

1

Introdução

Os dutos para transporte de petróleo e gás são um dos meios mais seguros e que menos agridem ao meio-ambiente, além de possuírem uma alta eficiência e produtividade. Mesmo assim, eles estão sujeitos a diversos tipos de defeitos, dentre os quais se destacam aqueles causados por corrosão. Tais defeitos são um dos maiores responsáveis por falhas nessas estruturas. Para assegurar a segurança operacional da malha de dutos de transporte, pois um acidente de grande porte num duto pode causar imensos danos econômicos, ambientais e sociais, esta malha deve ser monitorada e ter sua integridade estrutural avaliada continuamente.

São três os principais métodos utilizados para avaliar a capacidade estrutural de dutos com defeitos de corrosão: os métodos numéricos, os experimentais e os semi-empíricos. Cada um deles apresenta vantagens e desvantagens. Entre os métodos numéricos pode ser destacado o método dos elementos finitos (MEF). A análise computacional com o MEF para os defeitos causados por corrosão tem se mostrado uma das alternativas mais eficientes para a avaliação correta da integridade estrutural de dutos com defeitos [1, 2]. Mesmo apresentando grande versatilidade e eficiência, os resultados obtidos pelo MEF devem ser validados por meio de comparação com métodos experimentais. A análise via MEF, requer mão de obra bem treinada, especializada e qualificada, para que a mesma gere modelos que representem adequadamente a geometria, carregamentos e condições de contorno dos modelos reais e saiba interpretar adequadamente os resultados obtidos pela simulação numérica. O método experimental tem como pontos negativos o tempo para realização do experimento, incluindo aí a fabricação e a obtenção de corpos de prova, a necessidade de mão de obra altamente qualificada e, além disso, a necessidade de equipamento para ensaio. Existem também os chamados métodos semi-empíricos, que utilizados para avaliação de segurança de

duto com defeitos e são disponíveis através de normas utilizadas pelo setor. O seu uso implica, no entanto, em várias simplificações na geometria real do defeito de corrosão, o que pode levar a resultados muito conservadores e imprecisos.

Diversos métodos semi-empíricos foram elaborados para determinar a pressão de ruptura de defeitos de corrosão com orientação longitudinal, No trabalho de Souza R.D. [3], estes métodos foram divididos em dois grupos:

Grupo I – Métodos de simples aplicação e que, em relação à área corroída, levam em consideração apenas a maior profundidade do defeito e do comprimento. Dentre esses métodos podem ser citados:

- ASME B31.G – Manual for Determining the Remaining Strength of Corroded Pipelines [4].
- 0,85 dL – Também conhecido como método B31G Modificado [5].
- DNV RP-F101 para defeitos isolados [6].

Grupo II – Métodos que exigem o conhecimento do perfil de corrosão. Nesses grupos podem ser citados:

- “Effective Area” [5].
- DNV RP-F101 para defeitos de geometria complexa [6].

Tradicionalmente na indústria, a avaliação da pressão de falha de dutos que apresentam perdas de espessura por corrosão sob a forma de colônias de defeitos é feita através do uso de uma regra de interação seguida do uso de um método de avaliação. No entanto, para determinados casos de distribuição geométrica dos defeitos de corrosão, os resultados são muito conservativos.

1.1

Motivação

As previsões exageradamente conservativas dos métodos semi-empíricos dos grupos I e II, acarretam em um aumento desnecessário no número de inspeções e reparos nos dutos, e na redução desnecessária da pressão de trabalho. Assim, tais previsões acabam por impactar negativamente na produção que é escoada pelo duto e aumentam os custos de manutenção do mesmo.

Estes resultados exageradamente conservativos são constantemente vistos em casos onde os defeitos que interagem são separados circunferencialmente por uma área de material íntegro. Isto acontece porque esta área íntegra não é considerada nos cálculos propostos pelos métodos semi-empíricos.

1.2

Objetivos do Trabalho

1.2.1

Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo geral, determinar a pressão de falha e validar o Método das Linhas Ortogonais de Ruptura (MLOR) para determinar a pressão de falha de um duto contendo defeitos de corrosão interagindo.

1.2.2

Objetivos Específicos

Para atender aos seus objetivos, este trabalho apresenta:

1. Discussão técnica do MEF para achar a pressão de falha de um duto que contém defeitos de corrosão interagindo.

2. Comparação e validação do método MLOR com os resultados obtidos de simulações numéricas utilizando o MEF, e com os testes experimentais do trabalho apresentado por AC Benjamin et al. (2007) [8].

1.3

Revisão Bibliográfica

As seguintes referências presentes neste trabalho tratam da avaliação da resistência residual de dutos corroídos:

Para estudar o comportamento de dutos com defeitos longos de corrosão, Benjamin et al. (2000) [9] realizaram ensaios no laboratório. Na primeira fase do projeto, foram ensaiados 9 espécimes tubulares com defeitos de corrosão externos, retangulares, isolados, com contornos suavizados usinados por eletro-erosão. Os tubos eram de material X60 com diâmetro externo de 323,9 mm e espessura da parede de 9,53mm. O parâmetro variável foi o comprimento dos defeitos usinados para simular a corrosão, estabelecido entre 250 e 525 mm. A profundidade de corrosão foi fixada em 70% da espessura da parede e a largura em 10 vezes a espessura da parede. Carregamentos de pressão interna foram aplicados.

Os valores de pressão interna no instante da ruptura foram comparados com os resultados dos métodos ASME B31G, RSTRENG 085dL, RSTRENG Effective Área e DNV RP-F101. Constatou-se que para os defeitos longos uniformes ensaiados, o método ASME B31G gerou resultados muito conservadores, o método RSTRENG 085dL gerou resultados não-conservadores e os métodos RSTRENG Effective Área e DNV RP-F101 geraram resultados conservadores, sendo estes últimos mais adequados nas situações avaliadas.

Na segunda fase do projeto iniciado por Benjamin et al. (2000) [9], Benjamin et al. (2002) [10] realizaram simulações por MEF de 4 espécimes ensaiados experimentalmente por Benjamin et al. (2000) [9]. Foram utilizados dois tipos de elementos finitos, elementos de **casca** e elementos **sólidos**. O software comercial utilizado foi o ANSYS. O método Newton-Raphson foi empregado para a solução do sistema de equações de equilíbrio, compatibilidade

geométrica e constitutiva. Não-linearidades geométricas e do material foram consideradas. O modelo de plasticidade empregado foi endurecimento isotrópico.

Dois critérios de falha numéricos foram adotados. O primeiro critério, de falha local, diz que o duto falha quando a tensão de von Mises atinge o limite de ruptura verdadeiro do material em qualquer ponto da região do defeito. O segundo critério, de falha global, diz que ocorre o colapso plástico quando o modelo não converge mais, mesmo para o carregamento de pressão interna sendo aplicado em incrementos bem pequenos (incrementos $\leq 2,5 \times 10^{-4}$ x pressão de falha). Tanto os elementos de casca quanto os sólidos produziram resultados adequados em relação aos ensaios experimentais. Os elementos sólidos foram um pouco mais precisos que os elementos de casca.

Diniz [11] reproduziu os mesmos ensaios experimentais realizados por Benjamin et al. [9], e também fez simulações numéricas utilizando o MEF. Elementos finitos sólidos foram utilizados para reproduzirem melhor a geometria do defeito de corrosão e o perfil de deformações elasto-plásticas ao longo da espessura. Para tal fim, foi empregado o software *ANSYS* e utilizou-se as propriedades reais dos materiais de cada tubo ensaiado, obtidas dos ensaios de tração uniaxial realizados anteriormente.

Dois critérios de ruptura foram adotados. O primeiro critério é quando o primeiro elemento atinge a tensão equivalente de von Mises igual ao limite de ruptura verdadeiro do material e o segundo é a instabilidade numérica devida ao colapso plástico, que ocorre quando todos os elementos da espessura em qualquer região do defeito atingem o limite de ruptura verdadeira do material. A faixa média compreendida entre estes dois critérios foi de 3.5% da pressão de ruptura, e o primeiro critério foi considerado mais adequado por ser mais conservador.

Pelo fato de o método 085dL apresentar resultados não-conservadores para defeitos de corrosão uniformes longos e profundos, através de comparação com os resultados experimentais de Benjamin (2000) [9], Benjamin e Andrade (2003) [12] propuseram modificações na formulação de defeitos longos deste método para criar o método 085dL modificado. Em comparação com os resultados dos ensaios experimentais de Benjamin (2000) [9], observou-se que apenas o

espécime com o defeito de corrosão mais curto obteve resultado contra a segurança pelo método 085dL modificado. O erro médio foi de 9,8%.

Continuando a validação do método 085dL modificado para confirmar seu conservadorismo, Benjamin e Andrade (2004) [13] realizaram estudos dos parâmetros com diferentes tamanhos de corrosão, pois nos ensaios experimentais de Benjamin [9], apenas o comprimento da corrosão foi variado. Depois foram realizadas simulações pelo MEF no software *ANSYS* com elementos de casca. Dez casos foram simulados. Fixou-se a profundidade da corrosão em 30 ou 70% da espessura do duto.

Os resultados do MEF foram comparados aos dos métodos 085dL modificado, B31G, 085dL e RP-F101. Para os 4 casos com defeitos profundos (70%), os métodos B31G e 085dL modificado mostraram um conservadorismo adequado, enquanto que os métodos RP-F101 e 085dL não foram conservadores. Para os 6 casos com defeitos rasos (30%), o método B31G foi excessivamente conservador, enquanto que os métodos método 085dL modificado, RP-F101 e 085dL foram adequadamente conservadores.

Com o objetivo de se obter uma solução para dutos corroídos mais específica para diferentes geometrias de defeitos de corrosão, Choi et al. (2003) [14] realizaram ensaios experimentais, análises por MEF e finalmente propuseram uma solução analítica para dutos de material X65 em função da profundidade e comprimento do defeito de corrosão assim como da geometria do duto. Foram ensaiados sete espécimes com corrosão retangular externa usinada com cantos suavizados para evitar excessiva concentração de tensões.

A análise pelo MEF foi feita no software *ABAQUS*, com tipo de elemento sólido isoparamétrico com vinte nós. Foram consideradas geometrias de corrosão retangulares ou elípticas. A falha numérica do tubo foi adotada quando a tensão de von Mises atingiu uma das diversas tensões de referência em todo o ligamento na região da corrosão. Comparando as pressões de ruptura numérica e experimental, verificou-se que para o defeito retangular a tensão de referência mais adequada foi 90% da resistência à tração verdadeira e, para o defeito elíptico 80% da resistência à tração verdadeira. O estudo paramétrico numérico foi realizado com trinta casos

de corrosão elípticos (para estabelecer critério de engenharia conservador) variando-se a geometria do duto e do defeito da corrosão. Aplicando análise de regressão nos resultados de elementos finitos a solução analítica foi estabelecida.

Guimarães [15] apresentou continuidade aos estudos de Choi et al. (2003) [14] no desenvolvimento da sua dissertação. Análises de elementos finitos foram realizadas através do *software ANSYS*; elementos de casca foram os utilizados. O estudo paramétrico totalizou 32 casos, variando-se a geometria do duto e do defeito de corrosão retangular. Considerou-se a ruptura quando a tensão de von Mises atingiu a tensão de referência de 90% da resistência à tração verdadeira do material no nó mais solicitado.

Benjamin e Cunha (2007) [16] propuseram a criação de um novo método para defeitos interagindo, denominado: MTI, *mixed tipe of interaction*. Este método apresenta a diferença de considerar nos seus cálculos todas as áreas de material íntegro situadas entre os defeitos de corrosão de uma colônia. Este método será apresentado com detalhe no Capítulo 2 desta dissertação.

P.M. Fontes, J.L.F. Freire JLF (2009) [17] propuseram a criação de um novo método para defeitos interagindo, denominado ‘‘Novo Método Para Previsão de Ruptura de Colônias de Corrosão’’. Este método será apresentado com detalhe no Capítulo 2 desta dissertação.

1.4

Organização do Trabalho

O presente trabalho está estruturado em cinco capítulos. O capítulo 1, Introdução, apresenta a motivação do trabalho e mostra uma visão geral da sua organização.

- O capítulo 2 apresenta uma revisão teórica do assunto relacionado com a determinação da pressão de falha de dutos com defeitos de corrosão sob a forma de colônias e descreve de forma básica e sucinta os principais tópicos

relacionados a este trabalho. São discutidos tópicos como: integridade estrutural de dutos, definições e tipos de defeitos de corrosão. Também são descritos os principais métodos semi-empíricos utilizados na avaliação da resistência residual de dutos corroídos e são apresentadas contribuições de trabalhos na área envolvendo defeitos de corrosão em dutos, assim como é apresentado o método MTI desenvolvido recentemente [8, 18]. Finalmente se apresenta o novo método MLOR estudado inicialmente por P. Moura [17].

- O capítulo 3 descreve como foi desenvolvido o procedimento de modelagem computacional pelo método dos elementos finitos (MEF) de dutos com defeitos de corrosão, e discute seus parâmetros geométricos, bem como os tipos de elementos, malhas, carregamentos, condições de contorno, e propriedades dos materiais adotados para a análise numérica.

- No capítulo 4 são feitas considerações sobre o critério de ruptura numérica, sobre as não-linearidades física e geométrica existentes neste tipo de problema, além de considerações sobre o pós-processamento dos resultados, visando a análise da interação que ocorre entre os defeitos. Neste capítulo são também apresentados os resultados das análises realizadas nos modelos.

- Finalmente, no capítulo 5 são apresentadas as conclusões e considerações finais deste trabalho, bem como são descritas as suas contribuições e sugestões para trabalhos futuros.