



## ESTUDOS SOBRE A CONFIABILIDADE EM DUTOS SUJEITOS A CORROSÃO CONSIDERANDO O ERRO DO MODELO

Maylon Dieferson Silva de Sobral<sup>a</sup>, Juliana Von Schmalz Torres<sup>b</sup> e Silvana Maria Bastos Afonso<sup>c</sup>

<sup>a</sup>*md\_dss@hotmail.com, Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Centro Acadêmico do Agreste, BR104 Km59, Sítio Juriti, 55200-970, Caruaru, PE, Brasil, <http://www.ufpe.br/caa>*

<sup>b</sup>*juliana@ufpe.br, Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Centro Acadêmico do Agreste, BR104 Km59, Sítio Juriti, 55200-970, Caruaru, PE, Brasil, <http://www.ufpe.br/caa>*

<sup>c</sup>*smb@ufpe.br, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Av. Acadêmico Hélio Ramos, S/N, Cidade Universitária, 50740-530, Recife, PE, Brasil, <http://www.ufpe.br>*

**Resumo.** *O processo de corrosão representa um dos principais mecanismos de falha dos dutos, que causa a perda de material levando a um enfraquecimento da superfície. Neste trabalho utiliza-se o princípio da confiabilidade estrutural para projetar um duto sujeito ao processo de corrosão, determinando a espessura de projeto do duto. Como a análise de confiabilidade estrutural leva 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. 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 utilizando-se quatro formulações já consagradas na literatura, B31G, B31G Modificada, BS-7910 bem como a formulação empírica de Ahammed. No intuito de corrigir o erro atrelado à obtenção indireta da pressão de falha, 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. A obtenção do ponto de projeto, ou seja, do valor para a espessura do duto baseado na análise de confiabilidade é obtida pelo processo de Newton-Raphson, estabelecendo um valor alvo para o índice de confiabilidade.*

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

## 1 INTRODUÇÃO

O mecanismo de falha por corrosão (LARIN, 2016) 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. A pressão de falha de oleodutos é reduzida pela profundidade da corrosão e aumento da diminuição do grau de aço (XU & CHENG, 2012).

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 confiabilidade estrutural (LEIRA, 2016) é uma questão relativamente nova em termos de ciência, que vem se desenvolvendo rapidamente nos últimos anos. A primeira formulação matemática em problemas de segurança estrutural pode ser atribuída a Mayer (1926), Streletskii (1947) e Wierzbicki (1936). Eles descobriram que os parâmetros de resistência e de carga são variáveis aleatórias, por conseguinte, para cada quadro, existe uma probabilidade de falha associada (TEIXEIRA, 2016).

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 na análise de confiabilidade, logo quando se analisa a relação entre tempo de processamento nos resultados, as formulações empíricas representam um bom método de obtenção da pressão de falha.

O presente trabalho busca projetar um duto através da determinação da espessura de projeto buscando garantir que o nível de segurança desejado seja garantido utilizando-se a menor espessura possível. Busca-se então a espessura que garantirá que o nível de segurança de projeto seja atendido em um tempo futuro (T), prevendo o processo de corrosão no duto. Não é viável em termos econômicos estabelecer um projeto com alto fator de segurança, em contrapartida uma formatação com baixo custo, que não tenha segurança tem que ser descartada

Ao comparar a probabilidade prevista de falha com os critérios de aceitação de confiabilidade, o operador pode agendar reparos de defeitos e estabelecer intervalos de inspeção com mais confiança (BISAGGIO & NETTO, 2015).

## 2 METODOLOGIA

A confiabilidade de uma estrutura, C, é definida como o complemento da probabilidade de falha ( $\text{prob}_f$ ), ou seja,

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

Como geralmente  $\text{prob}_f$  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. 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  $G(\mathbf{U})$ , com  $\mathbf{U}(R,S)$ , pode ser vista como:

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

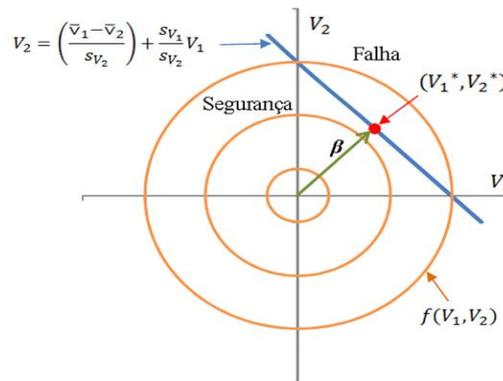
Onde  $R$  é a resistência do elemento estrutural. Para o caso dos dutos é dada pela pressão de falha ( $P_f$ ), enquanto que  $S$  é a sollicitação (carga atuante na estrutura), sendo definida como a pressão atuante no interior do duto.

A principal idéia 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,  $\mathbf{U}$ , cujas distribuições são quaisquer e podem ser dependentes entre si ou não, são transformados em variáveis  $\mathbf{V}$  normais padrões estaticamente independentes (média = 0 e desvio padrão = 1).

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

Na Figura 01 é esquematizada a superfície de falha representada pela reta  $V_2$  (para o caso de duas variáveis aleatórias) no espaço padronizado.

Figura 1 - 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,  $\Phi$  é a função cumulativa da distribuição normal padrão e  $\beta = |\mathbf{V}^*|$  é a distância do ponto  $\mathbf{V}^*$  até a origem, esta distância é obtida via FORM.

Um dos passos fundamentais para o cálculo da probabilidade de falha pelo método FORM é o de encontrar o ponto  $\mathbf{V}^*$  sobre a superfície de falha. 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:

$$\text{Minimize } |V| \quad (4)$$

Sujeito a  $g(V) = 0.0$

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:

$$V^{k+1} = \frac{1}{|\nabla g(V^k)|^2} [\nabla g(V^k)^T V - g(V^k)] \nabla g(V^k)^T \quad (5)$$

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

O algoritmo HL-RF é um caso particular do método SQP (Programação Quadrática Sequencial), em que o hessiano do Lagrangeanos é aproximada por uma matriz de identidade. No intuito de aprimorar o citado algoritmo, PERIÇARO et al., 2015, propõe um algoritmo (HLRF-BFGS) que considera a fórmula de atualização BFGS (Broyden–Fletcher–Goldfarb–Shanno) para aproximar o Hessiano. O algoritmo proposto é tão simples como o algoritmo HL-RF, uma vez que exige apenas uma função e a avaliação do gradiente em cada iteração sendo a nova iteração dada por uma fórmula recursiva. Experimentos numéricos comparativos sobre um conjunto de problemas selecionados a partir da literatura indicam que o algoritmo HL-RF-BFGS tem a vantagem de ser mais robusto e eficiente no que diz respeito à função e avaliação gradiente quando comparado com o algoritmo HL-RF. Entretanto no presente trabalho adota-se a formulação tradicional, pondo-se em prática o algoritmo HL-RF.

As expressões empíricas (AMARAL, 2012) das normas B31G, B31G Modificado, BS-7910 e a fórmula empírica de Ahammed, que são baseadas nos critérios da equação NG – 18 Surface Flaw Equation (Basílio, 2009) é definida da seguinte forma:

$$P_{falha} = \frac{2 t \sigma_{flow}}{D} \frac{1 - \alpha \left(\frac{d}{t}\right)}{1 - \alpha \left(\frac{d}{t}\right) M} \quad (6)$$

Onde,  $\sigma_{flow}$  é a tensão de escoamento média do material;  $\alpha$  é o fator empírico relacionado com a forma geométrica utilizada para representar a área de material perdido;  $d$  é a profundidade máxima do defeito;  $D$  representa o diâmetro do duto;  $M$  é o fator de dilatação (fator Folias) e  $t$  é a espessura do duto.

A formulação das expressões utilizadas neste projeto 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. Neste trabalho utilizam-se as expressões normativas B31G e B31G Modificada, amplamente difundida na literatura, além de duas outras formulações, a expressão normativa britânica BS-7910 e a formulação matemática de Ahammed.

Tabela 1 - Resumo das expressões empíricas.

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

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

$$d = d_0 + R_d (T - T_0) \quad (7)$$

$$L = L_0 + R_L (T - T_0) \quad (8)$$

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.

Para realizar a análise adotou-se que o tempo da última inspeção ( $T_0$ ) do processo de corrosão foi aos 10 anos de utilização do duto.

No intuito de obter matematicamente a variável erro do modelo (TORO, 2014), comparase 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. A base de dados é constituída por um total de 84 ensaios, possuindo defeitos com diferentes geometrias e materiais com distintas propriedades mecânicas. Sendo 48 ensaios de Kiefner at all (1973), 15 ensaios de Mok et all (1990), 10 ensaios de ruptura de Chouchaoui e Pick (1994), 9 ensaios de Benjamin et all (2000) e 2 ensaios de Bjornoy et all (2000).

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 a espessura do duto (ponto de projeto).

A JCSS (Join Committee on Structural Safety) – Basis of Design (2001) traz uma tabela com o índice de confiabilidade alvo que associa o custo relativo a medida de segurança e as conseqüências da falha da estrutura, por um período de um ano (Tabela 2). Aqui, fez-se a projeção do duto adotando-se os índices alvos de 3,1, 3,3, 3,7 e 4,2.

Tabela 2 - Índices de confiabilidade alvos para os estados limites últimos pelo período de um ano.

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

### 3 RESULTADOS

#### 3.1. Caracterização da Variável Erro do Modelo

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 Matlab. Desta forma, escolhe-se a distribuição de probabilidade que melhor se adéqua ao comportamento da variável aleatória.

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 2(a) pode-se conferir o histograma da variável Erro do Modelo para a formulação empírica de Ahammed (1998). Percebe-se que praticamente todo o histograma encontra-se dentro dos limites definidos pela distribuição de probabilidade, indicando que tal distribuição representa o comportamento do gráfico.

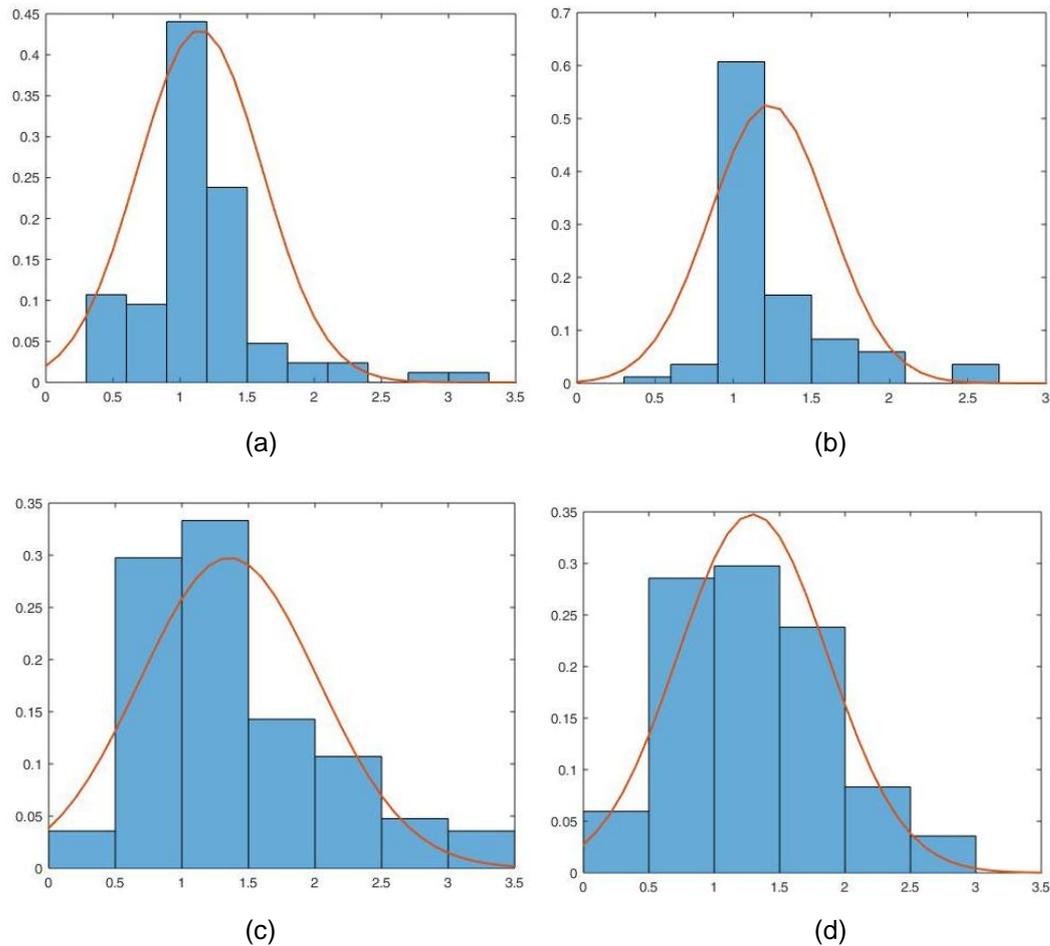


Figura 2 - Histograma da variável Erro do Modelo e distribuição de probabilidade para: (a) modelo de Ahammed (b) BS-9010 (c) B31G (d) B31G Modificada.

A aplicação da norma BS-7910 resulta nos dados vistos na Figura 2(b), apresentando valores que ultrapassam a envoltória definida pela distribuição de probabilidade no ponto em torno do valor unitário para a variável aleatória. 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.

Na Figura 2(c) 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 em geral o comportamento do gráfico ainda segue a distribuição normal de probabilidade.

Na Figura 2(d) 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 adequam de forma mais satisfatória à distribuição normal de probabilidade. Representa uma espécie de ajuste ao comportamento resultante do modelo B31G.

Na Tabela 3, encontram-se os parâmetros calculados para cada modelo, tendo sido obtido o valor médio, o desvio padrão e a covariância, de acordo com o banco de dados de 84 experimentos (seção 2).

Como os dados da PETROBRAS (BASÍLIO, 2009) demonstram 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 relativamente 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 uso do duto de 40 anos.

Tabela 3 - 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

Analisando os resultados da Tabela 3, pode-se verificar que todos os modelos empíricos fornecem valores conservadores no cálculo da pressão de falha, uma vez que a variável erro do modelo possui 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.

### 3.2. 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 neste trabalho 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 neste trabalho, 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 e as apresentadas pela norma 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 neste trabalho, 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 (Ahammed e BS-7910).

### 3.3. Determinação da Espessura do Duto

Para determinação da espessura de projeto do duto, adotaram-se quatro valores para o índice de confiabilidade alvo: 3,1, 3,3, 3,7 e 4,2 (Tabela 2). Os valores foram retirados da JCSS (Joint Committee on Structural Safety), que estabelece os valores alvo em função associados a probabilidade de falha limite.

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

Para realizar o estudo utilizou-se os dados de três exemplos oriundos da base de dados. Utilizando-se um exemplo de Battelle (1973), um de NOVA e Universidade Waterloo (1990) e outro de University of Waterloo (1994). Na Tabela 4 contam os dados utilizados nos cálculos.

Tabela 4 - 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.

Os resultados são apresentados a seguir, organizados em função da expressão empírica utilizada no cálculo da pressão de falha, divididas em dois casos:

- Caso 1: índice de confiabilidade alvo igual a 3,1 e 3,3;
- Caso 2: índice de confiabilidade alvo igual a 3,7 e 4,2;

Nas Tabelas 5 e 6 estão os valores da espessura de projeto utilizando o conjunto de dados do exemplo 1 da Tabela 4. Foram utilizados os respectivos valores da variável erro do modelo para correção dos valores de pressão de falha para cada modelo em questão.

Tabela 5 - 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 Modificada	15,43	0,0953	16,24	0,0482
Ahammed	17,37	0,0950	18,58	0,0480

Tabela 6 - 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 Modificada	18,40	0,0110	19,22	0,0012

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).

Verifica-se nas Tabelas 7 e 8 os valores da espessura de projeto utilizando o conjunto de dados do exemplo 2 da Tabela 4.

Tabela 7 - 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 8 - 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).

Constam nas Tabelas 9 e 10 os valores da espessura do duto utilizando o conjunto de dados do exemplo 3 da Tabela 4.

Tabela 9 - 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 Modificada	9,51	0,0970	10,46	0,0488
Ahammed	11,13	0,0966	11,74	0,0484

Tabela 10 - 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 Modificada	12,26	0,0112	16,40	0,0016
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, percebeu-se com os dados do Exemplo 3 que 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).

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.

## **4 AGRADECIMENTOS**

À Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE) pelo apoio e incentivo por meio do seu Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC) que possibilitou o desenvolvimento desta linha de pesquisa no processo numero BIC-2343-3.01/15, associado ao projeto de pesquisa APQ-1062-3.01/15.

Ao Centro Acadêmico do Agreste (CAA) campus da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) pela disponibilidade da estrutura.

## **5 CONCLUSÕES**

Através deste trabalho pode-se concluir que a verificação e/ou projeto 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, assim torna-se viável o estudo de uma forma mais ampla e abrangente da estrutura em questão.

Com a análise de confiabilidade da estrutura é possível não só determinar o tempo de vida útil, mas também planejar a manutenção de um duto com defeito, uma vez que se verifica o comportamento do duto com o avanço do tempo, além de garantir que a opção de projeto escolhida atenda aos critérios mínimos de segurança. Podendo-se definir o índice de confiabilidade que se deseja para o duto, resultando num maior controle da probabilidade do mesmo de chegar ao colapso.

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 custo computacional é satisfatória ao executar a análise de confiabilidade.

O uso da variável erro do modelo é de extrema importância na correção dos valores obtidos via expressões empíricas, assim a análise se tornam cada vez mais realista, atendendo de forma mais eficiente ao projeto.

Em todas as formulações, os maiores valores para a espessura do duto resultaram 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 resistência da estrutura à pressão atuante.

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

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.

## 6 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.
- AMARAL, R.S.; SISQUINI, G.R.; FREITAS, M.S.R., Análise de segurança de dutos com defeitos de corrosão via método form, Revista Escola de Minas, 2012, volume 65, iss 4, paginas 467-473.
- BASILIO, L. P., *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.
- 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.
- BISAGGIO, H.C.; NETTO, T.A. *Predictive analyses of the integrity of corroded pipelines based on concepts of structural reliability and Bayesian inference*. Marine Structures, Volume 41, Abril 2015, Páginas 180-199.
- 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.
- CARVAJALINO, J. J. L., *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.
- 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.
- PERIÇARO, G.A.; SANTOS, S.R.; RIBEIRO, A.A.; MATIOLI, L.C., *HLRF-BFGS optimization algorithm for structural reliability*, Applied Mathematical Modelling, Volume 39, Issue 7, April 2015, Pages 2025-2035.
- 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.
- 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 toughnedd testing. ASTM STP536, American Society for Testing an Materials, p. 461-681, 1973.

- LARIN, O.; BARKANOV, E.; VODKA O., *Prediction of reliability of the corroded pipeline considering the randomness of corrosion damage and its stochastic growth*, Volume 66, August 2016, Pages 60-71.
- LEIRA, B.J.; NAESS, A.; NAESS O.E.B., *Reliability analysis of corroding pipeline by enhanced Monte Carlo simulation*, volume 144, August 2016, Pages 11-17.
- MATLAB, User's Guide. *The Math Works Inc.*, 2015.
- MAYER, M., T., *Die Sicherheit der Bauwerke und ihre Berechnung nach Grenzkraften*, Springer-Verlag, Berlin, 1926.
- 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.
- RACKWITZ, R. and FIESSLER, B., *Structural Reliability Under Combined Random Load Sequences*, *Computer and Structures*, Vol. 9, pp. 489-494, 1978.
- 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.
- STRELETSKII, N., S., *Foundations of Statistical Account of Factor of Safety of Structural Strength*, State Publishing House for Buildings, Moscow, 1947.
- TEIXEIRA, F.; JUNIOR, J.L., *Methodology for assessing the probabilistic condition of an asset based in concepts of structural reliability*, XV Portuguese Conference on Fracture, PCF 2016, *Procedia Structural Integrity* 1, 181-188.
- 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.
- 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.
- WIERZBICKI, W., *Safety of structures as a Probabilistic Problem*, Przegląd, Techniczny, Polish, 1936.
- 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*, Volume 89, January 2012, Pages 75-84.
- ZHOU, W.; HUANG, G. X., *Model Error Assessments of Burst Capacity Models for Cored Pipelines*, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2012.