



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO ACADÊMICO DO AGRESTE
NÚCLEO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

MAYLON DIERFERSON SILVA DE SOBRAL

PROJETO BASEADO EM CONFIABILIDADE DE DUTOS
SUJEITOS A CORROSÃO

Caruaru, 2016.

MAYLON DIERFERSON SILVA DE SOBRAL

PROJETO BASEADO EM CONFIABILIDADE DE DUTOS SUJEITOS A CORROSÃO

Trabalho de Conclusão de Curso a ser apresentado ao Curso de Engenharia Civil do Centro Acadêmico do Agreste - CAA, da Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, em cumprimento às exigências para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Área de concentração: Estruturas.

Orientadora: Profa. Dra. Juliana von Schmalz Torres.

Caruaru, 2016.

Catálogo na fonte:
Bibliotecária – Simone Xavier CRB/4 - 1242

S677p Sobral, Maylon Dieferson Silva de.
Projeto baseado em confiabilidade de dutos sujeitos a corrosão. / Maylon Dieferson
Silva de Sobral. – 2016.
68f. ; 30 cm.

Orientadora: Juliana Von Schmalz Torres
Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Universidade Federal de
Pernambuco, CAA, Engenharia Civil, 2016.
Inclui Referências.

1. Confiabilidade (Engenharia). 2. Dutos e tubulações. 3. Corrosão. I. Torres, Juliana
Von Schmalz (Orientadora). II. Título.

620 CDD (23. ed.)

UFPE (CAA 2016-167)

MAYLON DIEFERSON SILVA DE SOBRAL

PROJETO BASEADO EM CONFIABILIDADE DE DUTOS SUJEITOS A CORROSÃO

Trabalho de Conclusão de Curso a ser apresentado ao Curso de Engenharia Civil do Centro Acadêmico do Agreste - CAA, da Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, em cumprimento às exigências para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Área de concentração: Estruturas.

A banca examinadora composta pelos professores abaixo, considera o candidato MAYLON DIEFERSON SILVA DE SOBRAL APROVADO COM NOTA_____.

Banca examinadora:

Profa. Dra. Juliana von Schmalz Torres _____
Universidade Federal de Pernambuco – UFPE (Orientadora)

Profa. Dra. Giuliana Furtado Franca Bono

Universidade Federal de Pernambuco – UFPE (Examinador 1)

Prof. Dr. Gustavo Bono

Universidade Federal de Pernambuco – UFPE (Examinador 2)

Prof. Dr. Artur Paiva Coutinho _____
Universidade Federal de Pernambuco – UFPE (Coordenador da disciplina)

Caruaru, 2016.

Dedico à minha família que sempre me apoio e incentivou constituindo uma base sólida e segura.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço à Deus por me presentear com o maior presente de todos, o dom da vida. Ao meu santo protetor, São Sebastião, por me ajudar nos momentos de maior desespero e angustia.

Aos meus pais, por todo o apoio, em especial à minha mãe (Tania Maria) por ser o maior exemplo que alguém pode seguir, profissionalmente e pessoalmente. À minha irmã (Debora Maylane) pela paciência muitas vezes requerida e por todos os momentos de descontração que permitiram aliviar o peso desta jornada.

Aos meus familiares que sempre torceram por mim e tão carinhosamente demonstraram seu apoio, compreensão e ajuda nas horas necessárias.

Aos meus amigos, tanto aos de longa data quanto aos conquistados durante o curso, por todos os momentos que partilhamos, tenham sido sorrisos por conquistas ou lágrimas por decepções, pois cada momento deste nos fez crescer e nos tornamos mais fortes.

Aos professores que tive, por todos os ensinamentos repassados, em especial à professora Jocilene Costa cuja compreensão e dedicação foram imprescindíveis para a conclusão do curso.

À minha orientadora Profa. Dra. Juliana Torres pela inteira dedicação e atenção, sempre incentivando e enriquecendo o desenvolvimento do trabalho.

Por fim, agradeço a todos que contribuíram, de forma direta ou indireta para a conclusão do presente trabalho e principalmente durante toda esta minha jornada.

RESUMO

PROJETO BASEADO EM CONFIABILIDADE DE DUTOS SUJEITOS A CORROSÃO

O sistema dutoviário garante uma reduzida probabilidade de avaria juntamente com um reduzido impacto ambiental. O processo de corrosão representa um dos principais mecanismos de falha dos dutos, a corrosão causa a perda de material levando a um enfraquecimento da superfície. Neste projeto utiliza-se o princípio da confiabilidade estrutural para projetar um duto sujeito ao processo de corrosão. Nenhuma estrutura está livre de falhas, sempre tem-se uma probabilidade de falha atrelada as incertezas das cargas, em um projeto usual consideram-se apenas os valores médios das variáveis envolvidas, com a análise de confiabilidade estrutural pode-se levar em consideração as incertezas associadas às variáveis por meio da distribuição de probabilidade, assim o projeto resultante terá um nível de segurança consideravelmente maior, uma vez que a análise foi realizada de forma mais ampla e detalhada. Os índices de segurança são dados por meio do índice de confiabilidade e da probabilidade de falha, obtidos por meio do método analítico de primeira ordem FORM (*First Order Reability Method*). A função de falha é escrita em termos da pressão resistente e da pressão atuante. A pressão resistente também nomeada por pressão de falha é calculada por meio de expressões empíricas desenvolvidas a partir da NG-18 Surface Flaw Equation. Utilizam-se quatro formulações diferentes já consagradas na literatura, B31G, B31G Modificada, BS-7910 e a formulação empírica de Ahammed. Como tais expressões representam uma forma indireta de obtenção da pressão de falha, tem-se um erro atrelado a este valor quando comparado com os valores reais de capacidade do duto. No intuito de solucionar tal problemática introduz-se o conceito da variável Erro do Modelo, obtida pela relação entre os valores de pressão de falha oriundos de experimentos laboratoriais e os valores obtidos pelas expressões empíricas. Tal variável procura aproximar os valores empíricos à condição real, representando um ajuste de dados que leva à uma análise mais realista tendo uma maior proximidade com a condição real de serviço. A variável Erro do Modelo que mais se aproximou do valor ideal (média igual à 1,00) foi a obtida com os valores de pressão de falha via Ahammed no entanto com uma covariância superior à obtida com o uso da BS-7910. Os resultados obtidos pelas formulações da B31G e B31G Modificada tiveram

resultados mais distantes dos ideais. A obtenção do ponto de projeto, ou seja, do valor ótimo para a espessura do duto é obtida pelo processo de Newton-Raphson, estabelecendo um valor alvo para o índice de confiabilidade. A confiabilidade alvo foi estabelecido para quatro valores: 3,1; 3,3; 3,7 e 4,2. Os resultados obtidos com a aplicação da formulação empírica de Ahammed resultaram nos maiores valores para a espessura do duto, tendo sido obtido os menores valores de espessura com a aplicação da B31G.

Palavras-chave: Confiabilidade Estrutural, Dutos, Erro do Modelo, FORM.

ABSTRACT

The pipeline system ensure a reduced probability of damage and one low environmentally impact. The corrosion process represents one of the principal failure mechanisms of pipelines, the corrosion leads to the loss of material resulting in a deterioration of the surface. In this work is used the reliability structural principle to make the project of a pipeline with corrosion defects. There is no structure without failure chances, it always has a failure probability that is caused by the uncertainties of loads. Usually, in one project it just considered the medium value of the involved variables, with the reliability analysis it's possible to considerate the uncertainties associated with the variables through the probability distribution, so the final project will have a higher level of security since the analysis was carried out in one broader and more detailed manner. The security parameters are given by the reliability index and the probability of failure obtained by the First Order Reliability Method – FORM. The failure function is written in terms of the resistant pressure and the requester pressure. The resistant pressure that also is named by failure pressure is calculated using empirical expressions developed from NG-18 Surface Flaw Equation. It used four different formulations already established in the literature, B31G, B31G Modified, BS-7910 and the empirical formulation of Ahammed. Since these expressions represent an indirect way of obtaining the failure pressure, it has an error in his value when compared with the real values of the pipeline resistance. In the intent to solve this problem it's introduced the concept of variable Error of Model, obtained from the failure pressure values derived from the laboratory experiments and the values obtained by the empirical expressions. This variable is used to approach the empirical values to the real situation, representing an adjustment that leads to a more realistic analysis that will be closer to the reality. The Error of Model who more got close to the ideal value (average equal to 1,00) was obtained with the failure pressure values calculated by the Ahammed formulation, however with a higher covariance to that obtained using the BS-7910 expression. The results obtained by the formulations of B31G and B31G Modified had results more distance from the ideal. The obtainment of the project point that is the optimum value for the thickness of the pipeline is calculated by the Newton-Raphson process, this is make defining a target value for the reliability index. There were assumed four values for the reliability index: 3,1; 3,3; 3,7 and 4,2. The results with the application of Ahammed formulation

resulted in the highest values for the pipeline thickness once the B31G expression resulted in the lowest values for the project variable.

Keyword: Reliability Structural, Pipeline, Error of Model, FORM.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação de defeitos de corrosão em dutos.....	23
Figura 2 - Formas de corrosão.	24
Figura 3 - Fluxograma das variáveis que representam as incertezas das cargas.	25
Figura 4 - Exemplificação da discretização em uma superfície.....	29
Figura 5 - Definição da função de falha.....	29
Figura 6 - Representação da superfície de falha no espaço padronizado.....	30
Figura 7 - Método FORM algoritmo HR-LF.	34
Figura 8 - Gráfico com valores reais e teóricos para um caso hipotético de análise da pressão de falha.	39
Figura 9 – Histograma e distribuição de densidade de probabilidade.	40
Figura 10 - Fluxograma do comportamento da variável Erro do Modelo.....	41
Figura 11 - Representação gráfica do método de Newton-Raphson.....	42
Figura 12 - Máquina para realizar usinagem.	48
Figura 13 - Histograma da variável Erro do Modelo e distribuição de probabilidade para o modelo de Ahammed.	53
Figura 14 - Histograma da variável Erro do Modelo e distribuição de probabilidade para o modelo BS-7910.....	54
Figura 15 - Histograma da variável Erro do Modelo e distribuição de probabilidade para o modelo B31G.	55
Figura 16 - Histograma da variável Erro do Modelo e distribuição de probabilidade para o modelo B31G Modificada.	55
Figura 17 - Gráfico da Espessura do Duto em função do índice de confiabilidade alvo para os resultados do Exemplo 1.	59
Figura 18 - Gráfico da Espessura do Duto em função do índice de confiabilidade alvo para os resultados do Exemplo 2.	60
Figura 19 - Gráfico da Espessura do Duto em função do índice de confiabilidade alvo para os resultados do Exemplo 3.	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resumo das expressões empíricas.	45
Tabela 2 - Quantificação de experimentos de laboratório adotados em função do autor.	46
Tabela 3 - Parâmetros experimentais (Kiefner et al., 1973).	46
Tabela 4 - Parâmetros experimentais (Mok et al., 1990).	47
Tabela 5 - Parâmetros experimentais (Chouchaoui e Pick, 1990).	47
Tabela 6 - Parâmetros experimentais (Benjamin et al., 2000).	48
Tabela 7 - Parâmetros experimentais (Bjørnøy et al., 2000).	49
Tabela 8 - Índices de confiabilidade alvos para os estados limites.	51
Tabela 9 - Valores dos Parâmetros utilizados no cálculo da espessura ótima.	51
Tabela 10 - Caracterização da Variável Erro do Modelo.	56
Tabela 11 - Valores da espessura do duto para os dados do Exemplo 1 (Caso 1)...	58
Tabela 12 - Valores da espessura do duto para os dados do Exemplo 1 (Caso 2)...	58
Tabela 13 - Valores da espessura do duto para os dados do Exemplo 2 (Caso 1)...	59
Tabela 14 - Valores da espessura do duto para os dados do Exemplo 2 (Caso 2)...	59
Tabela 15 - Valores da espessura do duto para os dados do Exemplo 3 (Caso 1)...	60
Tabela 16 - Valores da espessura do duto para os dados do Exemplo 3 (Caso 2)...	61

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	15
1.1	JUSTIFICATIVA.....	16
1.2	MOTIVAÇÃO	17
1.3	OBJETIVOS	17
1.3.1	Objetivo Geral.....	17
1.3.2	Objetivos Específicos.....	18
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
3.	REFERENCIAL TEÓRICO	22
3.1	INCIDENTES EM DUTOS	22
3.2	CORROSÃO.....	22
3.3	CONFIABILIDADE ESTRUTURAL	24
3.4	MÉTODO DE CONFIABILIDADE DE PRIMEIRA ORDEM (FORM).....	26
3.5	COMPORTAMENTO DA FUNÇÃO DE FALHA.....	29
3.5.1	Transformação das variáveis.....	31
3.5.2	Pesquisa do ponto de projeto	33
3.5.3	Algoritmo para análise de confiabilidade via FORM	34
3.5.4	Sensibilidade das variáveis.....	35
3.6	MODELOS EMPÍRICOS PARA A DETERMINAÇÃO DA PRESSÃO DE FALHA.....	36
3.6.1	Estudo no Tempo	38
3.7	VARIÁVEL ERRO DO MODELO	38
3.7.1	Formulação Matemática da Variável Erro do Modelo	39
3.8	MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON	41
4.	METODOLOGIA DO TRABALHO.....	44
4.1	FORMULAÇÕES EMPÍRICAS ADOTADAS.....	44
4.2	BASE DE DADOS.....	45
4.2.1	Kiefner et al. (1973)	46
4.2.2	Mok et al (1990).....	46
4.2.3	Chouchaoui e Pick (1994).....	47
4.2.4	Benjamin et al. (2000).....	47
4.2.5	Bjørnøy et al. (2000)	48
4.3	CARACTERIZAÇÃO DA VARIÁVEL ERRO DO MODELO	49

4.4	ALGORITMO PARA OBTENÇÃO DO PONTO DE PROJETO	50
4.5	DETERMINAÇÃO DA ESPESSURA ÓTIMA.....	51
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	53
5.1	CÁLCULO DA VARIÁVEL ERRO DO MODELO.....	53
5.2	COMPARAÇÃO COM RESULTADOS DA LITERATURA	57
5.3	CÁLCULO DA ESPESSURA ÓTIMA	57
5.3.1	Resultados Utilizando o Exemplo 1	57
5.3.2	Resultados Utilizando o Exemplo 2	59
5.3.3	Resultados Utilizando o Exemplo 3	60
6.	CONCLUSÕES.....	63
	REFERÊNCIAS	65

1. INTRODUÇÃO

Os dutos são tubulações especialmente desenvolvidas e construídas de acordo com normas internacionais de segurança, para transportar petróleo e seus derivados, álcool, gás, produtos químicos e outros produtos diversos, por distâncias especialmente longas, por arrasto ou por pressão, sendo denominados como oleodutos, gasodutos, minerodutos. Permitem que grandes quantidades de produtos sejam deslocadas de maneira segura, diminuindo o tráfego de cargas perigosas por caminhões, trens ou por navios e, conseqüentemente, diminuindo os riscos de acidentes ambientais.

O sistema de transporte dutoviário é de extrema importância dentro dos meios de transporte, uma vez que representa uma das formas de transporte mais segura, tendo uma reduzida probabilidade de avaria ou perda da carga transportada. É um sistema de consumo energético extremamente econômico e caracterizado como não poluente, sendo assim, é um dos meios mais indicados no transporte de produtos líquidos e gasosos ou sólidos em suspensão.

As presenças de anomalias (CARVAJALINO, 2010) podem ocasionar uma falha a pressões de operação abaixo das projetadas. Portanto, a avaliação da probabilidade de falha para cada tipo de dano é requerida para quantificar o risco deste tipo de estrutura adequadamente.

O mecanismo de falha por corrosão se apresenta, na maioria dos casos, como o fator limitante na operação continuada de um duto. Esse mecanismo reduz a resistência mecânica do duto, aumentando a necessidade de reparos com a conseqüente diminuição da capacidade produtiva. Dados da PETROBRAS mostram que o número de intervenções para manutenção emergencial de dutos, devido a acidentes ou reparos, aumenta exponencialmente a partir de 20 anos de uso (BASILIO, 2009).

Na atual situação onde o uso dos metais e suas ligas é indispensável, o fenômeno da corrosão deve ter grande foco nos estudos e análises para o dimensionamento de estruturas, uma vez que estruturas como minerodutos, oleodutos, gasodutos, tanques de armazenamento de combustíveis, frequentemente sofrem com problemas deste tipo.

Mesmo sendo executado um projeto de alto nível de qualidade, nenhuma estrutura possui zero por cento de probabilidade de falha, uma vez que sempre há uma incerteza nas cargas, nas propriedades mecânicas e geométricas. Logo, se

deve buscar avaliar o nível de segurança da estrutura. Para tal avaliação, utiliza-se os métodos de análise de confiabilidade estrutural (SAGRILO, 1994). Estes métodos 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 análise de confiabilidade estrutural em geral, por envolver um grande número de variáveis aleatórias ou exigir uma grande quantidade de simulações, se depara com a questão do custo computacional. Duas técnicas utilizadas para a avaliação são o método de Monte Carlo e os métodos analíticos FORM/SORM (BARBOSA, 2004). A função de falha neste projeto será calculada em função da pressão solicitante (ou pressão atuante) e da pressão resistente. Esta última será calculada por meio de expressões empíricas.

O uso de expressões empíricas na predição da pressão resistente (ou pressão de falha) carrega a vantagem de ser uma análise rápida, tendo um custo computacional extremamente eficiente, logo quando se analisa a relação entre tempo de processamento e precisão nos resultados, as formulações empíricas representam um bom método de obtenção da pressão de falha.

O uso de formulações empíricas é relativamente difundido entre os pesquisadores que trabalham com confiabilidade estrutural, garantindo-se assim uma base de comparação eficiente.

1.1 Justificativa

Atualmente o uso de ligas metálicas tem se intensificado cada vez mais. Por ser um material que permite diversas formatações, somando-se ao fato de que possui uma elevada resistência e é um material presente ao dia a dia. Devido a sua utilização, os dutos de aço são geralmente encontrados enterrados no solo ou submersos o que representa uma grande dificuldade em sua substituição e requer um projeto de manutenção detalhado, sendo assim todas as questões ligadas aos dutos pós-instalação representam um considerável investimento financeiro.

A falha em um duto de rede de transporte representa um grande inconveniente, uma vez que, pode levar a perda do material e uma possível contaminação do solo ou do corpo d'água, como no caso de um rompimento de um duto que transporta produtos químicos.

Há um impacto significativo que deve ser evitado. Para isso deve-se buscar conhecer bem o comportamento do duto, assim pode-se prever o tempo de serviço e a necessidade de manutenção.

A análise do quanto uma estrutura é confiável deve ser decisiva na escolha do projeto uma vez que garantir a estabilidade da estrutura é uma questão de segurança e que pode representar grande impacto econômico, tanto positivamente quanto negativamente. Uma estrutura mal dimensionada pode vir a apresentar falhas que não eram esperadas em momentos inadequados causando assim grandes transtornos.

No entanto, um projeto que se adeque as questões de confiabilidade representa uma garantia de um funcionamento adequado e pode representar uma economia com reformas inesperadas.

1.2 Motivação

O interesse no assunto surgiu durante as atividades do projeto “Estudo de casos para verificar a segurança em dutos com defeitos de corrosão”, orientado pela professora doutora Juliana V. S. Torres no período de março à julho de 2015. No projeto foi analisado a probabilidade de falha e o índice de confiabilidade para um duto sujeito a corrosão através do método analítico FORM, obtendo-se a pressão de falha por métodos empíricos. Dando continuidade a esse projeto decidiu-se focar nos estudos e na aplicação da variável Erro do Modelo, etapa que não foi possível colocar em prática no período do citado projeto.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo geral projetar uma espessura ótima de duto de aço com base na confiabilidade, aplicando o método de Newton-Raphson juntamente com o método analítico FORM (*First Order Reliability Method*), na busca de um índice de confiabilidade alvo. A pressão de falha interna do duto será obtida por meio de expressões empíricas.

1.3.2 Objetivos Específicos

- ✓ Calcular a pressão de falha para os dutos sujeitos a corrosão com o auxílio de expressões empíricas;
- ✓ Confrontar os ensaios em dutos com defeitos reais e artificiais obtidos na literatura com os resultados obtidos experimentalmente;
- ✓
- ✓ Determinação da variável Erro do Modelo com a análise do impacto da mesma sobre a análise de confiabilidade;
- ✓ Avaliar o índice de confiabilidade e a probabilidade de falha para o duto que se deseja projetar;
- ✓ Determinar a espessura ideal do duto prevendo um processo de corrosão futuro, baseada num índice de confiabilidade alvo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Em 1994, Sagrilo apresentou o desenvolvimento de uma ferramenta computacional que objetiva a análise de confiabilidade estrutural em grandes estruturas, por meio dos métodos analíticos FORM (First Order Reliability Method) e SORM (Second Order Reliability Method), utilizando uma técnica adaptativa de superfície de resposta para o cálculo dos gradientes da função de falha.

Em 2004, Barbosa utilizou uma rede neural treinada para substituir a solução do problema estrutural necessária a cada simulação de Monte Carlo, com o objetivo de reduzir o custo computacional na análise de confiabilidade.

No ano de 2006, Rosas fez uso de modelos planos em duas dimensões, aximétricos e modelos em três dimensões para estudar o comportamento e avaliar o reparo de dutos com perda de espessura, utilizando camadas metálicas coladas ao duto com adesivo epóxi. Para isso faz uso de métodos analíticos, experimentais e numéricos com utilização da técnica de elementos finitos uma vez que esta permite considerar a não linearidade do material.

Em 2007, Bueno avaliou o nível de segurança dos métodos semi-empíricos usuais para a condição onde os defeitos em dutos se posicionem coincidentemente com a solda longitudinal, para isso utiliza tubos fabricados na década de 60 retirados de operação após um tempo de uso prolongado, submetendo a testes de ruptura pela ação única da pressão interna.

Já em 2009, Torres traz uma análise de dutos com corrosão, aplicando o sistema de acoplamento de programas computacionais para a análise de confiabilidade. Analisando dutos com defeitos isolados e com múltiplos defeitos, demonstra uma metodologia para verificação da segurança e dimensionamento baseado em confiabilidade de tais estruturas. Define-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). Utilizando o método de superfície resposta, utiliza aproximação do tipo ajuste de dados via Krigagem. Apresenta o dimensionamento baseado em confiabilidade do duto buscando garantir a conservação do nível de segurança por um determinado período de tempo. Insere o método semi-probabilístico para verificação da segurança e realiza a comparação dos resultados obtidos na predição de falha obtidos por soluções empíricas, como a BS-7910 (1999), e por soluções numéricas via MEF e via técnicas de aproximação por Krigagem.

Ainda em 2009, Basílio apresentou a importância do tratamento das incertezas associadas aos dados necessários na avaliação da integridade de dutos de aço com defeitos de corrosão desenvolvendo uma metodologia simplificada para o cálculo da probabilidade de falha em dutos de aço contendo defeitos de corrosão sujeitos a pressão interna. A metodologia desenvolvida consiste no cálculo da expectância e da variância da pressão de falha calculada pela expressão empírica da Equação NG18 (Surface Flaw Equation), nas condições imediata e futura.

Em 2009 Zhou, utilizando um modelo hipotético apresentou uma metodologia para avaliar a confiabilidade de um duto em um sistema dependente do tempo contendo múltiplos defeitos de corrosão sendo submetido à pressão interna estocástica. Tal pressão interna é caracterizada como um processo simples estocástico discreto, que consiste em uma sequência de independentes e idênticas variáveis aleatoriamente distribuídas, cada uma agindo por um período de um ano. O impacto da variabilidade espacial da carga de pressão e a resistência dos dutos associada a diferentes defeitos na confiabilidade do sistema foram investigados.

No ano de 2010, Carvajalino desenvolveu uma metodologia para avaliação de confiabilidade estrutural, a qual é capaz de acoplar diferentes eventos que podem ocorrer durante a vida útil de dutos e estruturas. Alguns exemplos para determinar a probabilidade de falha segundo o método FORM foram apresentados.

Em 2011, Xu e Cheng analisaram a confiabilidade de dutos com defeitos de corrosão através de um modelo de elementos finitos. A pressão de falha para efeito de comparação foi obtida por três modelos empíricos (B31G, B31G Modificada e DNV) observando que a pressão de falha é reduzida com o aumento da profundidade do defeito e com a diminuição da classe do aço. Concluiu-se que a tensão aplicada no sentido longitudinal simulando a pressão do solo reduz a pressão de falha.

No ano seguinte, 2012, Santos realizou uma análise estatística da variável aleatória Erro do Modelo para a previsão da capacidade resistente de elementos lineares de concreto armado, utilizando uma formulação matemática na obtenção da citada variável que pode ser aplicada em qualquer estrutura, como no caso dos dutos. Obtendo-se a citada variável pela razão entre os valores reais, resultado de experimentos, e os valores obtidos segundo requisitos das normas de estruturas de concreto. No estudo são avaliados vigas e pilares.

Em 2012, Zhou e Huang caracterizaram a variável erro do modelo utilizando oito modelos difundidos de obtenção da pressão de ruptura para dutos submetidos

ao efeito da corrosão. Realizaram ainda a caracterização probabilística incluindo valores médios, coeficientes de variação e distribuição probabilísticas que melhor se enquadravam.

Em 2014, Hu et al. propõe um modelo para lidar com fendas ocasionadas por corrosão local em oleodutos. O modelo probabilístico é formulado e numericamente calculado usando simulação de Monte Carlo. Utilizando um exemplo para validar o modelo, conclui-se que a espessura do duto, a pressão de operação e a densidade da corrente elétrica à corrosão são os três parâmetros fundamentais para determinar o tempo de vida do oleoduto.

Ainda em 2014, Toro determina a variável erro do modelo para correção dos modelos de determinação da pressão de falha, definida como a resistência da estrutura na análise de confiabilidade. Analisa a precisão dos modelos empíricos usuais de avaliação da pressão de ruptura de dutos submetidos à corrosão. Com os resultados obtidos para a variável erro do modelo realiza uma análise de confiabilidade, estimando o índice de confiabilidade e a probabilidade de falha do duto com defeitos de corrosão, utilizando o método de primeira ordem FORM, com isso avaliou-se a evolução da probabilidade de falha com o aumento da profundidade do defeito, assim como se identificou as variáveis aleatórias mais importantes na falha da estrutura.

Já em 2015, Kroetz desenvolveu um trabalho que busca a compilação, assimilação, programação em computador e comparação de técnicas de meta-modelagem no contexto da confiabilidade estrutural, utilizando representações construídas a partir de redes neurais artificiais, expansões em polinômios de caos e através de krigagem. O estudo utiliza como exemplos de validação estruturas treliçadas.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Incidentes em Dutos

Segundo EIBER (2003) os incidentes nos dutos de transporte de óleo e gás podem ser divididos assim:

- Anomalias, que são danos que ocorrem por corrosão e/ou pela interferência de terceiros;
- Operação incorreta, que são falhas relacionadas com a operação das linhas;
- Operação inadequada do equipamento de controle da pressão;
- Outros: danos em flanges, acessórios.

Os danos devidos a anomalias são os que têm a maior participação nas falhas dos dutos. As anomalias podem ser subclassificadas como:

- Corrosão, que é a perda da espessura da parede do duto;
- Dano mecânico, que é causado geralmente por equipamentos de remoção e movimentação de solo, tais como escavadores e equipamentos agrícolas;
- Trincas nas soldas, que podem acontecer devido ao processo de solda na montagem do duto ou se originar em operação, a partir de defeitos de solda.
- Dobramentos, que podem ocorrer durante a montagem da linha;
- Danos por força externa, que podem ocorrer a partir de deslizamentos e/ou movimentos de solo, erosão, entre outras causas.

Já a ASME (American Society of Mechanical Engineers) em 2004 através da norma B 31.8, que trata de sistemas de tubulação de distribuição e transmissão de gás, fez uma classificação de nove categorias de incidentes em dutos, sendo elas: corrosão externa, corrosão interna, corrosão sob tensão, defeitos de fabricação do duto, defeitos por montagem do duto, danos em componentes do duto (flanges), interferência de terceiros, operações incorretas e danos devido ao ambiente (deslizamento de solo).

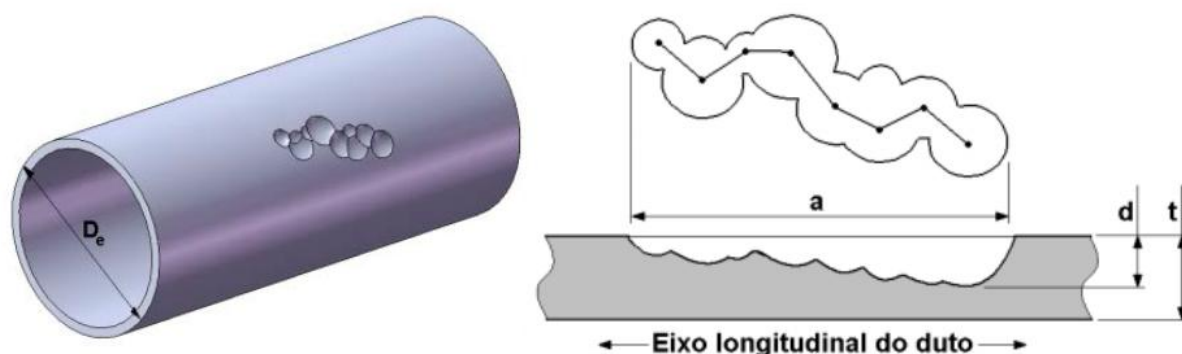
3.2 Corrosão

A corrosão é um dos principais mecanismos de falha em dutos enterrados, por exemplo, tornando necessária a reparação ou até a substituição de trechos de dutos (TORO, 2014). Tal anomalia se deve a um processo químico chamado oxi-

redução, o que significa que ocorre uma reação de oxidação e de redução nos metais. Neste processo, o metal cede elétrons que são recebidos por qualquer substância (oxidante) que se encontre no meio corrosivo.

A reação química que causa a corrosão produz deterioração no material espontaneamente, mudando suas propriedades e levando a perda da resistência e durabilidade. Pode levar a um estado indesejável da estrutura, causando perdas econômicas, ambientais e humanas. O efeito da corrosão pode ser vista na Figura 1.

Figura 1 - Representação de defeitos de corrosão em dutos.



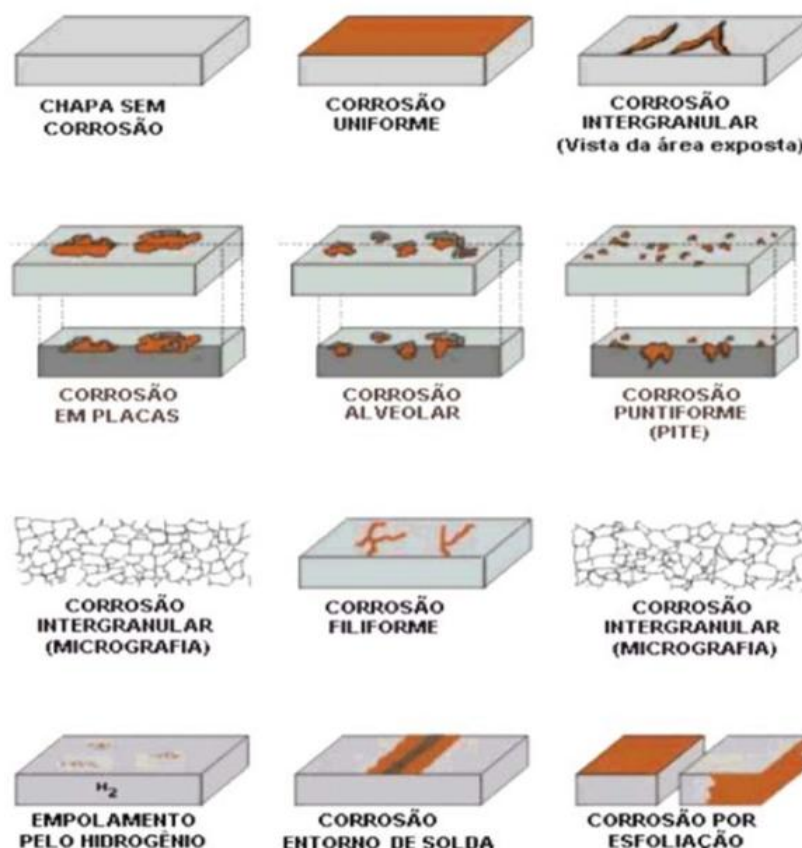
FONTE: TORO (2014)

A corrosão (TORO, 2014) pode se apresentar em variadas formas e pode ser classificada através de sua aparência no metal corroído. As principais características, para a classificação (Figura 2), 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 sollicitação 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 2 - Formas de corrosão.



FONTE: TORO (2014)

3.3 Confiabilidade Estrutural

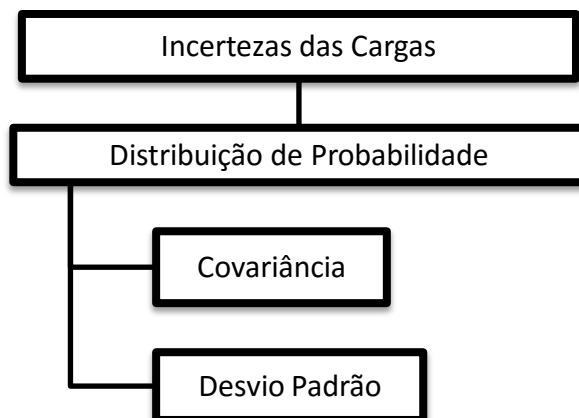
A descrição do comportamento mecânico de uma estrutura (KROETZ, 2015) é feita através da determinação de seus campos de tensões, deformações e deslocamentos. Muito se ganhou nos últimos anos com o advento dos computadores, que permitiram a aplicação em larga escala de técnicas numéricas. Tornou-se possível a utilização automática de métodos numéricos que trabalham com soluções aproximadas, como o método dos elementos finitos. A crescente capacidade de processamento dos computadores viabiliza a aplicação de soluções

cada vez mais refinadas para problemas cada vez mais complexos, associados, porém a um maior custo computacional. A estes problemas, pode-se associar ferramentas de análise de confiabilidade, sendo possível determinar computacionalmente a segurança de uma estrutura.

A confiabilidade estrutural é uma ferramenta que permite ao engenheiro considerar as incertezas inerentes às variáveis de projeto, através das correspondentes distribuições de probabilidade, permitindo obter, entre outros resultados, a probabilidade de falha da estrutura, o índice de confiabilidade e a sensibilidade do projeto em relação a estas variáveis.

Diferentemente de uma análise ou projeção usual, onde consideram-se apenas os valores médios das variáveis, a confiabilidade estrutural leva-se em consideração os valores de desvio padrão e covariância, sendo assim, consideram-se as incertezas inerentes as cargas. O fluxograma da Figura 3 demonstra esse comportamento, onde as incertezas associadas às variáveis são consideradas por meio da distribuição de probabilidade das variáveis que é representada pela covariância e desvio padrão da variável em questão.

Figura 3 - Fluxograma das variáveis que representam as incertezas das cargas.



FONTE: AUTOR (2016)

Esta informação pode ser de fundamental importância na tomada de decisões que envolvam a segurança da estrutura. Atualmente, com o auxílio da confiabilidade estrutural é possível calibrar os fatores de segurança de uma maneira racional, a partir da definição de um nível alvo considerado aceitável para a probabilidade de falha estrutural. Neste sentido, a probabilidade de falha tem sido muito usada na revisão de normas antigas e na elaboração de códigos de projeto para novas concepções estruturais e na escolha de alternativas de projeto (SAGRILO, 1994).

Em um sistema de engenharia quando há incertezas nos parâmetros de entrada, a mesma se propaga para a resposta. Portanto, a resposta de sistemas de engenharia também é afetada pelas incertezas, e não há como garantir, de forma determinística, que a resposta do sistema será sempre a resposta desejada. Sendo assim, uma consequência importante das incertezas é que existirá uma possibilidade do sistema não responder conforme o esperado. Quando esta possibilidade é medida em termos de probabilidade, fala-se em uma probabilidade de falha. Multiplicando-se probabilidade de falha por custos de falha obtém-se o risco, que é uma das principais consequências das incertezas. Para viabilizar a operação de sistemas de engenharia, o risco deve ser controlado (BECK, 2012).

Na concepção de projetos, deve-se buscar aliar custo com segurança. Não é viável estabelecer um projeto com alto fator de segurança, mas, que seja economicamente inviável, em contrapartida uma formatação com baixo custo, mas que não tenha segurança tem que ser descartada. Assim o intuito deve ser a concepção de algo economicamente interessante e que atenda todos os critérios de segurança. A análise de confiabilidade deve nortear essa projeção uma vez que através dela pode-se obter a formatação que garante um bom desempenho com economia de material.

Levando em consideração que um dos resultados do desenvolvimento de novos materiais que podem resultar em novas concepções estruturais é o aumento na quantidade de alternativas possíveis na formatação de um projeto, cada vez mais o engenheiro deve decidir qual a melhor configuração. A confiabilidade estrutural juntamente com a análise de custos, fornece as informações necessárias para a avaliação dos riscos associados aos projetos, dando assim um embasamento para as análises e tomadas de decisões.

3.4 Método de Confiabilidade de Primeira Ordem (FORM)

A análise de confiabilidade da estrutura torna viável a avaliação da segurança considerando-se as incertezas das variáveis de projeto, pois considera que nenhuma estrutura está livre de falha. Consideram-se as incertezas através das distribuições de probabilidade, buscando-se avaliar a probabilidade de que a estrutura não falhe em atender aos objetivos para os quais ela foi projetada, durante a sua vida útil. A confiabilidade de uma estrutura, C , é definida como o complemento da probabilidade de falha ($prob_f$), ou seja,

$$C = 1 - \text{prob}_f \quad (1)$$

Como geralmente prob_f é pequena para estruturas, na ordem de 10^{-3} a 10^{-6} dependendo do estado limite, é viável utilizar tal variável para medir o nível de segurança. Logo quanto menor for prob_f mais segura é a estrutura.

Neste trabalho, o método analítico empregado para avaliar a probabilidade de falha foi o FORM. A análise de confiabilidade estrutural pode ser vista como um problema de suprimento versus demanda, isto é, um problema de confiabilidade pode ser definido como avaliação da probabilidade de que a demanda (carga máxima na estrutura) exceda a capacidade de suprimento (resistência da estrutura), durante a vida útil da mesma. Assim a função de falha $G(U)$, com $U(R,S)$, pode ser vista como:

$$G(U) = Z = R - S \quad (2)$$

Onde,

R é a resistência do elemento estrutural. Para o caso dos dutos é dada pela pressão de falha (P_f);

S é a solicitação (carga atuante na estrutura), sendo definida como a pressão atuante no interior do duto.

A resistência do elemento estrutural (R) pode ser definida por três formulações:

- Equações empíricas;

A utilização de fórmulas empíricas, método empregado neste trabalho, é bastante difundida na literatura e de fácil utilização visto que sua estruturação matemática, quando comparada com os outros métodos, é mais simplória. O cálculo da pressão de falha por meio de equações empíricas representa um baixo custo computacional e pode ser realizado com praticidade não requerendo um elevado tempo computacional para o processamento. Sua aplicação advém do fato de

representar um custo benefício bastante considerável, sendo uma análise rápida, quando comparada com as outras duas formas de obtenção da pressão de falha.

- Superfície resposta;

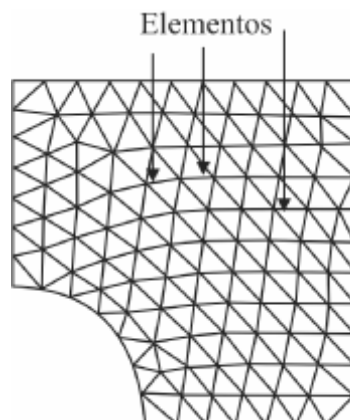
A utilização de uma superfície resposta pode ser visto como um método intermediário de avaliação da pressão de falha. Demonstra avanços, em comparação as respostas obtidas por meio de equações empíricas, quando comparada a questão da precisão, no entanto tem como fator negativo um custo computacional mais elevado. Quando comparado com a obtenção da pressão de falha diretamente por análise de elementos finitos, a superfície de falha apresenta resultados com um custo computacional consideravelmente menor tendo um grau de precisão inferior. Assim a superfície resposta, corresponde a uma metodologia onde se faz presente um nível de precisão aceitável e um custo computacional tolerável.

- Análise por elementos finitos;

Em relações as três formulações de cálculo, a pressão de falha via elementos finitos representa o resultado mais próximo ao valor real. Pesa sobre essa metodologia o fato de que certas configurações podem acarretar custos computacionais inviáveis ou um tempo de processamento que impossibilitaria a análise devido ao grande detalhamento no estudo da estrutura.

O Método dos Elementos Finitos (MEF) é uma análise matemática baseada na discretização de um meio contínuo em pequenos elementos, mantendo as mesmas propriedades do meio original. O princípio da discretização pode ser visto na Figura 4, onde uma superfície é dividida em regiões menores formando-se uma espécie de malha.

Figura 4 - Exemplificação da discretização em uma superfície.

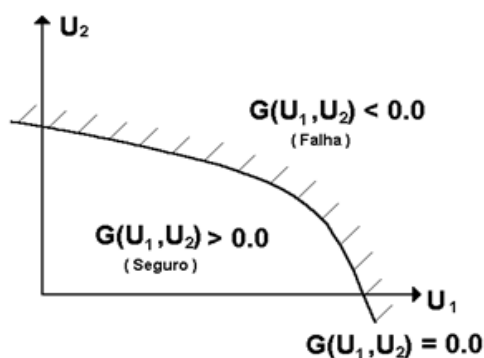


FONTE: AKIYOSHI et al. (2002)

3.5 Comportamento da Função de Falha

A partir da expressão (2), pode-se verificar que quando a resistência for superior a solicitação, a função de falha adota valores positivos e a estrutura pode ser considerada segura, no caso inverso a função de falha será negativa e a estrutura falha. Para o caso de resistência igual a solicitação recai-se na superfície de falha onde a função de falha é nula. Essa relação pode ser verificada na Figura 5.

Figura 5 - Definição da função de falha.



FONTE: SAGRILO (1994)

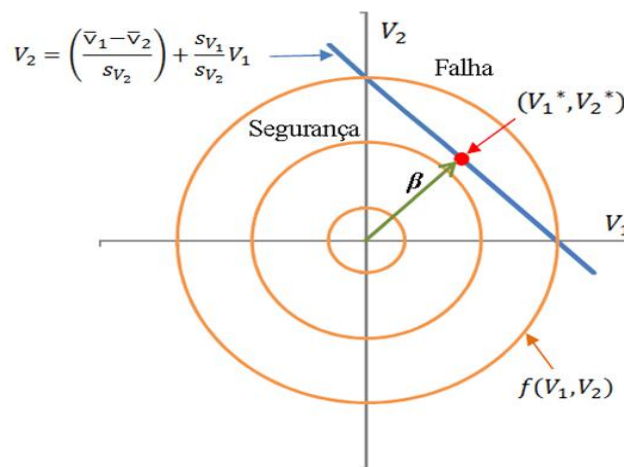
A principal ideia do método FORM (SAGRILO, 1994) é que no espaço reduzido das variáveis normais padrões estaticamente independentes e para uma função de falha linear, a confiabilidade pode ser facilmente obtida através da distância da função até a origem. Neste método, as variáveis aleatórias, U , cujas distribuições são quaisquer e podem ser dependentes entre si ou não, são

transformados em variáveis V normais padrões estaticamente independentes (média = 0 e desvio padrão = 1).

A função de falha $G(U)$ é escrita em função das variáveis V como $g(V)$. Depois disto a superfície de falha $g(V) = 0$ é aproximada por uma superfície linear no ponto com a menor distância até a origem, identificado como V^* , sendo este o ponto de projeto no espaço das variáveis reduzidas.

Na Figura 6 é esquematizada a superfície de falha representada pela reta V_2 (para o caso de duas variáveis aleatórias) no espaço padronizado.

Figura 6 - Representação da superfície de falha no espaço padronizado.



FONTE: CARVAJALINO (2010)

A partir disto a probabilidade de falha pode ser calculada usando a distribuição cumulativa normal padrão. Assim:

$$\text{prob}_f = \Phi(-\beta) \quad (3)$$

Onde,

Φ é a função cumulativa da distribuição normal padrão;

$\beta = |V^*|$ é a distância do ponto V^* até a origem, esta distância é obtida via FORM.

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

3.5.1 Transformação das variáveis

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, levando os pontos do espaço de projeto U para o espaço normal padrão V (TORO, 2014).

A metodologia mais difundida em confiabilidade estrutural para a transformação das variáveis aleatórias U em variáveis normais padrão e estaticamente independentes V, é baseada na transformação das variáveis normais correlacionadas em variáveis normais estatisticamente independentes (SAGRILO, 1994).

Para a configuração onde U é constituído somente por variáveis normais e estas forem correlacionadas entre si (ou não) um conjunto de variáveis normais padrão estaticamente independentes pode ser obtido seguindo a expressão:

$$V = \Gamma \sigma^{-1}(U - m) \quad (4)$$

Onde;

m é o vetor com as médias das variáveis U;

σ é uma matriz diagonal contendo os desvios padrões das variáveis U;

Γ é igual à L^{-1} , têm-se que L é uma matriz triangular inferior obtida da decomposição de Choleski da matriz dos coeficientes de correlação de U, sendo expressa da seguinte forma:

$$L = \begin{bmatrix} L_{11} & 0 & 0 & 0 \\ L_{12} & L_{22} & 0 & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ L_{1n} & L_{2n} & \cdot & L_{nn} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Tendo que n representa o número de variáveis aleatórias envolvidas na transformação. Os termos da matriz podem ser obtido seguindo-se a formatação a seguir:

$$\begin{aligned}
L_{11} &= 1,0 \\
L_{i1} &= \rho_{i1} \quad i = 1, \dots, n \\
L_{ik} &= \frac{1}{L_{kk}} (r_{ik} - \sum_{j=1}^{k-1} L_{ij} L_{kj}) \quad 1 < k < i \\
L_{ii} &= \sqrt{1 - \sum_{j=1}^{i-1} L_{ij}^2} \quad i > 1
\end{aligned} \tag{6}$$

Tendo ρ_{ij} como o coeficiente de correlação entre as variáveis U_i e U_j .

Para os casos onde as variáveis não são normais é necessário realizar uma transformação em normal equivalente para poder operar-se com a expressão (4).

Adotando-se duas variáveis U_i e U_j com distribuições de probabilidade quaisquer e dependentes entre si, cuja dependência é definida pelo coeficiente de correlação ρ_{ij} , pode-se definir o coeficiente de correlação equivalente entre as duas distribuições normais equivalentes às variáveis citadas:

$$\rho_{ij}^E = F \rho_{ij} \tag{7}$$

Sabe-se que F é um valor que depende somente de ρ_{ij} e dos coeficientes de variação das variáveis U_i e U_j . Para um grande número de distribuições de probabilidade pode-se encontrar na literatura (KIUREGHIAN and LIU, 1986) expressões analíticas para o fator F .

Tendo definidas as normais equivalentes das variáveis U e as suas correlações equivalentes pode-se utilizar a expressão (4) para a obtenção das variáveis normais padrões estaticamente independentes V .

Para o caso onde a função de densidade de probabilidades conjunta $f_u(U)$ é conhecida, a transformação de Rosenblatt é a mais indicada na transformação das variáveis U em V (SAGRILO, 1994). Tal transformação se dá da seguinte forma:

$$\begin{aligned}
V_1 &= \phi^{-1}[F_{U_1}(U_1)] \\
V_2 &= \phi^{-1}[F_{U_2}(U_2/U_1)] \\
&\vdots \\
V_n &= \phi^{-1}\left[F_{U_n}\left(\frac{U_n}{U_1 U_2 \dots U_{n-1}}\right)\right]
\end{aligned} \tag{8}$$

Onde;

$F_{U_i} \left(\frac{U_i}{U_1 U_2 \dots U_{i-1}} \right)$ é a função cumulativa de probabilidade da variável U_i condicionada a valores conhecidos das variáveis $U_1, U_2, U_3, \dots, U_{i-1}$;
 ϕ^{-1} é o inverso da função cumulativa normal padrão.

3.5.2 Pesquisa do ponto de projeto

Um dos passos fundamentais para o cálculo da probabilidade de falha pelo método FORM é o de encontrar o ponto V^* sobre a superfície de falha mais próxima 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:

$$\begin{aligned} &\text{Minimize } |V| \\ &\text{Sujeito a } g(V) = 0.0 \end{aligned} \tag{9}$$

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:

$$V^{k+1} = \frac{1}{|\nabla g(V^k)|^2} [\nabla g(V^k)^T V - g(V^k)] \nabla g(V^k)^T \tag{10}$$

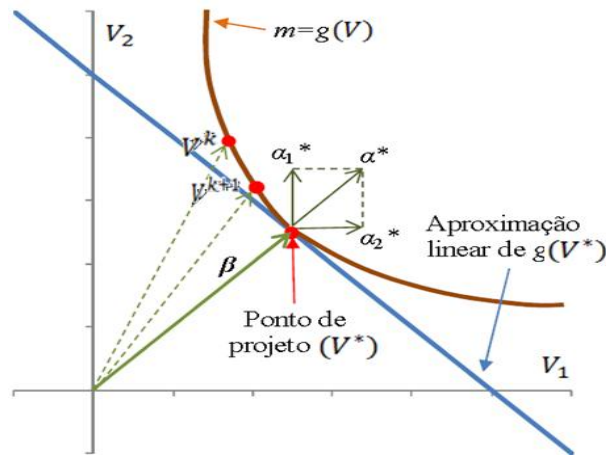
Onde,

$\nabla g(V^k)$ é o gradiente da função de falha no espaço reduzido, avaliado no ponto V^k ;
 $g(V^k)$ é o valor da função de falha, também avaliado no ponto V^k .

O algoritmo converge quando $\frac{|V^{k+1}| - |V^k|}{|V^{k+1}|} \leq \text{Tol}$ (adotado uma tolerância limite). Sendo V^{k+1} o ponto avaliado e V^k o ponto anteriormente avaliado.

Alcançada a convergência, o procedimento é então, verificar se a função limite no ponto de projeto é, aproximadamente, zero (CARVAJALINO, 2010). O algoritmo HR-LF do método FORM pode ser esquematizado como na Figura 7.

Figura 7 - Método FORM algoritmo HR-LF.



FONTE: CARVAJALINO (2010)

3.5.3 Algoritmo para análise de confiabilidade via FORM

A análise de confiabilidade utilizando o método de primeira ordem (FORM) pode ser resumida nas seguintes etapas:

- 1º - Avaliação das correlações equivalentes entre as variáveis, por meio da expressão (7) e construção da matriz Γ , utilizando as expressões (5) e (6);
- 2º - Determinação do ponto de partida U^k no espaço original (normalmente as médias);
- 3º - Avaliação das médias e desvios padrões das normais equivalentes no ponto de partida, para isso utilizam-se as seguintes expressões:

$$\sigma_{U_i}^N = \frac{\phi\{\phi^{-1}[F_{U_i}(U_i^*)]\}}{f_{U_i}(U_i^*)} \quad (11)$$

$$\mu_{U_i}^N = U_i^* - \sigma_{U_i}^N \phi^{-1}[F_{U_i}(U_i^*)]$$

Montando-se em seguida as matrizes σ e m , com os respectivos desvios padrões e médias das normais equivalentes;

4º - Avaliação da função de falha $G(U)$, o Jacobiano e o gradiente de $G(U)$ no espaço reduzido através das expressões:

$$\begin{aligned} g(V^k) &= G(U^k) \\ J &= \Gamma \sigma^{-1} \\ \nabla g(V^k) &= (J^{-1})^T \nabla G(U^k) \end{aligned} \quad (12)$$

5º - Transformação do ponto de partida para o espaço reduzido:

$$V^k = J(U^k - m) \quad (13)$$

6º - Avaliação do novo ponto V^{k+1} através do algoritmo HL-RF, para o calculo desse ponto utiliza-se a expressão (10).

7º - Avaliação do índice de confiabilidade:

$$\beta = |V^{k+1}| \quad (14)$$

8º - Avaliação do novo ponto U^{k+1} no espaço original através da seguinte expressão:

$$U^{k+1} = U^k + (J^{-1})^T (V^{k+1} - V^k) \quad (15)$$

9º - Toma-se U^{k+1} como o novo ponto de partida e segue o processo iterativo retornando ao 3º passo, mantêm-se assim até que o critério de convergência seja satisfeito, para isso como já demonstrado faz-se a seguinte verificação:

$$\frac{|V^{k+1}| - |V^k|}{|V^{k+1}|} \leq \text{Tol} \quad (16)$$

10º - Avalia-se a probabilidade de falha, para isso utiliza-se a expressão (3).

3.5.4 Sensibilidade das variáveis

O FORM possibilita ainda o cálculo da sensibilidade de cada variável na probabilidade de falha, tal medida é feita por meio do valor de α^* que representa a

componente do vetor normal à superfície de falha, sendo calculado pela seguinte expressão:

$$\alpha^* = - \frac{\nabla g(V^*)}{|\nabla g(V^*)|} \quad (17)$$

Pode-se então calcular o fator de importância para assim determinar a sensibilidade de cada variável:

$$I^* = 100(\alpha^*)^2 \quad (18)$$

Com este fator pode-se verificar o quão impactante é determinada variável em relação à probabilidade de falha, assim variáveis com grande fator de importância induzem a consideráveis mudanças no resultado da análise de confiança ao passo que um baixo fator leva a possibilidade de considerar a variável em questão como determinísticas na análise (MELCHERS, 1999).

3.6 Modelos Empíricos para a Determinação da Pressão de Falha

A formulação básica dos modelos de predição da falha do duto é baseada nos critérios da equação NG – 18 Surface Flaw Equation.:

$$\sigma_{rup} = \sigma_{flow} f_R \quad (19)$$

Onde,

σ_{rup} é a tensão circunferencial da parede do duto no instante da ruptura, numa região fora do defeito;

σ_{flow} é a tensão de escoamento média do material;

f_R é o fator de redução.

O fator de redução está relacionado com a geometria da corrosão e com o fator de dilatação:

$$f_R = \frac{1 - \alpha \frac{A}{A_0}}{1 - \alpha \left(\frac{A}{A_0} \right) M} \quad (20)$$

Onde,

$A_0 = L t$ é a área original da região corroída;

$A = L d$ é a área corroída;

α é o fator empírico relacionado com a forma geométrica utilizada para representar a área de material perdido;

L é o comprimento do defeito;

d é a profundidade máxima do defeito;

M é o fator de dilatação (fator Folias);

t é a espessura do duto.

A tensão circunferencial ou “hoop stress” é obtida a partir de uma relação da pressão interna do duto pela área da seção transversal da parede:

$$\sigma_{rup} = \frac{P D}{2 t} \quad (21)$$

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

$$\sigma_{rup} = \frac{P_{falha} D}{2 t} \quad (22)$$

Substituindo esse valor na relação estabelecida pela equação NG – 18 SurfaceFlawEquation:

$$P_{falha} = \frac{2 t \sigma_{flow}}{D} f_R \quad (23)$$

Pode-se então substituir o valor do fator de redução encontrado:

$$P_{falha} = \frac{2 t \sigma_{flow}}{D} \frac{1 - \alpha \frac{d}{t}}{1 - \alpha \left(\frac{d}{t}\right) M} \quad (24)$$

No estado limite a pressão interna é igual a pressão de falha logo a pressão resistente (PR) que representa a resistência do duto e é igual a pressão interna torna-se igual a pressão de falha (P_f) (TORO,2014).

3.6.1 Estudo no Tempo

As expressões da estimativa da profundidade do defeito (d) e do comprimento do defeito (L) num tempo futuro (T) são dadas (AHAMMED, 1998), respectivamente, por:

$$d = d_0 + R_d (T - T_0) \quad (25)$$

$$L = L_0 + R_L (T - T_0) \quad (26)$$

Onde,

T_0 é o tempo da última inspeção;

d_0 é a profundidade do defeito no instante T_0 ;

L_0 é o comprimento do defeito no instante T_0 ;

R_d é a taxa de corrosão radial;

R_L é a taxa de corrosão longitudinal.

Nestas expressões é adotada uma aproximação linear da taxa de crescimento da corrosão.

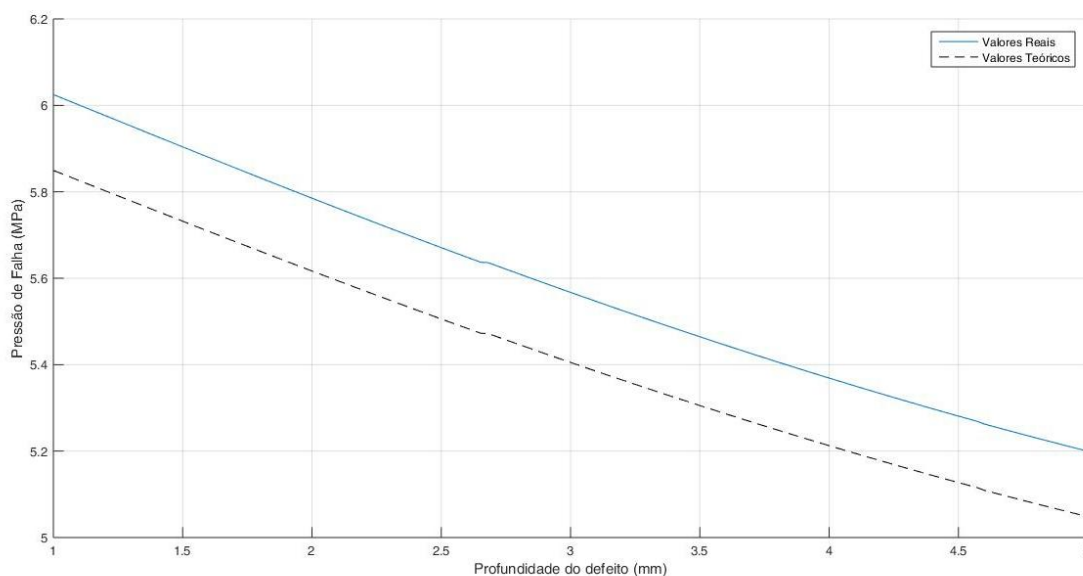
3.7 Variável Erro do Modelo

A pressão de falha obtida via modelos empíricos pode carregar uma certa discrepância entre os valores obtidos pelo método matemático e os valores reais da pressão de falha, uma vez que os métodos matemáticos representam uma reformulação da problemática real. Para solucionar tal questão introduz-se o conceito da variável Erro do Modelo.

Entende-se por Erro do Modelo a variável aleatória que permite comparar os resultados reais com os resultados obtidos segundo o modelo matemático. A variável atua na correção dos resultados. Pode-se compreender a partir do gráfico da Figura 8. No exemplo, pode-se verificar que os resultados obtidos via modelagem

diferem dos resultados reais, a distância entre as duas curvas representa o erro atrelado a tal formulação de cálculo.

Figura 8 - Gráfico com valores reais e teóricos para um caso hipotético de análise da pressão de falha.



FONTE: AUTOR (2015)

Assim obtendo-se o erro torna-se possível aproximar os resultados, gerando assim uma análise mais confiável e de solução mais realista.

3.7.1 Formulação Matemática da Variável Erro do Modelo

A variável erro do modelo é obtida via comparação entre os resultados reais, obtidos em laboratório utilizando ensaios (experimentais), e valores teóricos, determinados pelo método matemático que se utiliza. A relação matemática usada na obtenção da variável pode ser descrita da seguinte forma:

$$X_M = \frac{P_{\text{Experimental}}}{P_{\text{Teórico}}} \quad (27)$$

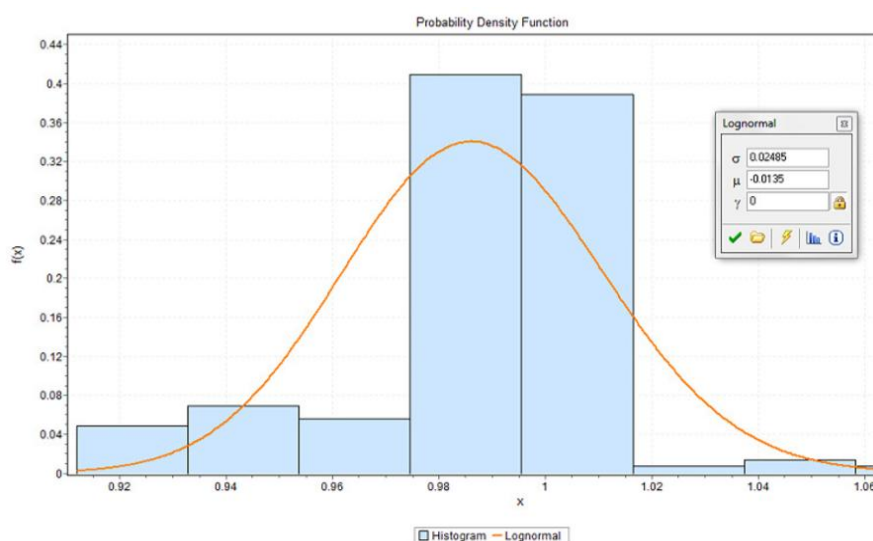
Tendo que X_M é uma variável aleatória que representa o fator do erro do modelo, $P_{\text{Experimental}}$ é o valor real, ou seja, o valor obtido via laboratório e $P_{\text{Teórico}}$ guarda o valor predito pelo modelo de cálculo.

A variável é determinada a partir de uma sequência de análises, adotando como valor final a média dos valores obtidos:

$$\overline{X_M} = \frac{\sum_{t=1}^s (X_M)_t}{s} \quad (28)$$

Sendo s o número de amostras analisadas. Após a determinação da variável, realiza-se sua caracterização por meio da construção de histogramas, que ajudam a encontrar a distribuição de probabilidades que melhor representa o comportamento dos dados (TORO, 2014). Como pode ser visto na Figura 9 onde tem-se um exemplo de histograma e da distribuição de densidade de probabilidade que melhor se adéqua.

Figura 9 – Histograma e distribuição de densidade de probabilidade.



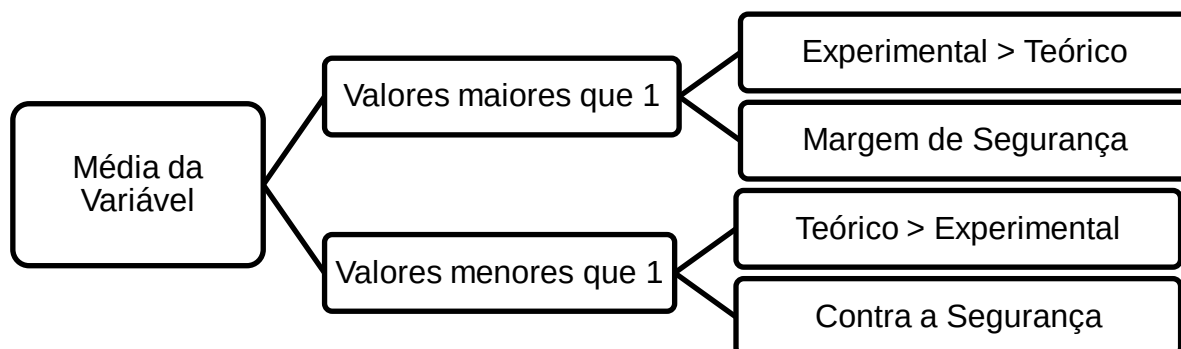
FONTE: SANTOS (2012)

Tem-se por necessária a obtenção do desvio padrão da variável, que representa a dispersão do modelo, valor obtido no programa computacional MATLAB.

Com o valor da variável pode-se indicar o quão conservador é o modelo. Como pode ser verificado no fluxograma da Figura 10, valores teóricos inferiores aos valores reais acarretam em um X_M superior à unidade garantindo 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.

Figura 10 - Fluxograma do comportamento da variável Erro do Modelo.



FONTE: AUTOR (2016)

A variável representa o caráter de tendenciosidade do modelo, tendo que a situação ideal seria aquela onde a média da variável erro do modelo fosse igual à unidade com desvio padrão nulo.

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

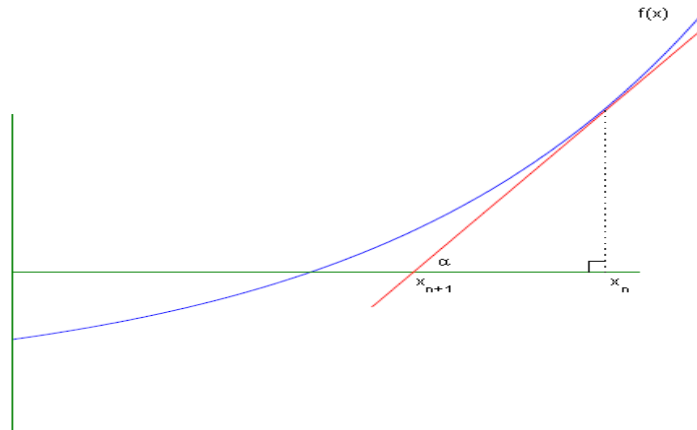
$$PF_{\text{Corrigida}} = PF \overline{X_M} \quad (29)$$

Onde PF é a pressão de falha obtida pela modelagem e $PF_{\text{Corrigida}}$ seu valor após a correção.

3.8 Método de Newton-Raphson

O método de Newton-Raphson é utilizado na obtenção de raízes de funções. É um processo iterativo determinado de tal forma que se tem uma função de iteração tal que $\phi'(\xi) = 0$, onde ξ é uma raiz da função. O método também é conhecido como método das tangentes por conta da formatação de suas iterações, podendo ser visto na Figura 11. O processo compreende na avaliação do ponto x_n , traçado-se uma reta tangente à curva neste ponto de avaliação, sendo obtido o próximo ponto de iteração, x_{n+1} , como a interseção da reta tangente com o eixo das abscissas.

Figura 11 - Representação gráfica do método de Newton-Raphson.



FONTE: CASTILHO (2001).

Para determinar a forma de ϕ consideremos a função $A(x)$ contínua diferenciável e que $A(x) \neq 0, \forall x$. Assim tem-se:

$$f(x) = 0 \Rightarrow A(x)f(x) = 0 \Rightarrow x = x + A(x)f(x) = \phi(x) \quad (30)$$

Calculando a derivada de ϕ na raiz ξ tem-se que:

$$\phi'(\xi) = 1 + A'(\xi)f(\xi) + A(\xi)f'(\xi) = 0 \quad (31)$$

Como $f(\xi) = 0$ e considerando que $f'(\xi) \neq 0$, segue-se que:

$$A(\xi) = -\frac{1}{f'(\xi)} \quad (32)$$

Assim toma-se a função $A(x) = -1/f'(x)$, e portanto tem-se:

$$\phi(x) = x - \frac{f(x)}{f'(x)} \quad (33)$$

Com esta função de iteração é possível montar o processo iterativo de Newton-Raphson:

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)}, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (34)$$

No presente trabalho o processo é utilizado na obtenção do ponto projeto, estabelecendo-se inicialmente um índice de confiabilidade alvo e por meio de Newton-Raphson busca-se a convergência para esse ponto, com isso pode-se obter o ponto de projeto, a espessura do duto.

O dimensionamento ótimo da estrutura busca garantir um nível alvo de segurança com o menor custo de projeto possível. Serão definidas como variável de projeto a espessura do duto e como variáveis aleatórias a profundidade do defeito, a pressão aplicada, a taxa de corrosão radial e a variável erro do modelo.

Com o índice de confiabilidade prescrito (β_{alvo}) é possível definir os critérios de aceitação do risco estrutural (TORRES, 2009). Se expressa então as exigências para garantir a segurança da estrutura em termos de índice de confiabilidade mínimo aceitável ou da pressão de falha máxima, assim pode-se por meio de um processo iterativo obter-se o dimensionamento do duto baseado em confiabilidade.

Têm-se assim um processo de duplo laço onde a busca pelo ponto de projeto é constituída por um processo iterativo, Newton-Raphson, que internamente faz a chamada de outro processo iterativo, o método FORM.

No duplo laço as restrições da formulação determinística são trocadas por restrições de probabilidade ou confiabilidade (TORRES, 2009). Pode-se representar matematicamente o processo de iteração da busca pelo ponto de projeto da seguinte forma:

Minimiza – se $f(X, V)$

Submetido a $g_i^R(X, V) \geq 0, \quad i = 1 \dots nr$ (35)

$\underline{V}_i \leq V \leq \bar{V}_i, \quad i = 1 \dots nv$

Onde,

$g_i^R(X, V)$ são as restrições de confiabilidade que dependem das variáveis aleatórias X e das variáveis de projeto V ;

$\underline{V}_i$ é o limite inferior das variáveis de projeto;

$\bar{V}_i$ é o limite superior das variáveis de projeto;

nr é o número de restrições;

nv é o número de variáveis de projeto.

4. METODOLOGIA DO TRABALHO

O processo de corrosão de dutos leva a um enfraquecimento da estrutura, resultando em impactos na resistência da mesma. O projeto baseado em confiabilidade será feito para determinar a espessura necessária do duto visando um nível de segurança prescrito, a fim de resistir aos esforços solicitantes.

A análise de confiabilidade é realizada através do FORM (método de confiabilidade de primeira ordem) onde a pressão de falha interna do duto é obtida através de formulações empíricas. Tal pressão de falha é então comparada com os resultados de ensaios reais de dutos sujeitos a corrosão para poder-se confrontar os resultados provenientes dos ensaios e os obtidos pelas expressões empíricas. Assim, pode-se verificar qual o erro atrelado aos cálculos quando se utiliza tais expressões, para possibilitar o ajuste dos resultados levando a um aumento de segurança no dimensionamento da estrutura.

O dimensionamento do duto é realizado com a aplicação do método de Newton-Raphson tendo como base um valor alvo para o índice de confiabilidade.

4.1 Formulações Empíricas Adotadas

Seguindo a formulação da NG – 18 Surface Flaw Equation diversas expressões empíricas para o cálculo da pressão de falha foram propostas. Entre as expressões que existem para o cálculo da pressão resistente destacam-se a expressão apresentada pela norma B31G ASME (American Society of Mechanical Engineers), a definida pela norma B31G Modificada que apresenta uma aproximação mais exata e menos conservativa do que a expressão B31G para o fator de dilatação (M) e para tensão de escoamento (σ_{flow}), levando em consideração maior detalhamento na forma do defeito causado pela corrosão.

Usando a tensão última do material no lugar da tensão de escoamento, a norma britânica BS – 7910 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).

As expressões das normas B31G, B31G Modificado, BS-7910 e a fórmula empírica de Ahammed, que são obtidas a partir da expressão (24), estão apresentadas na Tabela 1. Nesta tabela estão contidas as expressões utilizadas com os seus respectivos valores de tensão, as expressões para o cálculo do fator de

dilatação em relação ao tipo de defeito (assim como o critério para a classificação do mesmo) e o valor do fator empírico que é relacionado com a forma geométrica.

Tabela 1 - Resumo das expressões empíricas.

Expressão	σ_{flow}	Tipo do defeito	M	α
B31G	$1,1 * \sigma_y$	$L \leq (20D t)^{0,5}$	$M = \left\{ 1 + 0,8 \frac{L^2}{D t} \right\}^{\frac{1}{2}}$	2/3
		$L > (20D t)^{0,5}$	$M \rightarrow \infty$	1
B31G Modificada	$\sigma_y + 68,95\text{MPa}$	$\frac{L^2}{D t} \leq 50$	$M = \left\{ 1 + 0,6275 \frac{L^2}{D t} - 0,003375 \frac{L^4}{D^2 t^2} \right\}^{\frac{1}{2}}$	0,85
		$\frac{L^2}{D t} > 50$	$M = 0,032 \frac{L^2}{D t} + 3,3$	0,85
Ahammed	$\sigma_y + 68,95\text{MPa}$	$\frac{L^2}{D t} \leq 50$	$M = \left\{ 1 + 0,6275 \frac{L^2}{D t} - 0,003375 \frac{L^4}{D^2 t^2} \right\}^{\frac{1}{2}}$	1
		$\frac{L^2}{D t} > 50$	$M = 0,032 \frac{L^2}{D t} + 3,3$	1
BS-7910	σ_u	-	$M = \left(1 + 0,31 * \frac{L^2}{D t} \right)^{\frac{1}{2}}$	1

FONTE: AUTOR (2016)

4.2 Base de Dados

No intuito de obter matematicamente a variável Erro do Modelo, compara-se os resultados obtidos a partir das expressões empíricas com a pressão de ruptura obtida em ensaios em escala real (full-scale) de dutos contendo defeitos de corrosão. Podendo estes defeitos serem: defeitos reais, oriundos do efeito de corrosão em dutos retirados de serviço, ou defeitos artificiais, produzidos por usinagem.

A base de dados é constituída por um total de 84 ensaios, oriundos de uma junção de experimentos em laboratórios retirados da literatura como detalha a Tabela 2, possuindo defeitos com diferentes geometrias e materiais com distintas propriedades mecânicas.

Tabela 2 - Quantificação de experimentos de laboratório adotados em função do autor.

Autor	Numero de Experimentos utilizados na pesquisa
Kiefner et al.	48
Mok et al	15
Chouchaoui e Pick	10
Benjamin et al.	9
Bjørnøy et al.	2

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

4.2.1 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, soma-se 48 ensaios de ruptura, onde a profundidade máxima do defeito encontra-se dentro da espessura da parede do duto. 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. Estes ensaios de ruptura compõem a base do desenvolvimento dos modelos de falha para dutos corroídos da ASME B31G. Os parâmetros experimentais são listados na Tabela 3.

Tabela 3 - 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

4.2.2 Mok et al (1990)

Realizaram duas séries de ensaios totalizando 18 ensaios de ruptura em dutos de aço X60 de 508 milímetros de diâmetro com 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, 6 ensaios continham reparações e defeitos longitudinal e circumferencial. Na pesquisa foram utilizados 15 destes resultados, correspondendo aos dutos que continham defeitos simples. Os parâmetros constam na Tabela 4.

Tabela 4 - Parâmetros experimentais (Mok et al., 1990).

Parâmetro	Valor Mínimo	Valor Máximo
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

4.2.3 Chouchaoui e Pick (1994)

Realizaram 10 ensaios de ruptura em um duto de aço X46 que continha corrosão interna por pites, que consiste em uma forma de corrosão extremamente 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 ensaiadas continham corrosão por pites, também foi considerado que a separação dos defeitos era adequada para trabalhar de forma independente, os espécimes restantes continham corrosão simples. A Tabela 5 contém os parâmetros dos ensaios realizados.

Tabela 5 - 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

4.2.4 Benjamin et al. (2000)

Realizaram 9 ensaios de ruptura em dutos de aço X60 de 33,9 mm de diâmetro, que continha 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 defeitos retangulares foram criados usando uma fresadora (Figura 12).

Figura 12 - Máquina para realizar usinagem.



FONTE: TORO (2015)

Os Parâmetros podem ser conferidos na Tabela 6.

Tabela 6 - Parâmetros experimentais (Benjamin et al., 2000).

Parâmetro	Valor Mínimo	Valor Máximo
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

4.2.5 Bjørnøy et al. (2000)

Realizaram 12 ensaios experimentais em um duto de aço X52 de 324 milímetros de diâmetro nominal com 10,3 milímetros de espessura, que continha 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 defeitos de corrosão longitudinal foram criados por uma fresadora. Os parâmetros são encontrados na Tabela 7.

Tabela 7 - Parâmetros experimentais (Bjørnøy et al., 2000).

Parâmetro	Valor Mínimo	Valor Máximo
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)	23,2	22,00

4.3 Caracterização da Variável Erro do Modelo

Sendo utilizado como base o banco de dados citado anteriormente, calculou-se por meio da expressão (27) o valor que a variável Erro do Modelo adota para cada configuração, relacionando o valor de laboratório com o valor obtido empiricamente. Em seguida utiliza-se a expressão (28) no cálculo da média da variável que será utilizada como fator de ajuste na obtenção do ponto de projeto.

Utilizando-se quatro formulações empíricas (BS-7910, B31G, B31G Modificada e formulação empírica de Ahammed) tem-se quatro médias diferentes que indicarão o grau de conservadorismo de cada método.

Após a avaliação estatística da variável Erro do Modelo realizou-se a caracterização desta variável aleatória. Por meio da construção de histogramas, construídos na plataforma comercial MATLAB, pode-se escolher a distribuição de probabilidade que melhor se adéqua ao comportamento da variável aleatória.

Foi demonstrado por meio de dados da PETROBRAS que o número de intervenções para manutenção emergencial de dutos, devido a acidentes ou reparos, aumenta exponencialmente a partir de 20 anos de uso, procurou-se adotar como amplitude temporal entre o início do processo de corrosão e o reparo ou substituição do duto um período que fosse além dessa faixa definida pela empresa de petróleo brasileira, admitindo que dentro deste intervalo tem-se um comportamento mais estável. Buscando que a amplitude temporal não se estendesse em demasia, para evitar um projeto longe da realidade onde os resultados para espessura do duto, variável definida como objetivo, resultassem em valores usuais, adotou-se um intervalo de tempo de 30 anos.

4.4 Algoritmo para obtenção do ponto de projeto

Utilizando restrições de confiabilidade, o algoritmo para obtenção do ponto de projeto pode ser descrito pelos seguintes passos:

- 1º - Definição do valor alvo para o índice de confiabilidade (β_{alvo}), ou seja, qual o grau de confiabilidade que a estrutura deve possuir;
- 2º - Definição do ponto de partida da variável de projeto, no presente trabalho, espessura do duto;
- 3º - Início da iteração do método de duplo laço;
- 4º - Início do algoritmo FORM, definindo as variáveis aleatórias, para determinar o índice de confiabilidade $\beta(X, V^k)$, associado às variáveis aleatórias X , neste trabalho sendo a profundidade do defeito, a pressão aplicada e a variável erro do modelo, e à variável de projeto da iteração corrente V^k ;
- 5º - Determinação da função matemática $g(X, V^k)$ para solução do problema de com restrição de verificação de segurança definida por:

$$g(X, V^k) = \beta(X, V^k) - \beta_{\text{alvo}} = 0 \quad (36)$$

- 6º - Determinação do gradiente da função g em (V^k) .
- 7º - Determinação do novo ponto pelo método de Newton-Raphson, neste caso obtêm-se um novo valor para a espessura do duto seguindo a seguinte expressão:

$$V^{k+1} = V^k - \frac{g(X, V^k)}{\nabla g(X, V^k)} \quad (37)$$

Onde,

V^{k+1} é a variável de projeto para a próxima iteração;

$\nabla g(X, V^k)$ é o gradiente da função $g(X, V^k)$, podendo ser obtido da seguinte forma:

$$\nabla g(X, V^k) = \frac{\beta(X, V^k + \Delta V^k) - \beta(X, V^k)}{\Delta V^k} \quad (38)$$

8º - Verifica-se o critério de convergência adotado. Se a convergência é atingida encerra-se o algoritmo, caso contrário retorna-se ao 2º passo utilizando como ponto de partida a espessura do duto V^{k+1} . Adota-se para a tolerância o valor de 0,0001.

4.5 Determinação da Espessura Ótima

Para determinação da espessura ótima, adotaram-se quatro valores para o índice de confiabilidade alvo: 3,1; 3,3; 3,7 e 4,2. Os valores foram retirados da JCSS (Joint Committee on Structural Safety), que estabelece os valores alvo em função da probabilidade de falha limite, podendo ser conferida na Tabela 8.

Tabela 8 - Índices de confiabilidade alvos para os estados limites.

1	2	3	4
Custo relativo da medida de segurança	Conseqüências de falha mínima	Conseqüências de falha moderada	Conseqüências de falha elevada
Alto (A)	$\beta = 3,1$ ($p_f \approx 1 \cdot 10^{-3}$)	$\beta = 3,3$ ($p_f \approx 1 \cdot 10^{-4}$)	$\beta = 3,7$ ($p_f \approx 1 \cdot 10^{-4}$)
Normal (B)	$\beta = 3,7$ ($p_f \approx 1 \cdot 10^{-4}$)	$\beta = 4,2$ ($p_f \approx 1 \cdot 10^{-5}$)	$\beta = 4,4$ ($p_f \approx 1 \cdot 10^{-5}$)
Pequeno (C)	$\beta = 4,2$ ($p_f \approx 1 \cdot 10^{-5}$)	$\beta = 4,4$ ($p_f \approx 1 \cdot 10^{-6}$)	$\beta = 4,7$ ($p_f \approx 1 \cdot 10^{-6}$)

Fonte: PROBABILISTIC MODEL CODE – Part. 1: BASIS OF DESIGN, 2001, p. 17

Determinado o índice alvo, o método de Newton-Raphson realiza as iterações alterando o valor inicial da espessura do duto, adotada como 10 mm, no intuito de convergir na direção do índice determinado.

Para realizar o estudo utilizou-se os dados de três exemplo oriundos da base de dados, utilizando-se um exemplo de Kiefner et al. (1973), nomeado de Exemplo 1, um de Mok et al (1990), Exemplo 2, e outro de Chouchaoui e Pick (1994), Exemplo 3,. Na Tabela 9 constam os dados utilizados nos cálculos.

Tabela 9 - Valores dos Parâmetros utilizados no cálculo da espessura ótima.

Exemplo	Diâmetro do Duto (mm)	Comprimento do Defeito (mm)	Profundidade do Defeito (mm)	Tensão Última (MPa)	Tensão de Escoamento (MPa)
1	762	219,202	5,9944	563	421
2	325	56	2,7	522	373
3	324	95,3	2,8	542	452

A espessura foi projetada para cada uma das expressões de predição da pressão de falha, totalizando quatro espessuras por amostra.

No estudo adotou-se um valor médio de 9 MPa para a carga exercida internamente no duto, ou seja, para o valor da pressão atuante no duto.

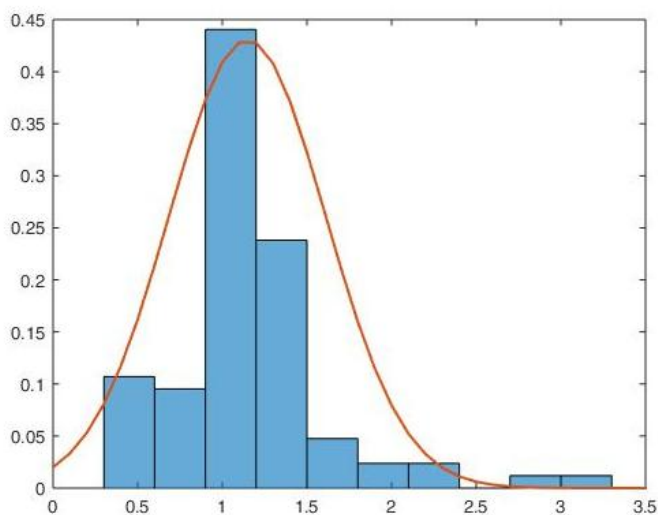
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Cálculo da Variável Erro do Modelo

Utilizando como base a plataforma comercial Matlab, testou-se a distribuição normal de probabilidade, onde a mesma se adéqua de forma aceitável ao comportamento das variáveis, de forma mais próxima ao descrito pelas formulações de Ahammed e BS-7910 e de forma menos aproximada mas ainda aceitável ao comportamento obtido via B31G e B31G Modificada.

Na Figura 13 pode-se conferir o histograma da variável Erro do Modelo para a formulação empírica de Ahammed. Pode-se perceber que praticamente todo o histograma encontra-se dentro dos limites definidos pela distribuição de probabilidade, indicando que tal distribuição representa o comportamento do gráfico. Mesmo contendo valores que podem ser considerados demasiadamente elevados para a variável Erro do Modelo, como no caso de valores acima de 3, a maior parcela de valores encontra-se próxima a unidade, demonstrando que os valores obtidos por tal formulação se aproximam da condição real.

Figura 13 - Histograma da variável Erro do Modelo e distribuição de probabilidade para o modelo de Ahammed.

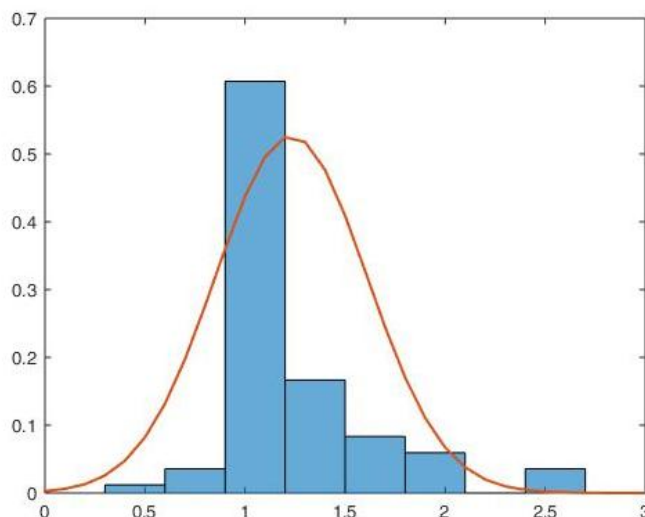


FONTE: AUTOR (2016)

A Figura 14 traz o histograma da variável Erro do Modelo para a formulação empírica BS-7910. A formulação dada pela norma britânica apresenta valores que ultrapassam a envoltória definida pela distribuição de probabilidade no ponto em

torno do valor unitário para a variável aleatória, tendo ainda uma faixa de valores em torno de 2,5 que distam do comportamento definido pela distribuição normal de probabilidade, no entanto pode-se considerar que de forma geral a distribuição normal prediz de forma satisfatória o comportamento da variável para o modelo BS-7910.

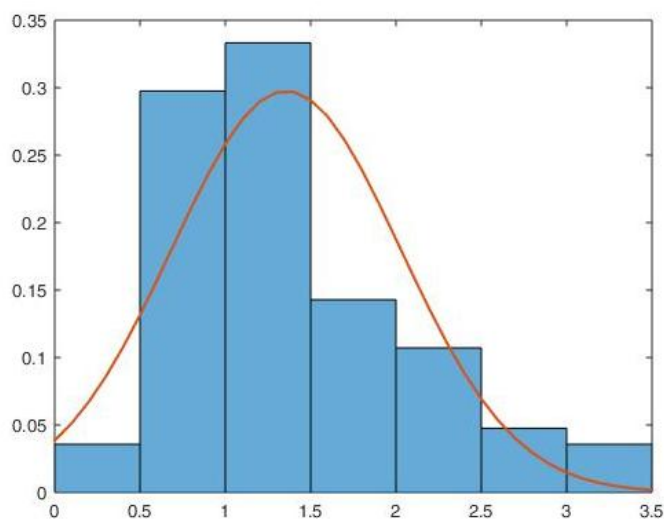
Figura 14 - Histograma da variável Erro do Modelo e distribuição de probabilidade para o modelo BS-7910.



FONTE: AUTOR (2016)

Na Figura 15 pode ser visto o histograma da variável para a formulação empírica B31G. Comparando com os outros dois histogramas este possui um comportamento mais diferenciado, alcançando valores que superam os limites da distribuição de probabilidade, no entanto pode-se perceber que o comportamento geral do gráfico ainda segue a distribuição normal de probabilidade.

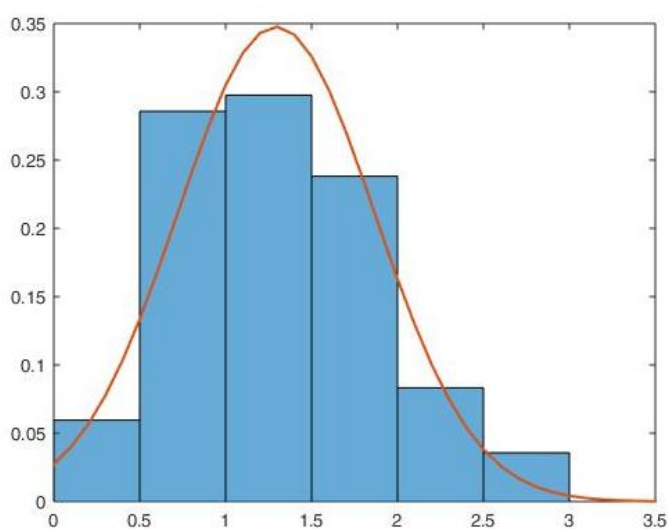
Figura 15 - Histograma da variável Erro do Modelo e distribuição de probabilidade para o modelo B31G.



FONTE: AUTOR (2016)

Na Figura 16 pode ser visto o histograma da variável para a formulação empírica B31G Modificada. Assemelhando-se ao histograma do modelo B31G, o modelo B31G Modificado resulta em valores que se adéquam de forma mais satisfatória à distribuição normal de probabilidade. Representa uma espécie de ajuste ao comportamento resultante do modelo B31G.

Figura 16 - Histograma da variável Erro do Modelo e distribuição de probabilidade para o modelo B31G Modificada.



FONTE: AUTOR (2016)

Na Tabela 10, encontram-se os parâmetros calculados para cada modelo, tendo sido obtido o valor médio, o desvio padrão e a covariância, sendo utilizados os

valores de pressão de falha experimental do citado banco de dados de 84 experimentos, retirados da literatura.

Tabela 10 - Caracterização da Variável Erro do Modelo.

Modelo	Média	Covariância	Desvio Padrão
Ahammed	1,1478	0,2147	0,4634
BS-7910	1,2307	0,1436	0,3789
B31G	1,3563	0,4492	0,6702
B31G Modificado	1,2939	0,3292	0,5738

FONTE: AUTOR (2016)

Analisando os resultados da Tabela 10, pode-se verificar que todos os modelos empíricos fornecem valores conservadores na predição da pressão de falha, uma vez que possuem como média um valor acima da unidade. Este resultado representa que, o modelo obtém, para a pressão de falha, valores inferiores que aqueles obtidos experimentalmente, logo pode-se entender que os modelos empíricos forneceram uma pressão de falha abaixo daquela realmente suportada pelo duto, configurando uma espécie de faixa de segurança.

O modelo B31G representa o de maior conservadorismo na obtenção da pressão de falha tendo, dentre os quatro modelos, a média mais distante da unidade (1,3563). Apresenta ainda a menor precisão na previsão estatística, tendo uma covariância em torno de 45%, evidenciando uma grande dispersão entre os resultados obtidos.

A formulação B31G Modificada representa um ajuste à B31G, resultando em uma covariância inferior (cerca de 33%) e um valor médio mais próximo à unidade (1,2939) no entanto ainda representa um valor distante do valor ideal que seria a média igual à 1,00.

Os modelos que apresentaram uma configuração mais satisfatória foram a formulação empírica de Ahammed e a expressão da norma britânica BS-7910. Analisando o valor médio da variável Erro do Modelo, a formulação de Ahammed foi que mais se aproximou do valor ideal, adotando um valor de média igual a 1,1478 sendo inferior ao obtido pela BS-7910 (1,2307).

Quando visto pela covariância a formulação via BS-7910 resulta na menor dispersão dentre os quatro modelos (covariância em torno de 14,4%), valor superior ao obtido via formulação de Ahammed (21,5%).

Sendo assim tem-se que os resultados via BS-7910 são os mais coesos dentre as quatro expressões, embora apresente uma média para os valores de Erro do Modelo acima do valor obtido na expressão de Ahammed.

5.2 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.

ZHOU e HUANG (2012) concluem que o modelo B31G é o mais conservador, com um valor de média alto (1,473), associado a uma baixa precisão (covariância de 41,2%), comparando-se com os resultados obtidos nesta pesquisa pode-se verificar que a conclusão dos autores também se aplica neste trabalho, sendo este modelo o mais conservador e com alta dispersão nos resultados. Para a análise a partir da expressão B31G Modificada, os autores chegam a resultados parecidos aos encontrados nesta pesquisa, tendo-se um conservadorismo inferior à B31G no entanto uma média ainda acima da unidade (1,297) e uma covariância menor (25,8%). Os autores não utilizaram as expressões empíricas de Ahammed nem a BS-7910.

TORO (2014) chega a conclusões idênticas sobre a formulação B31G, em seu estudo tal método resultou na maior média (1,2889) juntamente com a maior covariância (38,8%). Para formulação B31G Modificada os valores obtidos em média aproximam-se mais da unidade (1,152) e dentre os resultados de seu estudo possui a menor covariância (25,6%). Conclui-se que os resultados seguem os obtidos nesta pesquisa, tendo o modelo B31G Modificado valores menos conservadores e de menor dispersão do que os resultados obtidos via B31G. O autor também não estudou as outras duas formulações utilizadas nesta pesquisa.

5.3 Cálculo da Espessura Ótima

Os resultados obtidos no cálculo da espessura ótima são apresentados a seguir organizados em função da expressão empírica, divididas em dois casos:

1. Caso 1: Índice de Confiabilidade alvo igual a 3,1 e 3,3;
2. Caso 2: Índice de Confiabilidade alvo igual a 3,7 e 4,2;

5.3.1 Resultados Utilizando o Exemplo 1

Nas Tabelas 11 e 12 contam os valores da espessura ótima utilizando o conjunto de dados do Exemplo 1 da Tabela 9. Utilizaram-se os respectivos valores da variável Erro do Modelo para correção dos valores de pressão de falha para cada modelo em questão.

Tabela 11 - Valores da espessura do duto para os dados do Exemplo 1 (Caso 1).

Expressão Empírica	Índice de Conf. = 3,1		Índice de Conf. = 3,3	
	Espessura (mm)	Prob. Falha (%)	Espessura (mm)	Prob. Falha (%)
BS-7910	14,88	0,0956	15,22	0,0482
B31G	12,44	0,0964	12,83	0,0483
B31G	15,43	0,0953	16,24	0,0482
Modificada				
Ahammed	17,37	0,0950	18,58	0,0480

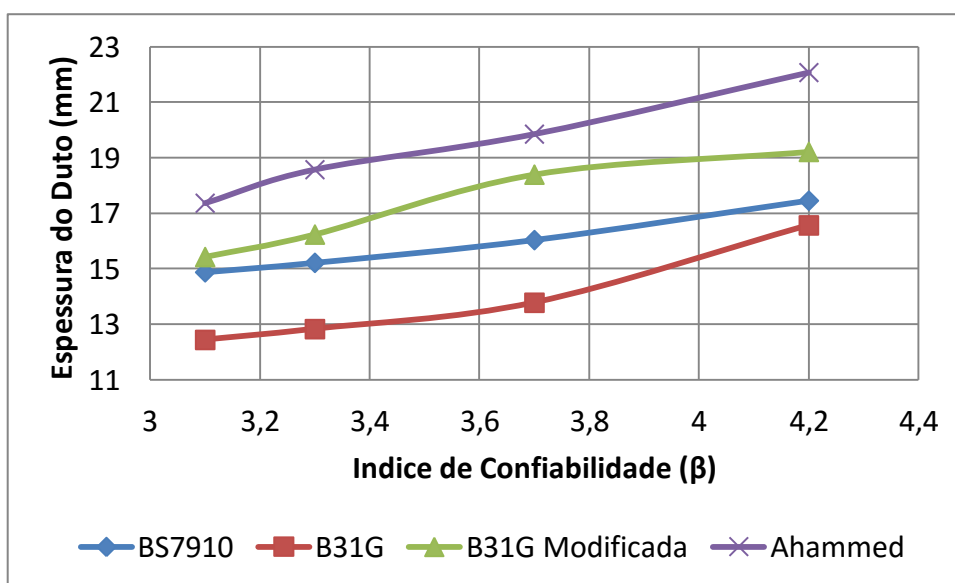
Tabela 12 - Valores da espessura do duto para os dados do Exemplo 1 (Caso 2).

Expressão Empírica	Índice de Conf. = 3,7		Índice de Conf. = 4,2	
	Espessura (mm)	Prob. Falha (%)	Espessura (mm)	Prob. Falha (%)
BS-7910	16,04	0,0111	17,46	0,0013
B31G	13,78	0,0114	16,57	0,0014
B31G	18,40	0,0110	19,22	0,0012
Modificada				
Ahammed	19,86	0,0108	22,08	0,0012

Pode-se perceber que a medida que se estabelece um índice alvo de maior valor a espessura do duto tende a aumentar. Os dados demonstram que a maior probabilidade de falha recai sobre os dados de menor índice de confiabilidade, algo previamente esperado uma vez que com um rebaixamento do grau de segurança, as chances de falha tendem a aumentar.

A formulação empírica de Ahammed resultou nos maiores valores para a espessura do duto (17,37 mm; 18,58 mm; 19,86 mm e 22,08 mm) em todos os três valores alvo de confiabilidade. A B31G produz os menores valores de espessura (12,44 mm; 12,83 mm; 13,78 mm e 16,57 mm), como pode ser verificada no gráfico da Figura 17.

Figura 17 - Gráfico da Espessura do Duto em função do índice de confiabilidade alvo para os resultados do Exemplo 1.



FONTE: AUTOR (2016)

5.3.2 Resultados Utilizando o Exemplo 2

Verifica-se nas Tabelas 13 e 14 os valores da espessura ótima utilizando o conjunto de dados do Exemplo 2 da Tabela 9.

Tabela 13 - Valores da espessura do duto para os dados do Exemplo 2 (Caso 1).

Expressão Empírica	Índice de Conf. = 3,1		Índice de Conf. = 3,3	
	Espessura (mm)	Prob. Falha (%)	Espessura (mm)	Prob. Falha (%)
BS-7910	8,22	0,0963	8,34	0,0481
B31G	7,42	0,0969	7,63	0,0483
B31G Modificada	8,81	0,0963	8,52	0,0481
Ahammed	9,39	0,0963	9,56	0,0480

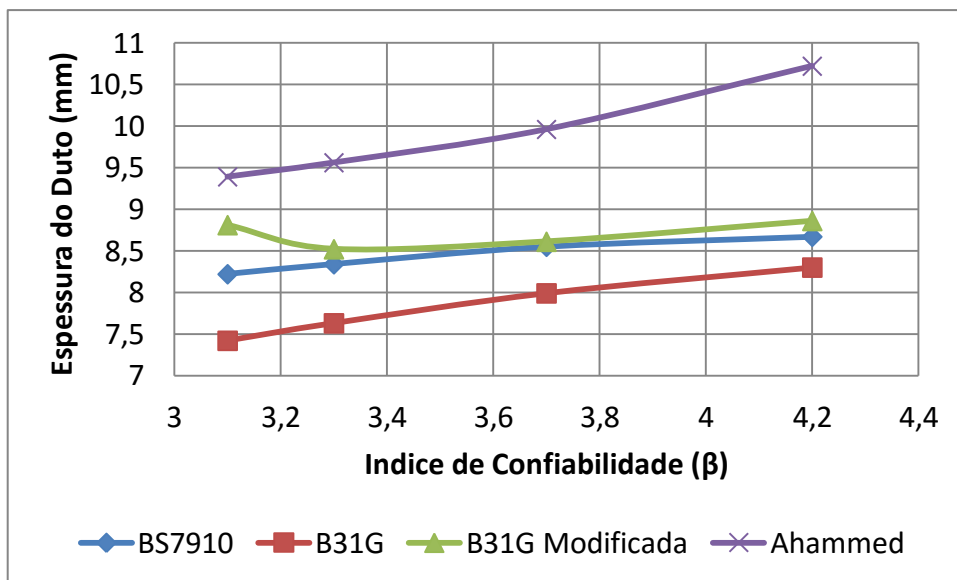
Tabela 14 - Valores da espessura do duto para os dados do Exemplo 2 (Caso 2).

Expressão Empírica	Índice de Conf. = 3,7		Índice de Conf. = 4,2	
	Espessura (mm)	Prob. Falha (%)	Espessura (mm)	Prob. Falha (%)
BS-7910	8,55	0,0108	8,67	0,0013
B31G	7,99	0,0106	8,30	0,0014
B31G Modificada	8,61	0,0107	8,86	0,0013
Ahammed	9,96	0,0107	10,72	0,0011

Novamente a formulação empírica de Ahammed resulta nos maiores valores de espessura de duto (9,39 mm; 9,56 mm; 9,96 mm e 10,72 mm) dentre as quatro

formulações para os quatro valores de índice de confiabilidade. A B31G retorna os menores valores para a espessura nas quatro análises (7,42 mm; 7,63 mm; 7,99 mm e 8,30 mm), comportamento apresentado no gráfico da Figura 18.

Figura 18 - Gráfico da Espessura do Duto em função do índice de confiabilidade alvo para os resultados do Exemplo 2.



FONTE: AUTOR (2016)

5.3.3 Resultados Utilizando o Exemplo 3

Constam nas Tabelas 15 e 16 os valores da espessura ótima utilizando o conjunto de dados do exemplo 3 da Tabela 9.

Tabela 15 - Valores da espessura do duto para os dados do Exemplo 3 (Caso 1).

Expressão Empírica	Índice de Conf. = 3,1		Índice de Conf. = 3,3	
	Espessura (mm)	Prob. Falha (%)	Espessura (mm)	Prob. Falha (%)
BS-7910	8,71	0,0963	8,94	0,0480
B31G	8,79	0,0972	9,78	0,0492
B31G	9,51	0,0970	10,46	0,0488
Modificada				
Ahammed	11,13	0,0966	11,74	0,0484

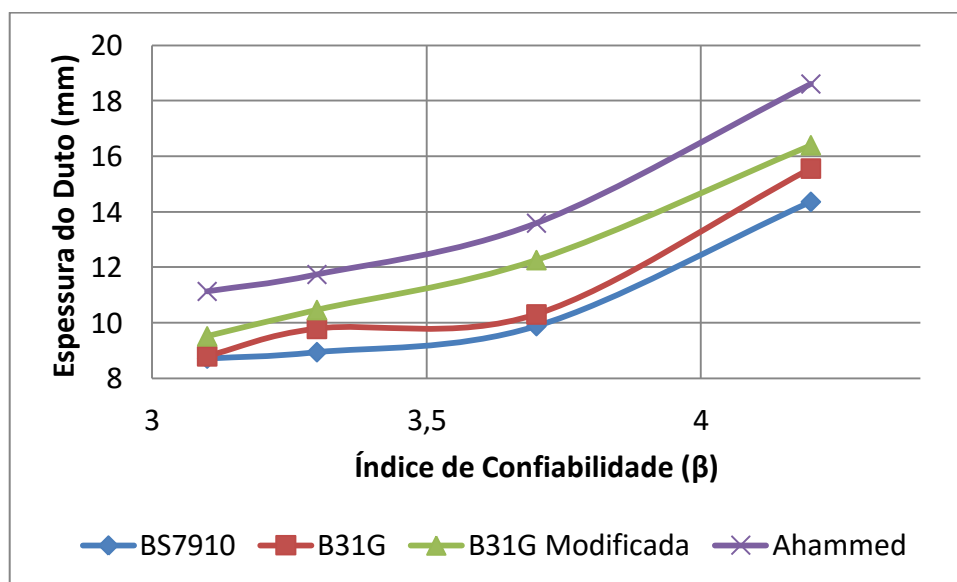
Tabela 16 - Valores da espessura do duto para os dados do Exemplo 3 (Caso 2).

Expressão Empírica	Índice de Conf. = 3,7		Índice de Conf. = 4,2	
	Espessura (mm)	Prob. Falha (%)	Espessura (mm)	Prob. Falha (%)
BS-7910	9,88	0,0107	14,36	0,0013
B31G	10,30	0,0111	15,56	0,0017
B31G	12,26	0,0112	16,40	0,0016
Modificada				
Ahammed	13,59	0,0109	18,61	0,0015

Confirmando a tendência, a formulação empírica de Ahammed resultou nos maiores valores para a espessura do duto (11,13 mm; 11,74 mm; 13,59 mm e 18,61 mm). Assim pode-se afirmar que tal formulação resulta em valores com uma boa margem de segurança, uma vez que retorna valores de espessura maiores que as outras formulações.

Nesta formulação, diferentemente dos resultados obtidos com os dados dos Exemplos 1 e 2, com os dados do Exemplo 3 os menores valores de espessura do duto são obtidos via BS-7910 (8,71 mm; 8,94 mm; 9,88 mm e 14,36 mm). Tais resultados são demonstrados no gráfico da Figura 19.

Figura 19 - Gráfico da Espessura do Duto em função do índice de confiabilidade alvo para os resultados do Exemplo 3.



FONTE: AUTOR (2016)

O comportamento da probabilidade de falha se mantém de forma coesa ao longo das análises, tendo a maior probabilidade de falha para o menor índice de confiabilidade e para o menor valor de espessura.

Valores menores de espessura resultam em uma condição de maior fragilidade do duto uma vez que possui uma menor área de resistência à pressão atuante.

6. CONCLUSÕES

Através deste trabalho pode-se concluir que a verificação e/ou projeção de estruturas com base na análise de confiabilidade leva a um aumento no nível de segurança. Uma vez que, pode-se levar em consideração as incertezas inerentes as cargas, torna-se viável o estudo de forma mais ampla e abrangente da estrutura em questão.

Com tantos avanços tecnológicos, cada vez mais se tem acesso a diferentes produtos e materiais, podendo assim projetar estruturas mais complexas visando garantir maior segurança com menor custo. A análise de confiabilidade entra nesse cenário na busca de garantir que a opção de projeto escolhida atenda aos critérios mínimos de segurança. É uma forma de verificar a segurança da estrutura. Podendo-se definir o índice de confiabilidade que se deseja para o duto e a probabilidade do mesmo de chegar ao colapso.

Tendo em vista os crescentes investimentos em redes dutoviárias, a realização de um projeto de forma cautelosa e segura pode resultar em substanciais reduções de custos com reparos não programados oriundos de falhas no sistema que poderiam ser evitadas. Com a análise da estrutura é possível não só determinar o tempo de vida útil, mas como planejar a manutenção de um duto com defeito, uma vez que se verifica o comportamento do duto com o avanço do tempo.

O uso de formulações empíricas dentro do cenário da confiabilidade estrutural representa uma forma rápida de análise, uma vez que dentre as possíveis formas de obtenção da pressão de falha esta é a que detém o menor custo computacional. Assim sua aplicação é embasada visto que a relação precisão/custo computacional é satisfatória.

O uso da variável Erro do Modelo é de extrema importância na correção dos valores obtidos via expressões empíricas, assim a análise e projeção se tornam cada vez mais realista, atendendo de forma mais eficiente às necessidades e condições reais.

Os resultados obtidos via Ahammed (média igual à 1,1478) constituem o valor médio mais próximo da condição ideal, no entanto apresenta-se com uma covariância (21,5%) acima daquela apresentada pela BS-7910 (covariância de 14,4% e média de 1,2307) que apresenta uma média não tão distante da encontrada

via Ahammed, assim têm-se que os resultados via normatização britânica são satisfatórios, tendo um conjunto de dados coeso.

Os resultados obtidos via B31G (covariância de 45% e média de 1,3563) resultaram na maior covariância dentre as quatro formulações vistas, tendo ainda o maior valor de média. Apresentando uma alta covariância aliada a uma média elevada, os resultados com a aplicação da B31G Modificada (covariância de 33% e média de 1,2939) representam um ajuste nos dados apresentados pela B31G.

Em todas as formulações, os maiores valores para a espessura do duto resultam da aplicação da formulação empírica de Ahammed, aliada aos menores valores para a probabilidade de falha, visto que com o aumento da espessura tem-se o fortalecimento da estrutura de resistência a pressão atuante.

Os menores valores para a variável de projeto advêm da aplicação da B31G. Assim afirma-se que ao utilizar esta formulação adota-se um comportamento menos conservador, no momento em que adotam-se os menores valores encontrados.

A diferença entre os resultados demonstram as variações oriundas das características próprias para cada formulação, visto que a pressão de falha via Ahammed tende a ser numericamente inferior aos valores obtidos via B31G, as diferenças nos valores de espessura podem representar a correção nas diferenças dos valores de pressão de falha. Um valor baixo de pressão resulta em um valor mais elevado para a espessura uma vez que considera-se que a estrutura possui uma menor resistência necessitando de uma área maior de material.

Na situação oposta, uma predição de alta pressão de falha significa que a estrutura resiste a um maior valor de solicitação requerendo um valor menor para a área resistente, em consequência necessitando de um menor valor para a espessura do duto.

REFERÊNCIAS

- 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.
- AKIYOSHI, M. M.; SILVA, A. P.; PEREIRA, R.; PANDOLFELLI, V. C., Importância da utilização de propriedades avaliadas e função da temperatura para simulação computacional de cerâmicas refratárias, *Cerâmica*, Volume 48, nº 306, São Paulo, Abr/Jun, 2002.
- ANG, A.H-S. and TANG, W.H., *Probability Concepts in Engineering Planning and Design*, Vol. II. John Willey and Sons, New York, 1984.
- ASME B 31.8 – Gas Transmission and Distribution Piping Systems. Disponível em: <<https://law.resource.org/pub/us/cfr/ibr/002/asme.b31.8.2003.pdf>>. Acesso em 28 de Setembro de 2015.
- ANSYS, 2014, Ansys Release 14.5 Documentation: Operations Guide.
- BARBOSA, A. H., *Análise de confiabilidade estrutural utilizando o método de Monte Carlo e Redes Neirais*, Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Minas Gerais, 2004.
- BASILIO, L. P.; FREIRE, J. L. F., *Avaliação de metodologias para gerenciamento da integridade de dutos rígidos*, Rio de Janeiro, 2009. 282p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.
- 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.
- BENJAMIN, A.C.; VIEIRA, R.D.; FREIRE, J.L.F.; DE CASTRO, J.T.P. *Burst Testo n Pipeline with Long External Corrosion*. Proceeding of the Third International Pipeline Conference (IPC 2000), Calgary, Alberta, Canada, American Society of Mechanical Engineers, v. 2, p. 793-799, Out. 2000.
- BJØRNOY, O.H.; SIGURDSSON, G.; CRAMER, E.H. Residual strength of corroded pipelines, DNV test results. In: Tenth international conference on offshore and polar engineering (ISOPE 2000), Seattle, USA, 28 Maio – 2 Junho. 2000.
- BS-7910, 1999, Annex G: *The Assessment of corrosion in pipes and pressure vessels* e Annex F: Reliability, partial safety factors, number of tests and reserve factors, British Standard, British Standard.

- BUENO, S. I., *Avaliação Estrutural de Dutos com Defeitos de Corrosão Coincidentes com a Solda*, Rio de Janeiro, 2007. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.
- CARVAJALINO, J. J. L.; FREIRE, J. L. F., *Acoplamento de Estados Limites na Avaliação da Confiabilidade Estrutural de Dutos e Estruturas*, Rio de Janeiro, 2010. 139 p. Tese de Doutorado - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.
- CASTILHO, J. E., *Calculo Numérico*, Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Matemática, Março, 2001.
- CHOUCHAOUI, B.A.; PICK, R.J.; Behaviour of Isolated Pits within General Corrosion, *Pipes and Pipeline International*, v. 39, n. 1, January, February, p. 12-21, 1994.
- CLARKE, A. B.; DISNEY, R. L., *Probabilidade e Processos Estocásticos*, Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 1979.
- EIBER, B., *Overview of Integrity Assessment Methods for Pipelines*, Washington Cities and Countries Pipeline Safety Consortium. Columbus. Ohio, 2003.
- GASPAR, B.; TEIXEIRA, A. P.; SOARES, C. G., *Assessment of the efficiency of Kriging surrogate models for structural reliability analysis*. Probabilistic Engineering Mechanics, Vol. 37, Pag. 24-34, 2014.
- HASOFER, A.M. and LIND, N.C., *Exact and Invariant Second-Moment Code Format*, Journal of Engineering Mechanics (ASME), Vol. 100, No. EM1, pp. 111-121, 1974.
- HU J. et al., *The Probabilistic Life Time Prediction Model of Oil Pipeline due to Local Corrosion Crack*, Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2014.
- Joint Committee on Structural Safety (JCSS), *Probabilistic Model Code – Part I*, Internet Publication (<http://www.jcss.ethz.ch/2001>).
- 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 toughened testing. ASTM STP536, American Society for Testing and Materials, p. 461-681, 1973.
- KIUREGHIAN, A. D.; LIU, P. L., *Structural Reliability Under Incomplete Probability Information*, Journal of Engineering Mechanics (ASCE). Vol. 112, nº 1, 1986.
- KROETZ, H. M., *Meta-Modelagem em confiabilidade estrutural*, Dissertação de mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, Paulo, 2015.

- MATLAB, User's Guide. *The Math Works Inc.*, 2015.
- MELCHERS, R., *Structural Reliability: Analysis and Prediction*, 2nd ed. Chichester, UK, Wiley, 1999.
- MOK, D.R.B.; PICK, R.J.; GLOVER, A.G. *Behavior of Line Pipe with Long External Corrosion*, Materials Performance, v. 29, n. 5, p. 75-79, maio 1990.
- NOVAES, A. G., *Sistemas de transportes*, Rio de Janeiro, editora Edgard Blucher Ltdo, Vol 1,2,3.
- RACKWITZ, R. and FIESSLER, B., *Structural Reliability Under Combined Random Load Sequences*, Computer and Structures, Vol. 9, pp. 489-494, 1978.
- ROSAS, M. A. P.; FREIRE, J. L. F., VIEIRA, R. D., *Análise de Dutos com Perda de Espessura Reparados com Multicamadas Metálicas Coladas*, Rio de Janeiro, 2006, 159.. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do rio de Janeiro.
- SAGRILO, L. V. S., *Análise de Confiabilidade Estrutural Utilizando os Métodos Analíticos FORM e SORM*, Tese de Doutorado, Programa de Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, 1994.
- SANTOS, E. S., *Avaliação Estatística do Erro de Modelos de Resistência para Elementos Lineares de Concreto Armado da ABNT NBR 6118:2007*. 2012. 126p. Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.
- TONATTO, M. L. P.; FORTE, M. M. C.; AMICO, S. C.; ROESE, P. B.; ARAUJO, R. T., *Análise numérica da pressão e ruptura de dutos a base de borracha e cordoneis*, Poliméricos, Volume 25, nº 1, São Carlos, Jan/Fev, 2015.
- TORO, R. J. N., *Pressão de ruptura de dutos contendo defeitos de corrosão*, 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*, Tese de doutorado, UFPE, 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, 2011.
- ZHANG, L.; LU, Z.; WANG, P., *Efficient Structural Reliability Analysis Method Based on Advanced Kriging Model*, Applied Mathematical Modelling, Vol. 39, Issue 2. January 2015, Pag. 781-793.

ZHOU, W., *System Reliability of Corroding Pipeline Vessels Piping*, International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2009.

ZHOU, W.; HUANG, G. X., *Model Error Assessments of Burst Capacity Models for Cored Pipelines*, International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2012.