

## 7

### Conclusões e recomendações de trabalhos futuros

O trabalho desenvolvido apresenta a avaliação de metodologias para o gerenciamento da integridade de dutos de aço com defeitos de corrosão. Dentro dessa linha, foram comparados três diferentes programas e metodologias analíticas, no cálculo da pressão de falha e da probabilidade de falha, no instante imediato à inspeção e em momentos futuros.

Em um primeiro momento, foi apresentada uma revisão bibliográfica das principais metodologias semi-empíricas utilizadas na indústria para a determinação da pressão de falha em dutos de aço com defeitos de corrosão, onde o histórico e as particularidades associados a cada metodologia foram destacados.

Em um segundo momento, apresentou-se os conceitos de confiabilidade aplicada ao gerenciamento da integridade de dutos de aço com defeitos de corrosão. Neste ponto, foi introduzido um modelo analítico para o cálculo da probabilidade de falha imediata e futura, com enfoque nas incertezas associadas às medições dos defeitos e às taxas de corrosão.

Em seguida, foram introduzidos os programas PLANPIG, CONFIABILIDADE e OPIS, onde uma avaliação qualitativa de cada aplicativo foi apresentada, destacando-se as premissas, os modelos considerados e as funcionalidades disponíveis.

Por último, os diferentes métodos foram aplicados sobre um defeito hipotético isolado, e em seguida em três diferentes dutos com defeitos reais de corrosão, abrangendo diversas condições operacionais, de projeto e quanto ao estado de corrosão. Realizou-se a comparação dos resultados de pressão de falha e de probabilidade de falha, obtidos para a condição imediata e para momentos futuros, permitindo avaliar as particularidades associadas a cada método.

No desenvolvimento do presente trabalho foi possível observar diversos aspectos práticos e teóricos associados ao cálculo da pressão de falha e da probabilidade de falha em dutos de aço com defeitos de corrosão, possibilitando a obtenção das seguintes conclusões:

### 7.1.

#### **Quanto ao desempenho dos programas avaliados no cálculo da pressão de falha imediata e futura**

Foi possível verificar que todos os programas avaliados se mostraram eficazes no cálculo da pressão de falha imediata e futura, guardando-se as particularidades de cada aplicativo quanto ao tratamento dos fatores de projeto e das incertezas associadas à medição.

**PLANPIG** – Nas opções *Integridade Imediata* e *Integridade Futura*, o aplicativo fornece a pressão de falha considerando o uso do fator de projeto estabelecido no arquivo de entrada de dados, não havendo a necessidade de tratamentos adicionais após o fornecimento da pressão de falha e do ERF (*Estimated Repair Factor*). As incertezas associadas ao PIG Instrumentado na medição da profundidade e do comprimento do defeito são consideradas no cálculo da pressão de falha, sendo a dimensão do defeito majorada pela soma das incertezas da ferramenta de inspeção. Na opção *Integridade Futura*, o programa considera o modelo de crescimento de defeito apenas na profundidade.

**CONFIABILIDADE** – O aplicativo fornece as pressões de falha imediata e futura considerando o fator de projeto fixado na interface de aquisição dos dados gerais da análise. Na opção DNV, vale ressaltar que o fator “*modelling factor*” deve ser considerado no fator de projeto desejado. No cálculo da pressão de falha futura, o programa considera o crescimento do defeito apenas na profundidade.

**OPIS** – O aplicativo fornece a pressão de falha real, ou seja, o fator de projeto fixado na interface de aquisição de dados não é considerado no cálculo da pressão de falha. O uso do fator de projeto no cálculo do ERF deve ser feito pelo usuário após a apresentação dos resultados pelo programa. Vale ressaltar que o programa considera incondicionalmente o modelo de interação de defeitos. No cálculo da pressão de falha futura, o aplicativo permite a consideração de crescimento do defeito nas três dimensões.

### 7.2.

#### **Quanto ao desempenho dos programas no cálculo da probabilidade de falha imediata e futura**

Na avaliação dos diferentes programas, foram observados diferentes modelos de cálculo da probabilidade de falha, sendo possível estabelecer uma classificação entre

modelos que consideram os modos de falha por vazamento e por ruptura como fenômenos independentes ou como fenômenos associados. Os resultados apresentados por ambos os modelos são congruentes apenas em defeitos onde o modo de falha reinante é o de vazamento. Em defeitos onde o modo de falha por ruptura se mostra dominante, se verificou maiores valores de probabilidade de falha obtidos pelos modelos que avaliam os modos de falha independentemente.

**PLANPIG** – Segundo [25], o parâmetro PS é a probabilidade do defeito de corrosão atingir a profundidade de segurança DS, onde DS é o menor valor entre a profundidade do defeito correspondente a um ERF igual a 1,0 (usando o fator de projeto pretendido) e 80% da espessura nominal do duto. Por sua vez, o parâmetro PV é a probabilidade do defeito de corrosão atingir a profundidade de ruptura DR, onde DR é o menor valor entre a profundidade do defeito correspondente a um ERF igual a 1,0 (usando um fator de projeto de 1,0) e 85% da espessura nominal do duto. Essa abordagem está associada a uma **análise dos modos de falha por vazamento e por ruptura de forma associada**. Outro ponto observado nesse modelo, é que as incertezas associadas à medição do comprimento do defeito não são consideradas.

**CONFIABILIDADE** – O aplicativo calcula, para cada defeito isolado e para o duto, a probabilidade de vazamento (POL), a probabilidade de ruptura (POR) e a probabilidade de falha (POF). A probabilidade de vazamento é calculada pela probabilidade que um dado defeito tem de apresentar um valor na sua profundidade maior que 80% da espessura nominal de parede. Por sua vez, a probabilidade de ruptura é calculada pela probabilidade que o defeito tem de apresentar um valor de pressão de ruptura inferior à MAOP, podendo considerar ou não o fator de projeto no cálculo da pressão de ruptura. Por último, a probabilidade de falha é calculada pela combinação das probabilidades de ruptura e de vazamento. O modelo adotado representa uma **análise dos modos de falha por vazamento e por ruptura como fenômenos independentes**.

**OPIS** – O aplicativo calcula, para cada defeito isolado, a probabilidade de vazamento (POL), a probabilidade de ruptura (POR) e a probabilidade de falha (POF). A probabilidade de vazamento é calculada pela probabilidade que um dado defeito tem de apresentar um valor na sua profundidade maior que um valor estabelecido pelo usuário no momento da análise. Por sua vez, a probabilidade de ruptura é obtida pelo cálculo da probabilidade que

o defeito tem de apresentar um valor de pressão de ruptura inferior a uma pressão de referência informada durante a análise. A probabilidade de falha assume o maior valor entre as probabilidades de vazamento e de ruptura. Essa característica do programa está associada a uma **análise dos modos de falha por vazamento e por ruptura como fenômenos associados**.

A partir da avaliação de um defeito isolado, apresentada nas seções 5.3.1, 5.3.2 e 5.3.3, foi possível observar as particularidades associadas aos programas OPIS e CONFIABILIDADE, no cálculo da probabilidade de falha. As particularidades de cada programa foram projetadas nos resultados das análises da probabilidade de vazamento e de ruptura na condição futura, sendo a causa das diferenças atribuída aos diferentes modelos utilizados por cada aplicativo no cálculo da variância das dimensões do defeito na condição futura.

### 7.3.

#### **Quanto à influência do modelo de crescimento do defeito na integridade futura**

Foi possível observar que os diferentes modelos de crescimento do defeito representam sensíveis diferenças nos resultados da previsão da pressão de falha e da probabilidade de falha.

Na avaliação do defeito hipotético isolado, verificou-se para a condição futura uma diferença de aproximadamente 9% entre os valores médios das pressões de falha apresentadas analiticamente para os diferentes modelos de crescimento de defeito, sendo que no primeiro modelo o crescimento do defeito é assumido acontecer apenas na profundidade, quando que no segundo modelo o crescimento do defeito ocorre na profundidade e no comprimento, seguindo uma proporcionalidade das taxas de corrosão em função da classificação geométrica do defeito.

Além disso, foi possível verificar a influência dos diferentes modelos de crescimento do defeito sobre a probabilidade de ruptura, e conseqüentemente sobre a probabilidade de falha, observando-se uma sensível diferença entre os resultados de probabilidade de ruptura obtidos analiticamente para os diferentes modelos de crescimento de defeito.

Essa análise sugere a adoção de modelos tridimensionais de crescimento de defeito, de forma a obter previsões mais representativas e seguras da pressão de falha e da probabilidade de falha na condição futura.

#### **7.4.**

#### **Quanto à influência do modelo de interação de defeitos**

Pela observação dos resultados apresentados pelo programa OPIS no cálculo da pressão de falha, foi possível verificar a importância da consideração do modelo de interação de defeitos. A avaliação dos resultados obtidos pela análise do Duto 3 mostrou que as diferenças apresentadas, entre a avaliação de defeitos de forma isolada e a avaliação segundo o modelo de interação, podem chegar a 100% nos resultados de pressão de falha.

Essa análise sugere que o uso da interação de defeitos na avaliação de dutos corroídos deve estar disponível em programas de avaliação da integridade, ficando a sua utilização a critério do responsável pela análise.

#### **7.5.**

#### **Quanto à forma de aquisição de dados**

Foi possível verificar que a forma de aquisição dos dados necessários para as análises da integridade são de grande relevância para a atratividade dos programas. O *Pipeline Operators' Forum* em seu trabalho *Specifications and requirements for intelligent pig inspection of pipelines* [26] propõe a padronização dos formulários utilizados na atividade de inspeção de dutos por PIG Instrumentado, o qual tem sido largamente utilizado pelos operadores que compõem o fórum. Dessa forma, é desejável que os programas disponíveis para a avaliação da integridade de dutos de aço estejam alinhados com as melhores práticas do mercado no que se refere à formatação da aquisição dos dados necessários.

#### **7.6.**

#### **Quanto à precisão associada aos dados manipulados e gerados pelos programas**

No desenvolvimento do trabalho, foi possível verificar em alguns pontos que o tipo de variável associada aos dados gerados promoveu certos inconvenientes quanto ao

tratamento dos resultados. Além disso, verificou-se também que erros sistêmicos se fizeram presentes, fato este que pode ser atribuído a operações numéricas com variáveis de diferentes precisões. Dessa forma, é recomendável que todas as variáveis manipuladas e geradas pelos programas destinados à avaliação da integridade de dutos tenham a sensibilidade adequada ao resultado esperado.

### **7.7.**

#### **Quanto ao modelo analítico desenvolvido para o cálculo da probabilidade de falha imediata e futura**

Comprovou-se através das diversas análises que o modelo analítico desenvolvido para o cálculo da probabilidade de falha imediata e futura, considerando distribuição normal para todas as variáveis aleatórias, se mostrou confiável e robusto na avaliação de defeitos de corrosão com profundidade até 85% da espessura de parede nominal. Além disso, a metodologia se apresenta aos profissionais da área de integridade como sendo de fácil utilização em planilhas eletrônicas, tornando-se uma ferramenta confiável e de baixo custo na avaliação da integridade imediata e futura de dutos, com enfoque na confiabilidade.

### **7.8.**

#### **Sugestões de trabalhos futuros**

O trabalho desenvolvido deu enfoque ao mecanismo de falha por corrosão. É conhecido que em dutos submarinos outros mecanismos de falha se fazem presentes, como fadiga de baixo e longo ciclo. Recomenda-se como trabalho futuro a avaliação do mecanismo de corrosão associado a outros mecanismos de falha.

O presente trabalho identificou que o cálculo da probabilidade de falha pode ser abordado por diferentes modelos, onde os modos de falha por vazamento e por ruptura podem ser avaliados como fenômenos independentes ou dependentes. Recomenda-se como trabalho futuro a avaliação experimental dos dois modelos identificados, no sentido de conhecer qual a filosofia de cálculo da probabilidade de falha mais se aproxima da realidade.