



ESTUDO COMPARATIVO DAS ALTERAÇÕES DA NORMA BRITÂNICA BS7910 NO PROJETO BASEADO EM CONFIABILIDADE DE DUTOS SUJEITOS À MÚLTIPLOS DEFEITOS

Anderson Ferreira Alves^a, Juliana von Schmalz Torres^b e Silvana Maria Bastos Afonso^c

^aanderson_americasul07@hotmail.com, Graduando em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Centro Acadêmico do Agreste, BR104 Km59, Sítio Juriti, 55200-970, Caruaru, PE, Brasil, <http://www.ufpe.br/caa>

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

^csmb@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 presente trabalho contempla o projeto baseado em confiabilidade de dutos sujeitos a múltiplos defeitos de corrosão, usando para tal os métodos de Monte Carlo e FORM (método de confiabilidade de primeira ordem), que utilizam informações estatísticas de variáveis aleatórias tal como taxa de corrosão radial, espaçamento entre defeitos, profundidade do defeito e a pressão interna aplicada no duto. A programação foi feita no programa MatLab, e também se fez uso dos comandos de otimização para aplicação em mais de uma variável de projeto. Como variáveis de projeto são adotadas a espessura e o diâmetro do duto. Em sua programação, o método FORM necessita da definição de uma função de falha definida como a diferença entre a resistência (pressão de falha no duto) e a solicitação (pressão atuante no duto). A pressão de falha é obtida através de expressões empíricas das normas BS7910 (2005) e BS7910 (2013), e foram comparados os valores destas duas versões da norma. Na avaliação do projeto do duto envolvendo defeitos interagentes, foi feita uma análise inicial envolvendo defeitos iguais e igualmente espaçados, em seguida defeitos com dimensões diferentes. Uma interface gráfica na linguagem Java será apresentada.*

Palavras Chave: projeto ótimo, confiabilidade estrutural, dutos com corrosão.

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos tem crescido a área de confiabilidade de estruturas. A confiabilidade considera os parâmetros estatísticos das variáveis envolvidas no projeto tais como média, desvio padrão e covariância. A partir destes dados, os métodos de confiabilidade tais como FORM e Monte Carlo conseguem avaliar a probabilidade da estrutura ruir.

O presente trabalho se concentrou no projeto baseado em confiabilidade de dutos com múltiplos defeitos. Neste projeto, busca-se o valor da variável de projeto tal como diâmetro do duto ou espessura do duto que atenda um índice de confiabilidade prescrito para a estrutura.

Os dutos constituem um meio de transporte de gás e petróleo extremamente importante. O estudo de confiabilidade em dutos visa a segurança considerando a economia de recursos financeiros, ou seja, o corte de gastos desnecessários a partir de tomadas de decisão apoiadas em métodos matemáticos. Com este estudo, pode-se dimensionar por exemplo, a espessura de um duto baseada em um índice de confiabilidade especificado em projeto, prevendo um processo de corrosão.

A corrosão é um dos principais mecanismo de falha em dutos, que constitui um processo de degradação de materiais, principalmente aço, por um processo químico ou eletroquímico com o meio ambiente (Toro, 2014).

A corrosão presente no duto reduz a pressão de falha do mesmo. No caso de dutos com mais de um defeito, se eles estiverem próximos a ponto de interagirem, poderão diminuir ainda mais a pressão de falha do duto, caso contrário serão tratados como defeitos isolados. Cada defeito produz alterações no campo de tensão do duto, que se distribuem para além das fronteiras do defeito. A região da superfície do duto onde essas alterações estão presentes é chamada de área de influência do defeito. Quando as áreas de influências dos defeitos se sobrepõem a pressão de falha pode ser menor do que se os defeitos estivessem isolados, (Benjamin, 2015).

2 METODOLOGIA

A análise de confiabilidade é feita aqui através do algoritmo FORM (método de confiabilidade de primeira ordem) e Monte Carlo. A pressão de falha do duto é obtida a partir das expressões empíricas da norma BS7910 (2005) e BS7910 (2013). Através do método de Newton-Raphson (para 1 variável de projeto), e por meio dos comandos de otimização do MatLab (para 2 variáveis de projeto). Em seguida é feito o dimensionamento do duto, ou seja, calcula-se a espessura do mesmo considerando como restrição um valor alvo para o índice de confiabilidade (que tem associado uma probabilidade de falha). O procedimento consiste em um processo de duplo laço em que o método de Newton-Raphson faz a chamada do método FORM ou de Monte Carlo, ambos programados no Matlab.

2.1 CONFIABILIDADE ESTRUTURAL

Os métodos de confiabilidade estrutural são baseados na existência de uma função de estado limite $G(U)$, sendo que $U=(U_1, U_2, \dots, U_n)$ representa o conjunto de todas as variáveis randômicas envolvidas na análise, ou seja, todas aquelas variáveis que possuem alguma informação estatística a seu respeito. A função de falha $G(U)$ deve ser definida de maneira que um limite separe o domínio de falha ($G(U) < 0$) e o domínio seguro ($G(U) > 0$), o limite $G(U)=0$ é chamado superfície de falha (Fig. 1).

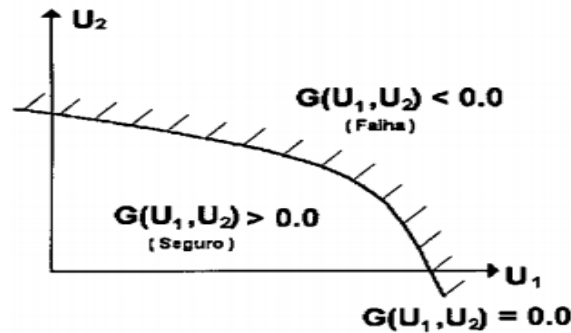


Figura 1- Exemplificação da função de falha, domínio seguro e domínio de falha para o caso de 2 variáveis aleatórias.

Na Figura 1, o local onde $G(U_1, U_2) = 0$ é a superfície de falha que separa o domínio seguro do domínio de falha. A região onde a função de falha é negativa é chamada de domínio de falha, enquanto que o domínio dos valores positivos para a mesma função é chamado de domínio seguro. A probabilidade de falha é definida matematicamente pela Eq.(1):

$$pf = P[G(U) \leq 0] \quad (1)$$

Para cada probabilidade de falha está associado um índice de confiabilidade, que por sua vez mede o grau de segurança da estrutura.

No presente trabalho a superfície de falha é dada pela Eq.(2):

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

Onde R é a resistência da estrutura (pressão de falha do duto), e S é a solicitação (pressão interna atuante no duto).

A pressão de falha é calculada por modelos empíricos de predição da falha no duto. Os métodos empíricos se baseiam em normas em que se definem expressões empíricas para se calcular a pressão de falha do duto (Toro, 2014). No presente trabalho foi utilizada a norma BS7910 nas versões 2005 e 2013 para efeito comparativo, que contemplam um modelo para a pressão de falha para múltiplos defeitos.

2.2 MÉTODO DE CONFIABILIDADE DE PRIMEIRA ORDEM (FORM)

No método FORM as variáveis randômicas (que possuem informações estatísticas) são transformadas em variáveis normais padrão estatisticamente independentes e a função de falha é escrita no espaço representado por estas últimas variáveis, chamado de espaço das variáveis reduzidas (Sagrilo, 1994).

O FORM objetiva encontrar o ponto de projeto. Este ponto representa o ponto mais provável de falha e é o ponto na superfície de falha mais próximo da origem. A distância deste ponto até a origem é chamada de índice de confiabilidade. Para encontrar este ponto o método aproxima a função de falha por uma superfície linear no ponto de maior densidade de probabilidade.

2.2.1 PONTO DE PROJETO

Os métodos para busca do ponto de projeto mais eficientes são baseados no gradiente da função de falha. Para encontrar o ponto de projeto basta formular um problema de otimização baseada nas seguintes condições:

$$\begin{aligned} &\text{Minimize } |\mathbf{V}| \\ &\text{Sujeito a } g(\mathbf{V}) = 0 \end{aligned}$$

Onde $\mathbf{V}$ é o vetor das variáveis aleatórias no espaço das variáveis reduzidas, e $g(\mathbf{V})$ é a função de falha no espaço das variáveis estatisticamente independentes

Para minimizar $\mathbf{V}$ utiliza-se em geral o método iterativo HL-RF (Sagrilo, 1994) representado na Eq.(3):

$$\mathbf{V}^{K+1} = \frac{1}{|\nabla g(\mathbf{V}^K)|^2} \cdot [\nabla g(\mathbf{V}^K)\mathbf{V}^K - g(\mathbf{V}^K)]\nabla g(\mathbf{V}^K)^T \quad (3)$$

Onde $\nabla g(\mathbf{V}^K)$ é o gradiente da função de falha no espaço das variáveis reduzidas avaliada no ponto $\mathbf{V}^K$, $g(\mathbf{V}^K)$ é a função de falha avaliada no ponto, e $\mathbf{V}^{K+1}$ é o novo ponto da interação.

Utilizando restrições de confiabilidade, o algoritmo FORM é detalhado por Torres (2009). Este algoritmo fica dentro do método de Newton-Raphson para 1 variável de projeto, que por sua vez busca a solução em função do índice de confiabilidade alvo. Para 2 variáveis de projeto o FORM é implementado como uma rotina que é chamada pelas funções de otimização do MatLab.

2.3 MONTE CARLO

Monte Carlo é caracterizado como sendo um método probabilístico que gera um grande número de amostras aleatórias para calcular a probabilidade de falha da estrutura. Por realizar um número grande de amostras, esse método acaba sendo mais lento, exigindo um grande esforço computacional quando comparado ao método FORM. A expressão para probabilidade de falha utilizando o método de Monte Carlo está representada na Eq. (4).

$$pf = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I\{G(U) \leq 0\} \quad (4)$$

Onde N é o número de amostras geradas e $G(U)$ é a função de falha, sendo $I\{G(U) \leq 0\}$ igual a 1 para $G(U) \leq 0$, e 0 para $G(U) > 0$.

2.4 CÁLCULO DA PRESSÃO DE FALHA PARA DUTO COM 1 DEFEITO

No presente trabalho a pressão de falha foi calculada utilizando as normas BS7910 nas versões do ano de 2005 e 2013 para efeito comparativo. A norma BS7910 (2005) oferece uma expressão direta para o cálculo da pressão de falha, que está representada na Eq.(5):

$$P = (\sigma_u) \left(\frac{2 \cdot t}{D - t} \right) \left(\frac{\left(1 - \frac{d}{t}\right)}{\left(1 - \frac{d}{t} \cdot \frac{1}{M}\right)} \right) \quad (5)$$

Onde σ_u , é a tensão última do material, t é a espessura do duto, d é a profundidade do defeito, M é o fator de folias e D é o diâmetro externo do duto.

Já a norma BS7910 (2013), oferece um modelo para a pressão de falha em termos de tensão, conforme a Eq.(6):

$$\sigma_{2,ref} = \left[\frac{1 - \left(\frac{d}{t}\right) \frac{1}{M}}{1 - \left(\frac{d}{t}\right)} \right] \sigma_{rup} \quad (6)$$

Onde $\sigma_{2,ref}$ é a tensão de referência, neste caso a tensão de escoamento.

Para o estado limite último de ruptura, considera-se a tensão de ruptura igual a tensão circunferencial do duto quando aplicada a pressão de falha conforme a Eq.(7):

$$\sigma_{rup} = P \cdot \left(\frac{D}{2 \cdot t} \right) \quad (7)$$

Onde: σ_{rup} é a tensão de ruptura, P é a pressão de falha, D é o diâmetro externo do duto, e t é a espessura do duto.

Isolando σ_{rup} na Eq. (6), substituindo na Eq. (7), e por fim isolando P , obtém-se a expressão para a pressão de falha para a norma BS7910 (2013):

$$P = (\sigma_u) \left(\frac{2 \cdot t}{D} \right) \left(\frac{\left(1 - \frac{d}{t}\right)}{\left(1 - \frac{d}{t} \cdot \frac{1}{M}\right)} \right) \quad (8)$$

O fator de folias (M) por sua vez, é o mesmo para as duas versões da norma, e é dado pela Eq.(9):

$$M = \left(1 + 0.31 \left(\frac{l}{\sqrt{D \cdot t}} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

Onde l é o comprimento do defeito.

2.5 DEFEITOS INTERAGENTES

Para cálculo da pressão de falha do duto com múltiplos defeitos, segundo as recomendações das normas BS7910 (2005) e BS7910 (2013), são necessárias as informações geométricas do duto e dos defeitos, além dos dados relacionados ao material do duto. A criação dos grupos de defeitos depende das distâncias longitudinais e circunferenciais entre os defeitos. Após a formação de todos os possíveis grupos interagentes, calcula-se o comprimento equivalente, profundidade equivalente e a pressão de falha correspondente para

cada grupo utilizando a expressão da pressão de falha das normas BS7910 (2005) ou BS7910 (2013). A pressão de falha do duto é a menor destes valores.

Na figura 2 está apresentado um exemplo de um duto com quatro defeitos, em que estão listadas todas as possibilidades de grupos interagentes entre estes mesmos defeitos. A princípio considera-se que todos estes defeitos são interagentes, isto é, as distâncias entre dois defeitos adjacentes não excede os limites máximos especificados pelas normas BS7910 (2005) e BS7910 (2013) para interação entre defeitos. Esses limites estão representados nas Eq. (10), (11), (13) e (14). O procedimento consiste em projetar os defeitos longitudinalmente em um único plano afim de definir a ordem de cada um. Em seguida, formam-se os grupos de defeitos de tal forma que cada grupo seja composto por defeitos consecutivos. Na figura 2 observa-se que o primeiro grupo é formado apenas pelo defeito 1, seguido por outros grupos formados pelas diversas combinações consecutivas do defeito 1 com os outros defeitos. Assim, o defeito 1 não fará mais parte dos outros grupos de defeitos porque todas suas possibilidades de combinações com outros defeitos já foram realizadas. O procedimento prossegue até que o último grupo de defeitos seja composto apenas pelo último defeito.

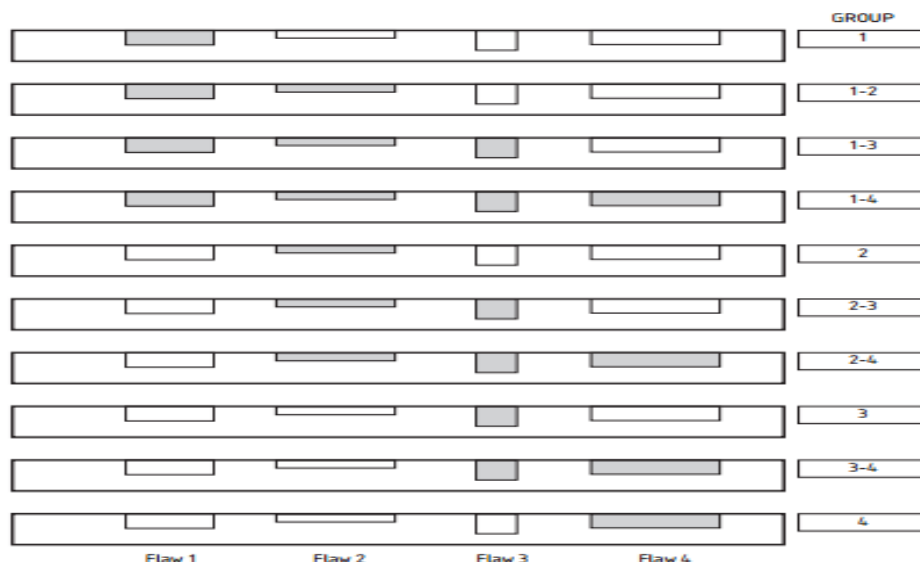


Figura 2- Exemplificação de grupos interagentes de defeitos em um duto.

As regras de interação entre defeitos para a norma BS7910 (2005) estão representadas nas Eq. (10), (11) e (12). A Eq.(10) refere-se ao limite máximo da distância longitudinal para que haja interação entre os defeitos, a Eq. (11) refere-se ao limite máximo da distância circunferencial, e a Eq. (12) é a expressão para o cálculo da profundidade equivalente para o grupo de defeitos interagentes.

$$s < 2\sqrt{DB_0} \quad (10)$$

$$\phi < 360 \frac{3}{\pi} \sqrt{\frac{B_0}{D}} \quad (11)$$

$$d_{eq} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} d_i l_i}{l_{eq}} \quad (12)$$

Onde s é o espaçamento longitudinal entre os dois defeitos, θ é o espaçamento circunferencial entre os dois defeitos, D é o diâmetro externo do duto, B_0 é a espessura do duto, d_{eq} é a profundidade equivalente do grupo de defeitos, l_{eq} é o comprimento equivalente do grupo de defeitos, d_i e l_i são respectivamente a profundidade e o comprimento de um certo defeito no grupo interagente, e n é o número de defeitos presente no grupo.

Para a norma BS7910 (2013) estas regras de interação entre defeitos interagentes são diferentes, e estão apresentadas pelas Eq. (13), (14) e (15). Esta norma admite que os limites máximos para que ocorra a interação, é a menor dimensão entre os 2 defeitos na respectiva direção, longitudinal ou circunferencial. Já a profundidade equivalente é a maior profundidade entre os dois defeitos, diferente da versão anterior, BS7910 (2005), em que a profundidade equivalente era ainda menor que a média ponderada das profundidade, pelo fato de o comprimento equivalente levar em consideração o espaçamento entre os defeitos.

$$s \leq \min(l_1, l_2) \quad (13)$$

$$\phi \leq \min(b_1, b_2) \quad (14)$$

$$d_{eq} = \max(d_1, d_2) \quad (15)$$

Onde l_1 e l_2 são os comprimentos dos 2 defeitos, b_1 e b_2 as larguras, e' d_1 e d_2 as profundidades.

Para ambas as normas o comprimento equivalente de um grupo de defeitos é calculado somando-se os comprimentos de todos os defeitos do grupo com os espaçamentos entre os defeitos adjacentes, conforme a Eq. (16):

$$l_{eq} = l_n + \sum_{i=1}^{i=n-1} (l_i + s_i) \quad (16)$$

2.6 UTILIZAÇÃO DE MAIS DE UMA VARIÁVEL DE PROJETO

Para mais de uma variável de projeto foram utilizadas as funções de otimização presentes no MatLab (2015). Tais funções recebem como parâmetro a função objetivo à minimizar e as restrições do problema. A função objetivo foi definida como o valor absoluto da diferença entre o índice de confiabilidade alvo e o índice de confiabilidade obtido após cada interação. Quando esta diferença se aproxima de zero, o algoritmo converge. Como restrições do problema foram definidas apenas os limites superior e inferior para as duas variáveis de projeto, espessura e diâmetro do duto.

2.7 MODELO DE CORROSÃO LINEAR

O modelo linear de corrosão proposto por Ahammed (1998) considera uma taxa de corrosão radial e longitudinal constante ao longo do tempo. Este modelo está representado nas Eq. (17) e (18).

$$L = L_0 + R_L(T - T_0) \quad (17)$$

$$D = D_0 + R_D(T - T_0) \quad (18)$$

Onde L_0 é o Comprimento do defeito na última inspeção, D_0 é a Profundidade do defeito na última inspeção, R_L é a taxa de corrosão longitudinal, R_D é a taxa de corrosão radial, T_0 é o momento da última inspeção e T é o momento da análise futura.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O presente trabalho visou abordar o problema de projeto de dutos prevendo um processo de corrosão futuro de múltiplos defeitos de corrosão que atenda a um índice de confiabilidade especificado em projeto. Como variáveis de projeto foram adotadas, a espessura do duto e o diâmetro externo do duto.

Na Figura 3 observa-se um trecho de código programado no Matlab responsável por avaliar os grupos de defeitos interagentes como explicado anteriormente.

```
else
    for i=1:NUMERO_DEFEITOS
        for j=1:NUMERO_DEFEITOS

            %calcula o comprimento equivalente de um grupo de combinação
            %de defeitos, que é a soma dos comprimentos e distancia entre
            %os defeitos do grupo.
            l=(j-i)*((U7+U8*DELTAT)+U9) + 10;

            m=(1+0.31*((l)^2)/(U6*U4))^(1/2);

            %calcula a profundidade equivalente do grupo de defeitos
            d=(j-i+1)*(U1+U3*DELTAT)*(U7+U8*DELTAT)/l;

            PRESSOES_DE_FALHA_EXPRSSAO(k)=2*(U5)*(U4/(U6-U4))*(1-(d/U4))/(1-((d)/(U4*m)));
            PRESSOES_DE_FALHA_VALOR(k)=vpa(subs(PRESSOES_DE_FALHA_EXPRSSAO(k), ALEATORIA, U), 6)
            k=k+1;

        end
    end

    %a menor pressão é a pressão de falha
    presao_minima = min(PRESSOES_DE_FALHA_VALOR);
    posicao = find(PRESSOES_DE_FALHA_VALOR == presao_minima);
    %definição da função de falha como a resistência menos a
    %solicitação
    GU = PRESSOES_DE_FALHA_EXPRSSAO(posicao(1)) - U2 ;
```

Figura 3- Trecho de código programa no Matlab, para o cálculo da pressão de falha prevendo múltiplos defeitos iguais e igualmente espaçados

Aqui foi adotado um índice de confiabilidade alvo igual a 3.1. Este valor corresponde a consequências de falha pequenas e grandes custos com segurança conforme definido no *Joint Committee on Structural Safety* (JCSS, 2001).

Afim de propiciar uma experiência mais interativa com o usuário do programa, foi desenvolvida uma Interface Gráfica de Usuário (GUI) ilustrada na Fig. 4, responsável por captar os dados de entrada e mostrar a saída, tal como a espessura do duto. Esta GUI foi desenvolvida na plataforma Java (Oracle, 2017), e sua comunicação com as rotinas do Matlab foram feitas a partir da biblioteca MatlabControl (Kaplan, 2009). Esta GUI foi implementada visando o projeto de dutos com defeitos de mesma dimensão e igualmente espaçados alinhados longitudinalmente. Para o caso de 2 defeitos iguais, porém com espaçamento circunferencial e longitudinal, foi implementado uma GUI com interação em 3 dimensões ilustrada na Fig. 5, visando uma melhor visualização da posição do defeito no duto. Para sua construção além da plataforma Java e do Matlab, foi preciso o uso das rotinas do JMonkeyEngine (2017) para as configurações em 3D. Nesse programa é possível posicionar cada um dos 2 defeitos, informando as distâncias longitudinal e circunferencial do defeito.



Figura 4 – Interface Gráfica Interativa para o caso de múltiplos defeitos de mesma dimensão alinhados longitudinalmente

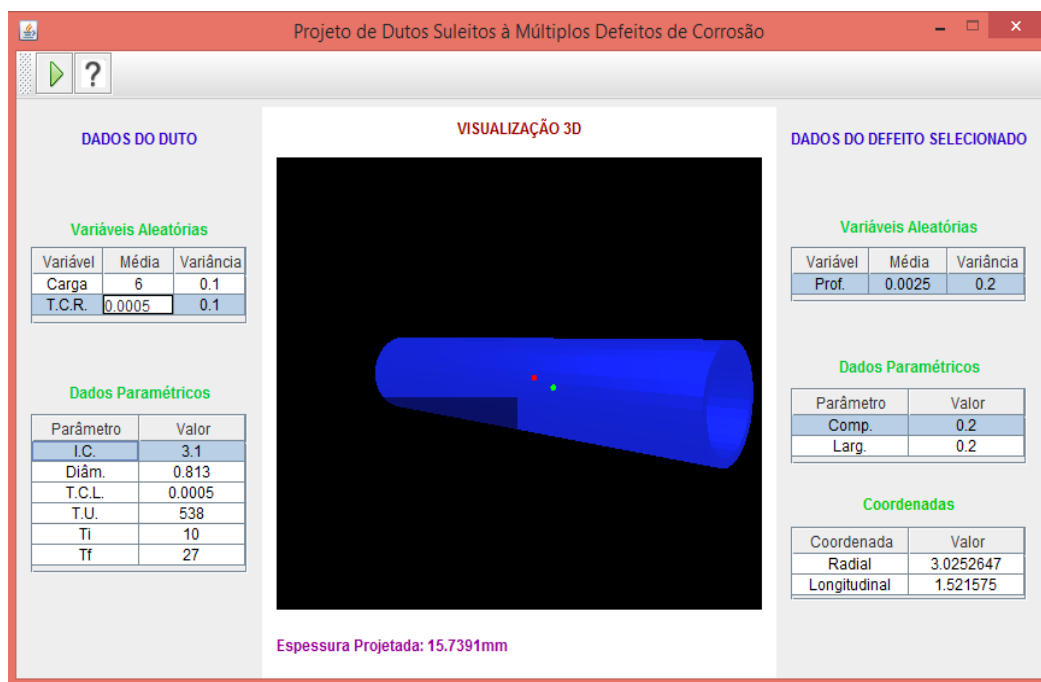


Figura 5 – Interface Gráfica Interativa para o caso de dois defeitos de mesma dimensão com distancias circunferenciais e longitudinais entre si.

3.1 DADOS DE ENTRADA

Após a etapa de revisão teórica, implementou-se o projeto de dutos para múltiplos defeitos iguais e igualmente espaçados no Matlab. Foram usados como entrada os dados fornecidos pelas Tabelas 1 e 2 (Kiefner et al., 1973). As variáveis da Tabela 1 são usadas para a análise probabilística do projeto de dutos, enquanto que a Tabela 2 representa dados importantes para a análise, porém sem informação estatística.

Tabela 1 - Variáveis Aleatórias

Variável	Distribuição	Média	Coef. Variância
Taxa de Corrosão Radial	Normal	0.5 mm/ano	0.1
Carga	Normal	5 MPa	0.1
Distância entre Defeitos	Normal	25 mm	0.05
Profundidade dos Defeitos	Normal	2.5 mm	0.2

Tabela 2 - Dados Paramétricos

Parâmetro	Valor
Diâmetro do Duto	0.813 m
Tensão de Escoamento	415 MPa
Taxa de Corrosão Longitudinal	0.5 mm/ano
Comprimento do Defeito	0.2 m

3.2 PROJETO DE DUTOS COM DEFEITOS DE DIMENSÕES IGUAIS E IGUALMENTE ESPAÇADOS ALINHADOS LONGITUDINALMENTE

Para um índice de confiabilidade alvo igual a 3.1 e utilizando como entrada os valores fornecidos pelas Tabelas 1 e 2, obteve-se os resultados da Tabela 3.

Na Tabela 3 observa-se que, à medida que aumenta-se o número de defeitos interagentes, a espessura do duto tende a aumentar para compensar a perda de resistência provocada pela interação entre os defeitos. Observa-se também que os valores de espessura

fornecidos pela norma BS7910 (2013) são maiores que os valores obtidos pela norma BS7910 (2005), levando a uma análise mais conservadora pela norma mais recente.

Tabela 3 – Espessura em função do número de defeitos

Nº Defeitos	Norma	
	BS7910(2005)	BS7910(2013)
2	16.349 mm	17.149 mm
3	16.658 mm	17.711 mm
4	16.827 mm	18.008 mm
5	16.931 mm	18.190 mm

3.2.1 CONSEQUÊNCIA DE FALHA E CUSTO RELATIVO COM SEGURANÇA

Na Tabela 4 observa-se o índice de confiabilidade alvo em função do custo relativo de segurança e da consequência de falha (JCSS, 2001) para cinco defeitos iguais espaçados longitudinalmente. Na tabela percebe-se que para um custo com segurança pequeno e para a construção de uma obra com grande custo de segurança, onde os riscos podem ser elevados, é preciso ter um índice de confiabilidade mais elevado o que corresponde a uma espessura maior. Desta forma, a medida que é necessária uma maior segurança na estrutura, consequentemente é necessário um índice de confiabilidade maior. Para uma consequência de falha grande e um custo relativo de segurança pequeno, observa-se um índice de confiabilidade ($\beta=4.7$), conforme se observa na tabela. Na Tabela 5 estão apresentados os valores das espessuras do duto com cinco defeitos iguais e igualmente espaçados longitudinalmente em função do índice de confiabilidade alvo.

Tabela 4 – Índice de Confiabilidade em função da Consequência de Falha e do Custo Relativo com Segurança

Custo Relativo de Segurança	Consequência de Falha		
	Pequena	Média	Grande
Grande	3.1	3.3	3.7
Normal	3.7	4.2	4.4
Pequeno	4.2	4.4	4.7

Foram projetada a espessura do duto para valores de índice de Confiabilidade indicados na Tabela 5. Nesta tabela, observa-se que a espessura do duto aumenta à medida que o índice de confiabilidade aumenta. Observa-se também que a norma BS7910 (2013) é mais conservadora que a norma BS7910 (2005).

Tabela 5 - Espessura do duto em função do Índice de Confiabilidade

Índice de Confiabilidade	Norma	
	BS7910(2005)	BS7910(2013)
3.1	16.93 mm	18.19 mm
3.3	17.12 mm	18.49 mm
3.7	17.50 mm	18.81 mm
4.2	17.98 mm	19.33 mm
4.4	18.17 mm	19.53 mm
4.7	18.45 mm	19.84 mm

3.2.2 DUAS VARIÁVEIS DE PROJETO

Também foram feitas análises considerando mais de uma variável de projeto (espessura do duto e diâmetro do duto) para duto com 5 defeitos iguais e igualmente espaçados longitudinalmente. Para isto, se fez uso das funções de otimização presentes no Matlab tal como a função ‘fmincon’ (Matlab, 2015) especificando o algoritmo de Programação Quadrática Sequencial (SQP) para a busca da solução (MathWorks, 2017). Foram utilizados os mesmos dados presentes nas Tabelas 1 e 2, com exceção do diâmetro porque além da espessura, o diâmetro também foi avaliado como variável de projeto. Como restrições foram adotadas apenas os valores máximos e mínimos que as variáveis de projeto poderiam assumir, além do índice de confiabilidade alvo. Estes valores limites, bem como a estimativa inicial podem ser visualizados na Tabela 6, e a solução está representada na Tabela 7 para as duas versões da norma BS7910.

Tabela 6 – Limites variáveis de projeto

Variável de Projeto	Estimativa Inicial	Limite Inferior	Limite Superior
Espessura	0.015 m	0.005 m	0.02 m
Diâmetro	0.7 m	0.2 m	1 m

Tabela 7 – Avaliação das variáveis de projeto para as duas versões da Norma BS7910

Norma	Variável de Projeto	
	Espessura	Diâmetro
BS7910(2005)	0.0179 m	1 m
BS7910(2013)	0,0191 m	1 m

Conforme observa-se na Tabela 7, a norma BS7910(2013) é mais conservadora por levar a um valor maior para a espessura do duto, estando portanto a favor da segurança.

3.2.3 MONTE CARLO VERSUS FORM

No presente trabalho foram projetadas espessuras do duto utilizando ambos os métodos, FORM e Monte Carlo, utilizando como dados de entrada os valores das Tabelas 1 e 2, para o caso de um duto com cinco defeitos iguais alinhados longitudinalmente e considerando um índice de confiabilidade alvo igual 3.1. O resultado desta análise está apresentado na Tabela 8.

Tabela 8 - Comparação métodos Monte Carlo e FORM

Norma	Método	
	Monte Carlo	FORM
BS7910(2005)	17.53 mm	16.93 mm
BS7910(2013)	18.95 mm	17.05 mm

Como pode-se observar o método Monte Carlo é mais conservador do que o método FORM. Observa-se também que os resultados são bastante próximos.

3.3 PROJETO DA ESPESSURA DE DUTOS COM DEFEITOS DE DIMENSOES DIFERENTES E IGUALMENTE ESPAÇADOS ALINHADOS LONGITUDINALMENTE

Foram feitas análises utilizando defeitos com propriedades geométricas diferentes alinhados longitudinalmente. A análise foi feita para dois defeitos, a Tabela 9 se refere ao primeiro defeito e a Tabela 10 ao dados do segundo defeito. Os demais parâmetros são os mesmos encontrados nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 9 - Propriedades do Defeito 1

Variável Aleatória	Média	Coef. Variância
Taxa de Corrosão Radial	0.5 mm/ano	0.1
Profundidade	2.5 mm	0.2

Variável Paramétrica	Valor
Comprimento	0.2 m
Taxa de Corrosão Longitudinal	0.5 mm/ano

Tabela 10 - Propriedades do Defeito 2

Variável Aleatória	Média	Coef. Variância
Taxa de Corrosão Radial	0.7 mm/ano	0.15
Profundidade	2.5 mm	0.25
Variável Paramétrica	Valor	
Comprimento	0.25 m	
Taxa de Corrosão Longitudinal	0.7 mm/ano	

Na Tabela 11, observa-se a espessura de projeto do duto calculada considerando interação entre os dois defeitos. Pode-se notar que pequenas alterações no comprimento, taxa de corrosão radial e taxa de corrosão longitudinal de um defeito para o outro, provocou uma espessura maior que para o caso de dois defeitos iguais representados na Tabela 3.

Tabela 11 – Espessura do duto para 2 Defeitos Diferentes

Norma	
BS7910(2005)	BS7910(2013)
22.72 mm	22.76 mm

4 CONCLUSÕES

Conforme já discutido a confiabilidade estrutural permite levar em consideração as incertezas das variáveis no projeto de dutos. O presente trabalho permite obter um dimensionamento da espessura do duto e do diâmetro do duto de forma mais segura que os procedimentos tradicionais, por levar em consideração as incertezas das variáveis envolvidas no projeto.

Com os resultados obtidos percebe-se que a presença de mais defeitos interagentes de corrosão tendem a diminuir a resistência da estrutura do duto, o que pode provocar a ruptura do mesmo. Aplicando a análise de confiabilidade é possível rever planos de inspeção e manutenção gerando economia, bem como a concepção de projetos de dutos que apresentem maior desempenho no tempo predefinido em projeto.

Em comparação com o método de simulação de Monte Carlo, o método FORM apresenta um melhor desempenho computacional. O Monte Carlo é mais conservador.

Em todos os casos observou-se que os valores da espessura de projeto obtidos pela norma BS7910 (2013) eram maiores se comparados aos que foram obtidos pela norma BS7910 (2005). Se comprova que a versão 2013 é mais a favor da segurança em relação à versão anterior, levando a um projeto mais seguro.

5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem 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 número BIC34113.01-16, 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.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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.

Benjamin, A. C.; FREIRE, J. L. F.; VIEIRA, R. D.; CUNHA, D. J. S., *Interaction of corrosion defects in pipelines e Part 1: Fundamentals*, Pontifical Catholic University of Rio de Janeiro, Brazil, 2015.

BS7910, Guide on Methods for Assessing the Acceptability of Flaws in Metallic Structures-Annex G: The Assessment of Corrosion in Pipes and Pressure Vessels, British Standard, 1999.

JCSS (Joint Committee on Structural Safety), Probabilistic Model Code – Part I, Internet Publication, <http://www.jcss.ethz.ch/2001>.

Jmonkeyengine. Tutorials and Documentation 2017. Disponível em:

<<https://jmonkeyengine.github.io/wiki/jme3.html#graphical-user-interface/>>. Acesso em: 29 Ago. 2017.

Kaplan, Joshua. matlabcontrol. Disponível em:

<<https://code.google.com/archive/p/matlabcontrol/wikis/Walkthrough.wiki/>>. Acesso em: 29 Ago. 2017.

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.

MathWorks. Sequential Quadratic Programming (SQP). Disponível em:

<<https://www.mathworks.com/help/optim/ug/constrained-nonlinear-optimization-algorithms.html#bsgppl4>>. Acesso em: 11 out. 2017.

Matlab, User's Guide. *The Math Works Inc.*, 2015.

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.

Oracle. JavaSE Documentation 2017. Disponível em:

<<http://docs.oracle.com/javase/8/docs/api/index.html/>>. Acesso em: 29 Ago. 2017.

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.