

1

Introdução

Os dutos são um meio de transporte seguro e confiável de hidrocarbonetos e outros fluidos utilizados nas indústrias do petróleo, petroquímica, na geração de energia e distribuição de água.

A cadeia produtiva da indústria do petróleo se inicia com a retirada dos fluidos do reservatório. O petróleo é transportado por oleodutos ou navios dos campos de produção para os Terminais e destes por oleodutos até as refinarias. Após o refino, uma parcela dos derivados é novamente transportada pelos dutos até os Terminais para serem entregues às companhias distribuidoras que vão abastecer o mercado.

O gás é normalmente transportado por gasodutos desde o reservatório até o consumidor final. A TRANSPETRO entrega diariamente 35 milhões m³ /dia de gás aos distribuidores que abastecem mais de um milhão de residências, 17 mil pontos comerciais, mil indústrias, mais de mil postos de gás natural veicular e 12 termelétricas.

A área de Dutos e Terminais da TRANSPETRO conta com 7.011 quilômetros de oleodutos, 3.043 quilômetros de gasodutos, totalizando 10.054 km de dutos operados para o transporte de petróleo e seus derivados, etanol e gás natural. Em 2005 transportou 640 milhões m³ através de Dutos e Terminais [1].

O segmento de Exploração e Produção (E&P), responsável pela auto-suficiência brasileira na produção de petróleo, possui uma malha com 6480 km de dutos rígidos, sendo deste total 2550 km de dutos submarinosⁱ.

Durante sua permanência em operação, os dutos estão sujeitos a desenvolver defeitos que podem afetar a sua integridade. A redução de espessura de parede causada por corrosão é um dos defeitos que mais afetam a integridade dos dutos, tanto terrestres quanto submarinos.

Para se evitar acidentes, as linhas devem ser inspecionadas periodicamente. Após as inspeções deve ser avaliada a resistência remanescente dos trechos nos quais foi detectada corrosão. Com base nos resultados desta é tomada a

ⁱ Estes dados foram obtidos diretamente junto a PETROBRAS/E&P.

decisão de se realizar reparos imediatamente, manter o duto em operação no estado em que se encontra, ou mesmo de se limitar a pressão máxima de operação. Esta avaliação passou a ser uma disciplina de destaque, com a evolução das leis que protegem o meio ambiente e o envelhecimento das linhas de transporte de hidrocarbonetos em todo o mundo.

A corrosão em um duto pode se localizar no metal base, nas soldas longitudinais, nas soldas circunferenciais ou nas zonas afetadas pelo calor dos processos de soldagem. As transformações metalúrgicas, a alteração da configuração geométrica e os esforços termo-mecânicos que ocorrem na fabricação da junta soldada são aspectos que introduzem dificuldades na previsão da resistência de tubos que tenham defeitos de corrosão coincidentes com as regiões das soldas.

A maioria dos métodos semi-empíricos de avaliação da resistência remanescente introduz ressalvas ou proíbe sua utilização na condição em que estes defeitos coincidam com as juntas soldadas.

No presente trabalho foram ensaiados tubos fabricados na década de 60 retirados de operação após uma campanha superior a 30 anos. Com estes tubos foram fabricados espécimes com defeitos externos produzidos por eletro-erosão coincidentes com a solda longitudinal. Estes espécimes foram posteriormente submetidos a testes de ruptura pela ação única da pressão interna. Paralelamente foram obtidas, através de ensaios mecânicos, diversas propriedades mecânicas do metal base e das juntas soldadas para comparação com dados da literatura e auxílio na interpretação dos resultados.

Procurou-se desta forma avaliar o nível de segurança dos métodos semi-empíricos usuais para a condição onde defeitos volumétricos se posicionem coincidentemente com a solda longitudinal.

1.1.

Evolução dos Métodos de Avaliação de Integridade de Dutos na Presença de Defeitos de Corrosão

Os pigs instrumentados são ferramentas usuais para se inspecionar dutos, detectar e dimensionar defeitos de corrosão. Destas inspeções normalmente resultam relatórios detalhados, eventualmente com uma lista extensa de defeitos. Por isso, é necessário dispor de um método simples e confiável para

fazer a avaliação destes defeitos.

O Método dos Elementos Finitos (MEF) é um método numérico que pode ser usado para fazer a análise local da resistência de dutos com defeitos de qualquer geometria e submetidos a qualquer tipo de carregamento. Porém, o MEF tem a desvantagem de exigir pessoal muito especializado para sua aplicação e gastar muito tempo na realização de cada análise, o que inviabiliza a sua aplicação na avaliação de uma grande quantidade de defeitos. Os métodos semi-empíricos são os mais indicados para fazer a avaliação de uma grande quantidade de defeitos.

Por causa das características do processo corrosivo, o comprimento (L) e a largura (w) do defeito são em geral maiores que a profundidade (d). Por este motivo, os métodos semi-empíricos e analíticos desenvolvidos para avaliação de defeitos causados por corrosão se aplicam apenas a defeitos cujas dimensões longitudinais e circunferenciais são maiores ou iguais à profundidade do defeito. Estes métodos não podem ser aplicados na avaliação de defeitos planares, cujo comportamento é mais adequadamente representado por métodos baseados na Teoria da Mecânica da Fratura.

A maioria dos métodos existentes tem o mesmo ponto de partida: a “*NG-18 Surface Flaw Equation*” [2]. Esta equação foi concebida no início da década de 70 no Laboratório Battelle, usando conceitos da Mecânica da Fratura e resultados de ensaios experimentais.

O método ASME B31G [3] foi desenvolvido por Kiefner e Duffy a partir da “*NG-18 Surface Flaw Equation*”. Durante alguns anos este método satisfaz as necessidades das operadoras de dutos. Ainda na década de 80, foi constatado que o B31G [3] fornecia resultados excessivamente conservadores para alguns tipos de defeitos encontrados na prática. Em função desta constatação Kiefner e Vieth realizaram um trabalho de pesquisa, encomendado pela AGA (American Gas Association) ao Battelle, que tinha como objetivo introduzir modificações no B31G [3] para torná-lo menos conservador. Deste trabalho, concluído em 1989, resultaram dois novos métodos.

Um dos métodos, denominado de *Effective Area*, utiliza um processo iterativo para determinar a área de material perdido. O outro, denominado de 085dL ou B31G modificado, considera que a área de material perdido é igual a 0.85dL, sendo (d) a profundidade máxima do defeito e (L) seu comprimento. Para facilitar a aplicação destes métodos foi implementado um programa computacional para microcomputador, o RSTRENG.

A partir do início da década de 90, a atividade de pesquisa na área de avaliação estrutural de dutos corroídos tem sido intensa em todo o mundo. O aumento desta atividade é decorrente do rigor crescente das leis que protegem o meio ambiente, da falta de atualização das normas (ASME B31G e outras) e da necessidade de reduzir o custo de operação e manutenção das redes dutoviárias.

Na década de 90, foram realizados inúmeros projetos de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) por universidades, institutos de pesquisa, operadoras de dutos e companhias de petróleo. Dentre os projetos internacionais realizados na década de 90 podem ser citados, pelo seu porte e pela credibilidade das instituições líderes, os projetos conduzidos pela *BG Technology* e pela DNV.

A *BG Technology* conduziu um grupo de projeto patrocinado por sete companhias para estudar defeitos isolados, interação entre defeitos e defeitos de geometria complexa. Neste projeto foram realizados 36 testes de ruptura de tubos com defeitos fabricados e centenas de análises por elementos finitos. Este projeto foi encerrado em 1997.

O *Joint Industry Project* (JIP) conduzido pela DNV teve como objetivo gerar equações empíricas com coeficientes e fatores de segurança calibrados por meio de métodos de confiabilidade estrutural. No projeto foram realizados 12 testes de ruptura de tubos com defeitos fabricados e duzentas análises por elementos finitos. Foram estudados defeitos longitudinais e circunferenciais e carregamentos combinados. Este JIP encerrou-se em 1997 e foi patrocinado por cinco companhias, dentre as quais a PETROBRAS.

Após a conclusão dos seus respectivos projetos, a *BG Technology* e a DNV realizaram um terceiro projeto para mesclar os resultados dos seus projetos originais e desenvolver um procedimento único para avaliação de dutos corroídos. Em 1999 este procedimento foi publicado como a DNV *Recommended Practice* RP-F101 [4].

O *Pipeline Research Council* (PRC) da AGA por sua vez patrocina desde o final da década de 80, praticamente sem interrupção, os projetos de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) realizados pelo Laboratório Battelle, na área de avaliação estrutural de dutos corroídos.

Apesar de todo o conhecimento acumulado ao longo da década de 90, até hoje o método ASME B31G [3] continua sendo muito usado em todo o mundo. Os métodos 085dL e *Effective Area* não chegaram a ter sua aplicação extensamente disseminada.

1.2.

Evolução dos Métodos de Avaliação de Integridade de Dutos na Presença de Defeitos de Corrosão na PETROBRAS e na PUC-RIO

A inspeção de dutos através de pigs instrumentados na PETROBRAS teve início na década de 80 nos dutos terrestres do segmento *downstream* (ABASTECIMENTO). O primeiro duto submarino do segmento *upstream* (Exploração e Produção) foi inspecionado em 1997 na Bacia de Campos.

Nas campanhas iniciais de inspeção de dutos do segmento E&P da PETROBRAS foi encomendada ao CENPES (Centro de Pesquisas da PETROBRAS) uma revisão da literatura acerca dos métodos de avaliação de integridade de dutos. Nesta revisão foram identificadas diversas limitações no uso dos métodos, bem como uma carência de ensaios de validação das equações destes métodos. Neste cenário foram empreendidos diversos projetos de verificação e correção destes métodos.

No atendimento a esta e outras demandas similares, tem sido construído um banco de dados contendo resultados de testes em dutos em escala real ou reduzida pelo Grupo de Integridade da PUC-RIO. Estes testes têm sido executados com a colaboração ou financiamento da PETROBRAS e de outras empresas. O banco de dados tem como objetivo acrescentar resultados à biblioteca de resultados de ensaios e a validar soluções e produtos; [5].

Alguns dos objetivos perseguidos em mais de 90 testes de pressão executados foram os seguintes:

- Verificar a precisão dos métodos em prever pressões de operação seguras, bem como avaliar os fatores de segurança inerentes a estes métodos;
- Aumentar o entendimento sobre a correlação entre variação da pressão do teste hidrostático com os resultados das tensões e deformações de pontos localizados no interior dos defeitos;
- Aumentar o entendimento de como as diversas camadas dos materiais compósitos de reparo de dutos contribuem para suportar a pressão interna;
- Validar os diversos modelos de elementos finitos construídos para simular as geometrias mais complexas de defeitos de corrosão.

Da experiência adquirida nestes projetos foi possível estabelecer alguns parâmetros ou procedimentos experimentais que foram adotados no presente trabalho.

1.3.

Motivação do tema da dissertação

Foram observados muitos aprimoramentos, tanto em âmbito mundial como nos projetos desenvolvidos pela PETROBRAS e pela PUC-RIO, nos métodos de avaliação da resistência de dutos com defeitos de corrosão localizados no corpo (ou metal base) dos tubos. Entretanto, poucos trabalhos tratam da aplicabilidade de métodos para a situação em que a corrosão coincida ou englobe as soldas longitudinais ou circunferenciais dos tubos.

Via de regra, os métodos tem sua aplicação permitida apenas a defeitos no metal base. O que se pretende evitar com esta restrição é a situação em que a falha seja controlada por deficiência de tenacidadeⁱⁱ. Isto é bastante evidente na medida que tanto as premissas de projeto, quanto as equações empíricas dos métodos limitam as tensões atuantes nos defeitos tendo como parâmetros o limite de escoamento ou ao limite de resistência à tração.

Os métodos usuais são, portanto destinados a tratar defeitosⁱⁱⁱ em regiões afastadas das soldas, onde a tenacidade for considerada “adequada” e em áreas livres de defeitos planares ou restrições a deformações plásticas. Outras razões plausíveis para que se tenha especificamente proibido a aplicação dos métodos nestes locais são as seguintes:

- A possibilidade da pré-existência de defeitos decorrentes da fabricação da

ⁱⁱ O modo de falha associado à deficiência de tenacidade pode também ser denominado de “falha por fratura” que significa rompimento frágil e repentino com pouquíssima ou nenhuma deformação plástica.

ⁱⁱⁱ O termo “tratar defeitos” se refere ao cálculo da resistência remanescente do duto contabilizando-se a presença de defeitos volumétricos de corrosão.

junta soldada localizados no cordão de solda ou na zona termicamente afetada (ZTA);

- A existência de elevadas tensões residuais de soldagem nestas regiões;
- A possibilidade de existência de diferenças significativas de comportamento mecânico entre as regiões do cordão de solda, da ZTA e do metal base que compõem a junta soldada.

A coincidência de defeitos de corrosão com as soldas longitudinais e transversais é uma ocorrência comum observada na atividade de inspeção de dutos. Mais ainda, existe uma dificuldade de diferenciação entre o corpo do tubo (metal base) e as soldas longitudinais através da técnica de inspeção de dutos mais usual que é o pig magnético de fluxo longitudinal.

1.4.

Apresentação dos próximos capítulos desta Dissertação

Capítulo 2 – Revisão da Literatura

Neste capítulo são apresentados aspectos relacionados à corrosão de dutos. É demonstrada a real possibilidade de se ter perdas por corrosão coincidentes com a solda longitudinal. São também revistas as características metalúrgicas dos aços utilizados na fabricação dos tubos. São revistas as principais características dos processos de fabricação SAW, ERW e sem costura (*seamless*).

As formas de avaliação da tenacidade da junta soldada é também outro ponto discutido, assim como alguns aspectos que influenciam na tenacidade tais como a espessura da junta soldada, tensões residuais e geometria do defeito associados a restrições impostas pela região da solda.

Capítulo 3 – Procedimento Experimental

Neste capítulo é pesquisada a origem dos tubos dos quais foram retirados as amostras e os espécimes tubulares utilizados nos experimentos. Também são detalhados os procedimentos de execução dos ensaios de qualificação do material. São apresentados em detalhes as dimensões dos defeitos fabricados

por eletro-erosão e descrita a metodologia de execução dos testes de ruptura.

Capítulo 4 – Resultados Obtidos nos Ensaios

Neste capítulo são apresentados e comentados, com base na pesquisa bibliográfica, os resultados obtidos nos ensaios de qualificação do material e dos testes de ruptura dos espécimes tubulares com os defeitos fabricados.

Capítulo 5 – Discussão dos Resultados dos Testes de Ruptura

Neste capítulo é feita uma análise de falha mais aprofundada buscando se identificar as possíveis causas de alguns resultados atípicos obtidos nos Testes de Ruptura.

É descrita uma metodologia estabelecida visando contabilizar a influência de alvéolos internos detectados após o corte dos espécimes tubulares ensaiados. É feita a comparação com um caso da literatura de avaliação da resistência de um tubo antigo com defeitos usinados englobando a solda longitudinal. É descrita a análise dos locais das falhas feita com auxílio de microscópio ótico e eletrônico. Por último é apresentada uma simulação pelo método dos elementos finitos comprovando a intensificação de tensões na região dos alvéolos internos de corrosão.

APÊNDICES –

Cinco APÊNDICES são apresentados para complementar alguns tópicos da dissertação.

O APÊNDICE A apresenta a íntegra dos resultados dos ensaios de tração.

O APÊNDICE B apresenta a metodologia dos cálculos pelo método da API 579.

O APÊNDICE C apresenta os croquis e fotos dos alvéolos internos de corrosão, detectados após os testes de pressão, com o corte dos espécimes tubulares nos locais das falhas.

O APÊNDICE D mostra as telas dos programas dos métodos de nível 2 do RSTRENG e da DNV geometria complexa desenvolvidos para automatizar as suas aplicações.

O APÊNDICE E apresenta uma análise das superfícies de fratura dos

corpos-de-prova (CPs) dos ensaios de impacto executada com auxílio do MEV.

O APÊNDICE F apresenta uma análise fractográfica da fratura ocorrida no ET 14 executada com auxílio do MEV.

O APÊNDICE G apresenta as equações dos métodos de avaliação da resistência remanescente de dutos corroídos utilizados na dissertação.

O APÊNDICE H apresenta uma análise por elementos finitos das tensões atuantes na região dos defeitos retangulares.