos com Defeitos Causados por Corrosão**. 2009. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Pernambuco, 2009.

XU, L. Y.; CHENG, Y. F. Reliability and Failure Pressure Prediction of Various Grades of Pipeline Steel in the Presence of Corrosion Defects and Pre-Strain. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, vol. 89, p. 75-84, 2012.

YAN, Z.; ZHANG, S.; ZHOU, W. Model error assessment of burst capacity models for energy pipelines containing surface cracks. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, vol. 120-121, p. 80-92, 2014.

WILSON, R. B. **A simplicial method for convex programming**. 1963. Tese (Doutorado) – Harvard University, Cambridge, 1963.

ZHANG, S.; ZHOU, W. System reliability of corroding pipelines considering stochastic process-based models for defect growth and internal pressure. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, vol. 111-112, p. 120-130, 2013.

ZHOU, W. System Reliability of Corroding Pipeline Vessels Piping. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, vol. 87, p. 587-595, 2010.

ZHOU, W.; HUANG, G. X. Model Error Assessments of Burst Capacity Models for Cored Pipelines. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, vol. 99-100, p. 1-8, 2012.