

1

Introdução

Neste trabalho são apresentados conceitos usados na avaliação da confiabilidade estrutural de estruturas existentes. O estudo de confiabilidade ajuda aos engenheiros a monitorar, quantificar, analisar e avaliar o risco das estruturas. O principal objetivo da confiabilidade estrutural é a avaliação da probabilidade de falha de uma estrutura enquanto ela atende aos objetivos para os quais foi projetada, durante sua vida útil.

Segundo EIBER [1] 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 classificadas como:

Corrosão que é a perda da espessura da parede do duto, podendo manifestar-se como perda generalizada, por pites, localizada, corrosão sob tensão, etc.

Dano mecânico que são causados geralmente por equipamentos de remoção e movimentação de solo, tais como escavadores e equipamentos agrícolas, os danos são do tipo moosa, sulco, moosa com sulco, perfurações, etc.

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. Tais danos podem levar ao colapso plástico ou a uma flambagem local ou global do duto.

Já a ASME B31.8 S [2] faz uma classificação de nove categorias de incidentes em dutos, assim: corrosão externa, corrosão interna, corrosão sob tensão, defeitos de fabricação do duto, defeitos por montagem do duto, danos em componentes do duto (p. ex. flanges), interferência de terceiros, operações incorretas e danos devido ao ambiente (p. ex. deslizamento de solo).

As presenças das anomalias descritas acima 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 de este tipo de estruturas adequadamente.

1.1

Cálculo da probabilidade de falha

Em um projeto de engenharia, além da funcionalidade da estrutura, outro aspecto importante é a segurança dela. A confiabilidade de uma estrutura, Rel , é definida como o complemento da probabilidade de falha, POF , de acordo com a seguinte expressão [3]: $Rel=1-POF$. A POF é o termo mais comum quando se fala da medida da confiabilidade de uma estrutura. A POF também é muito usada na análise de risco, onde este é definido como: $Risco = POF \times COF$, onde COF é a consequência de falha, geralmente dada em termos econômicos, fatalidades humanas, dano ao ambiente, etc. Para realizar uma boa análise de risco e, dado que a COF é difícil de ser modificada, o cálculo da POF torna-se importante e muitos esforços são concentrados em esta área.

O cálculo da POF é baseado na determinação de uma função de desempenho do sistema em estudo, conhecida como função de estado limite ou função de falha, $g(x)$ [3, 4, 5], e esta pode ser entendida como a probabilidade da

carga máxima na estrutura, aqui chamada de *demanda*, exceder a resistência da estrutura, aqui chamada de *capacidade*, durante a sua vida útil.

Quando $g(x) = \textit{capacidade} - \textit{demanda} < 0$ é definido que a estrutura falha. Logo, a probabilidade da estrutura falhar é dada por: $POF = P(g(x) \leq 0)$.

Se $f(x)$ representa a função densidade de probabilidade conjunta de todas as variáveis aleatórias x envolvidas na análise, a POF pode ser determinada como a integração de $f(x)$ em todo o domínio da falha e definida como:

$$POF = \int_{g(x) \leq 0} f(x) dx.$$

Devido à dificuldade de avaliação da integral que define a POF , definiu-se o *índice de confiabilidade*, β . Este índice baseia-se na média e no desvio padrão das variáveis aleatórias, e é igual ao número de desvios padrões para o valor da média da distribuição de $g(x)$ ser menor ou igual que zero. β é também definido como a distância da média de $g(x)$ ao ponto mais provável de falha, também conhecido como ponto de projeto.

O cálculo de β apresenta problemas quando a função de falha não é uma distribuição normal. Para isto, foram desenvolvidos métodos para o cálculo de β , que se baseiam em métodos analíticos, tal como o método de confiabilidade de primeira ordem conhecido como *FORM* (*First Order Reliability Method*) e o método de confiabilidade de segunda ordem conhecido como *SORM* (*Second Order Reliability Method*), e em métodos que usam a simulação de Monte Carlo [3- 11].

Os métodos acima citados, além de determinar o índice de confiabilidade, também fazem uma análise de sensibilidade de cada variável na probabilidade de falha. A sensibilidade de cada variável é determinada através de um fator de importância, I_i , o qual dá uma estimativa da influência de cada variável no valor da POF [8].

A *POF* também pode ser calculada para sistemas, ou para equipamentos, com vários modos de falha, os quais são descritos por diferentes funções de estado limite. O acoplamento de todas as funções limites pode ser representado como um sistema em série e este é chamado assim, porque a falha de um componente representa a falha do sistema. O sistema em série também pode ser definido como a união dos eventos de falha individuais do sistema [8, 12, 13].

Pode existir também o caso do sistema estar em paralelo, chamado assim, porque a falha do sistema só ocorre quando todos os seus componentes falham. O sistema em paralelo pode ser definido também como a interseção dos eventos de falhas individuais do sistema [8, 13]. A *POF* tanto do sistema em série como em paralelo é calculada usando a função de probabilidade padrão multinormal.

O uso da função multinormal e da definição de falha como um sistema, pode ser aplicada quando existe a possibilidade de se ter a combinação de diferentes eventos, seja pela união, ou pela interseção deles.

A probabilidade de dois eventos ocorrer, por exemplo, o evento de falha, *EF*, de um defeito e o evento de inspeção (detecção do defeito), *EI*; pode ser definida por meio da probabilidade de interseção dos diferentes eventos. Neste caso, é possível, calcular, qual é a probabilidade de ocorrência de *EF*, dado o resultado de *EI*, $P(EF/EI)$. A solução deste problema é dada pelo teorema de Bayes [3,12,13], assim:

$$P(EF/EI) = \frac{P(EI/EF)P(EF)}{P(EI)} = \frac{P(EF \cap EI)}{P(EI)} = \frac{P(g(x) < 0 \cap h(x) > 0)}{P(h(x) > 0)}$$

Onde: $g(x) < 0$ é a função limite que define o *EF* e $h(x) > 0$ é a função limite que define o *EI*. No caso de vários eventos de inspeção a equação acima pode ser estendida a [1,15]:

$$P(EF/EI_1 \dots EI_n) = \frac{P(g(x) < 0 \cap h_1(x) \cap \dots \cap h_n(x) > 0)}{P(h_1(x) \cap \dots \cap h_n(x) > 0)}$$

De acordo com o citado acima, nas análises de confiabilidade estrutural o cálculo da integral multinormal é a base para os problemas descritos por duas ou mais funções limites. Diferentes métodos são encontrados para a solução deste problema. Alguns métodos conhecidos são as aproximações multinormais de primeira ordem *FOMN* (*First Order Multinormal*), [14,15] e o método do produto das probabilidades condicionais marginais *PCM* (*Product of Conditional Marginals*) [6,14], assim, como a solução numérica da integral multinormal.

O método *FOMN* baseia-se nos conceitos do método *FORM* [6,14-18]. O método *PCM* baseia-se no princípio que uma distribuição multinormal pode ser representada como um produto das probabilidades condicionais e que cada probabilidade condicional é representada por uma distribuição unidimensional [14,19]. A integração numérica para sistemas com várias funções de estado limite não é considerada prática para alguns problemas de engenharia.

1.2

Avaliação da confiabilidade estrutural de dutos com defeitos de corrosão e danos tipo moessa-sulco

Os conceitos acima expostos são a base teórica para a análise de confiabilidade estrutural, a qual é amplamente aceita e oferece procedimentos que ajudam no gerenciamento e na avaliação da integridade de dutos.

As análises de confiabilidade estrutural baseiam-se na definição das funções limites do equipamento ou estrutura. No caso de dutos, os estados limites que levam à falha de um duto ante a presença de um defeito por corrosão podem ser definidos por [20]:

Função do estado limite para vazamento: ocorre quando a profundidade do defeito por corrosão excede a espessura de parede do duto. Esta falha ocorre em defeitos curtos que não provocam ruptura devido à pressão interna.

Função do estado limite para grandes vazamentos: ocorre quando se tem ruptura *controlada*, devido à pressão interna ser maior que a pressão de falha causada pelo defeito. O tipo de falha resultante é o de um grande vazamento do fluido contido no duto. Neste estado limite o valor do comprimento do defeito, L_d , não deve exceder a um tamanho crítico do comprimento do defeito, L_c [21].

Função do estado limite para ruptura: ocorre quando houver ruptura devido à pressão interna ser maior que a pressão de falha causada pelo defeito. O tipo de falha resultante é, então, o de um grande vazamento do fluido contido no duto. Neste estado limite o tamanho de L_d é maior que L_c e seu crescimento é instável, portanto, a falha será uma ruptura propriamente dita.

A partir da função limite de falha por ruptura procede-se a calcular a *POF*. Esta é definida como a probabilidade da carga no duto (considerada só a pressão interna do duto) exceder a resistência do duto ou a capacidade do duto (que para o caso é a pressão de falha, P_f , devido ao defeito de corrosão).

O cálculo de P_f , depende de várias variáveis, dentro das quais se destacam as dimensões do defeito de corrosão. O defeito é detectado e medido pelo *PIG* instrumentado. O relatório do *PIG* instrumentado contém basicamente a profundidade do defeito, o comprimento do defeito, a largura do defeito e a posição do defeito. Cabe ressaltar aqui, que toda medição está sujeita a incertezas, portanto, é importante o conhecimento dos erros de medição e a exatidão na determinação das dimensões dos defeitos, para se fazerem análises de confiabilidade adequadas.

Na inspeção de dutos não é sempre garantido que todos os defeitos presentes são detectados e, portanto, existe a probabilidade de alguns defeitos não serem reportados. Logo, faz-se necessário definir uma probabilidade de detecção, *POD*, que possa ser incluída na análise de confiabilidade estrutural. As curvas de *POD* medem o desempenho da técnica de inspeção e, de modo geral, estão em função do tamanho de defeito. As curvas de *POD* quase sempre são modeladas por uma distribuição exponencial [3, 22, 23].

O cálculo da P_f pode ser feito usando métodos encontrados em normas e na literatura [24-27]. O método recomendado pela ASME B31G é o mais usado na avaliação estrutural de dutos corroídos que se encontram submetidos à pressão interna. O método usa a profundidade máxima de corrosão e é considerado que o defeito tem uma forma retangular ou parabólica, dependendo do seu comprimento. Na literatura podem ser encontrados outros modelos, por exemplo, B31G modificado, o método DNV RP-F101, Battelle e Shell-92 [24-27].

O estado limite para vazamento é usado para descrever se a profundidade do defeito no tempo excede a espessura de parede do duto (pode ser assumido como um valor crítico 80% da espessura de parede do duto, usando a filosofia do *ASME B31G* que diz que defeitos acima de este valor devem ser reparados). Assim, a *POF* por vazamento será calculada como a probabilidade do tamanho do defeito, não exceder um valor crítico de espessura

A *POF* por ruptura pode ser classificada como um grande vazamento ou como uma ruptura propriamente dita. Se, $L_d < L_c$, a ruptura será dada por um grande vazamento, do contrario, será uma ruptura propriamente dita. Para isto, é necessário definir o valor de L_c .

O valor de L_c é definido a partir do fator de Folias [26,28-30]. Definido-se a função limite $g(x)_{gv} = L_c - L_d$ e se: $POF_{gv} = P[g(x)_{gv} \leq 0]$ é baixa, tem-se um grande vazamento, ou se $POF_{gv} = P[g(x)_{gv} > 0]$ é alta, tem-se uma ruptura. Esta probabilidade só atua como uma função indicadora para estabelecer se a falha por ruptura levou a um grande vazamento ou foi uma ruptura por crescimento instável de L_d .

A *POF* total para os eventos de ruptura e vazamento é definida usando o conceito de união de probabilidades ou sistemas em série. Quando um duto possui vários defeitos de corrosão a *POF* total é calculada como um sistema em série. A *POF* total para este caso pode ser determinada usando o método *PCM*

A *POF* pode ser calculada em função do tempo T , devido aos processos de corrosão. O processo de corrosão é complexo e pode ser abordado desde o ponto de vista fenomenológico da corrosão, ou ser estudado só pelas características geométricas dos defeitos de corrosão [31].

A taxa de corrosão pode ser modelada por uma lei em função do tempo. O modelo mais comumente aceito na indústria de dutos é a corrosão interna por CO_2 [32]. O modelo foi proposto por DeWaard e Milliams [33-35] e uma versão simplificada foi proposta por CRIS [36]. A taxa de corrosão é predita em função da temperatura de operação, da pressão de operação do duto e da pressão parcial do CO_2 presente no fluido. O crescimento da profundidade do defeito de corrosão d por CO_2 é calculada segundo: $d(x, T) = r_{CO_2} T$

Para corrosão externa, ou corrosão devido ao solo onde o duto está enterrado, as reações eletroquímicas, que controlam o processo de corrosão, são mais difíceis de serem explicitadas. A origem disto é a complexidade das condições do solo [37].

As taxas de corrosão para dutos podem ser calculadas a partir dos dados fornecidos pelas ferramentas de inspeção em linha. O relatório de um *PIG* para um duto corroído geralmente apresenta numerosos defeitos de corrosão e taxa de corrosão pode ser calculada para cada ponto. A análise ponto a ponto é mais complexa (só é mais fácil nos estágios iniciais do processo corrosivo). Uma taxa de corrosão global é menos conservadora, mas, porém, menos complexa. De uma forma ou outra é necessário encontrar uma função de probabilidade que represente estocasticamente o fenômeno de corrosão e, a partir disto, calcular a taxa de corrosão do duto que é mais provável.

As distribuições de valor extremo são geralmente usadas onde os fenômenos que causam falhas dependem de valores críticos, máximos ou mínimos. Na análise de confiabilidade estrutural a taxa de corrosão é usada como uma variável aleatória com distribuição de valor extremo máximo, tipo I. Como a taxa de corrosão é extrapolada para diferentes trechos do duto de uma mesma amostra de

dados, uma correção é feita nos parâmetros de localização da distribuição para incluir o “efeito tamanho” [38-41].

Quando uma estrutura esta sujeita a um processo de degradação, tanto pelo crescimento de uma trinca, como por um defeito de corrosão, uma das formas de manter a estrutura segura e controlar o processo de degradação é por meio de inspeções. Planos de inspeção podem ser determinados a partir da atualização da *POF* usando o teorema de Bayes. Esta atualização gera a interseção dos k eventos da inspeção com a probabilidade de falha do duto ou estrutura. A solução do problema é encontrada aplicando os conceitos da integral multinormal.

Os danos em dutos, que ocorrem por interferência externa, chamados comumente também de danos mecânicos, podem resultar em: uma mocha (*dent*), um sulco (*gouge*), uma mocha com sulco, ou ainda, uma perfuração na parede do duto [42]. O dano por interferência externa é comumente considerado como um duto que tem uma mocha e um sulco localizado no fundo da mocha e na parede externa do duto. Na análise de confiabilidade estrutural por dano mecânico é considerada que a falha é de efeito imediato. Ou seja, independente do tempo, ao contrário de dutos com defeitos de corrosão.

O estado limite usado para este tipo de dano foi determinado a partir do modelo da mecânica da fratura elasto-plástica do procedimento R6 [60,61,62], o qual avalia o dano através do diagrama de falha (*FAD – Failure Assessment Diagram*). Para a aplicação do modelo, o sulco está orientado na direção axial e é considerado como uma trinca (conservador). A avaliação do defeito é do tipo “passa ou não passa”, onde, se o defeito (no *FAD* é um ponto (S_r, K_r)), está na região de segurança do *FAD* o mesmo é aprovado. Se o ponto (S_r, K_r) , fica na região de falha do *FAD* o duto ou a estrutura avaliada é rejeitada.

Existem dois modos de falha básicos avaliados: colapso plástico e fratura rápida (frágil). O colapso plástico é controlado pela plasticidade global na seção com defeito (eixo horizontal do *FAD* - S_r) e a fratura rápida pelos campos de tensão-deformação locais na ponta da trinca (eixo vertical do *FAD* - K_r) [43].

A curva que separa a região de segurança e de insegurança do *FAD* é definida como: $K_r = S_r \left[\frac{8}{\pi^2} \text{Ln} \left(\text{Sec} \left(\frac{\pi}{2} S_r \right) \right) \right]^{-0.5}$. Esta curva é a que define a função limite para avaliar o dano moossa-sulco ($g(x)_{\text{moossa-sulco}}$).

Os estudos de confiabilidade por dano mecânico também podem ser usados para análises preditivas usando análises de risco. Isto é, pode-se determinar a frequência de falha a partir de uma apropriada frequência de impacto dos equipamentos de remoção e movimentação de solo em uma população de dutos, e da probabilidade de falha de um único defeito moossa-sulco [44,45]. Está frequência de falha é definida por: *Frequência de Falha = Frequência de Impacto* \times $POF_{\text{moossa-sulco}}$.

As frequências de impacto podem ser obtidas através de dados históricos do local e do operador do duto e de diferentes bases de dados [5,46-51].

A metodologia de cálculo da frequência falha apresentada aqui usa uma combinação de dados históricos com análises de confiabilidade estrutural, a qual pode ser comparada com as frequências de falhas de bases de dados fornecidas pelas mesmas fontes citadas acima no caso da frequência de impacto.

Da mesma forma como foi tratado nas análises de dutos corroídos, o comprimento do sulco L_s determina se a ruptura será de caráter estável ou instável. Se o valor de L_s comparado com um valor de comprimento crítico do sulco, L_c , é menor, então, a ruptura será estável e dada por um grande vazamento (este evento será chamado só de vazamento); do contrário será uma ruptura propriamente dita (este evento será chamado de ruptura).

Uma probabilidade de falha que defina se ocorrerá um vazamento pode ser calculada a partir de $POF_{L_s \rightarrow v} = P[L_c - L_s > 0]$ e se a falha resultará em uma ruptura tem-se: $POF_{L_s \rightarrow r} = P[L_c - L_s \leq 0]$. A *POF* por vazamento será dada se $g(x)_{\text{moossa-sulco}} \leq 0$ e $g(x)_{L_s \rightarrow v} > 0$ ambas acontecerem. Conforme as leis de

probabilidade da ocorrência de dois eventos esta, é definida como a interseção dos dois eventos.

A *POF* por ruptura será dada se $g(x)_{mossa-sulco} \leq 0$ e $g(x)_{L_s \rightarrow r} \leq 0$ ambas acontecerem. A probabilidade de falha total para um defeito moessa-sulco, tanto, pelo evento de vazamento ou pelo evento de ruptura, pode ser avaliada conforme as leis de probabilidade como uma união de eventos. Esta *POF* pode ser calculada usando os conceitos de confiabilidade em sistemas e o cálculo da integral multinormal.

O procedimento apresentado neste trabalho para a avaliação da confiabilidade estrutural de dutos e/ou estruturas pode ser resumido nos seguintes itens:

- i. DADOS INICIAIS:
 - Definição das variáveis do problema como variáveis aleatórias, caso se disponha de suficiente informação delas.
 - Desenvolvimento das funções limite do problema
- ii. ANÁLISE DE CONFIABILIDADE ESTRUTURAL
 - Calcular a probabilidade de falha para cada uma das funções limites (para isto pode-se usar FORM, SORM, Monte Carlo, etc.)
 - Realizar a análise de sensibilidade, dado o caso, voltar a *i* e redefinir as variáveis, e em seguida, calcular de novo a *POF*.
 - Se o duto ou estrutura possui mais de uma função de estado limite, seja por diferentes tipos de danos ou inspeções realizadas, atualizar a *POF* de falha.
 - Descrever o problema de mais de um estado limite como um sistema em serie, ou paralelo, ou uma combinação deles.
 - Calcular a *POF* do sistema usando a integral multinormal (usar *FOMN*, *PCM*, *I-PCM*, ou integral numérica).
- iii. SAIDA
 - A partir dos valores de *POF*, pode-se:
 - Gerar planos de inspeção

- Análises preditivas. Cálculo da frequência de falha, usando valores adequados de frequência de impacto ou frequência de ocorrência do dano.

1.3

Conteúdo da tese

O conteúdo desta tese encontra-se apresentado da seguinte maneira:

O capítulo dois apresenta conceitos fundamentais de confiabilidade estrutural e métodos para a avaliação da probabilidade de falha.

No capítulo três faz-se uma descrição da distribuição multinormal, assim, como dos métodos para calcular a probabilidade de falha quando se usa esta distribuição.

Os conceitos dos capítulos dois e três são usados para desenvolver uma metodologia para avaliação de confiabilidade estrutural, a qual é capaz de acoplar diferentes eventos podem ocorrer durante a vida útil de dutos e estruturas.

O capítulo quatro trata do cálculo da probabilidade de falha em dutos corroídos. Alguns exemplos são apresentados para descrever a determinação da probabilidade de falha segundo os métodos *FORM*, *PCM* e *I-PCM*.

O capítulo cinco apresenta um procedimento para a avaliação da confiabilidade estrutural de dutos com defeitos tipo moessa-sulco. Usam-se também aqui, também os conceitos dos capítulos dois e três.

No capítulo seis se encontram as conclusões e considerações finais da tese.

No apêndice A tem-se uma descrição maior do cálculo da taxa de corrosão, usando as distribuições de valor extremo.