

1 Introdução

Em todo mundo a existência de uma malha dutoviária eficiente para o transporte e distribuição de hidrocarbonetos requer mecanismos de controle para a segurança da sua operação. Essas tubulações podem sofrer processos degenerativos estruturais provocados pela ação de corrosão, fadiga, impactos, defeitos de fabricação e etc. O petróleo retirado dos campos de produção durante a elevação e escoamento é transportado para as refinarias ou estações de tratamento, esse fluido encontra-se muitas vezes em condições químicas e termodinâmicas danosas para integridade estrutural do duto [1]. Essas condições geram defeitos por corrosão interna, como pites (corrosão puntiforme) e alvéolos na parede da tubulação, e colocam a operação do duto em risco.

A detecção, localização e dimensionamento de defeitos provocados pela corrosão interna praticamente não são realizadas por inspeção visual em dutos. Atualmente o pig instrumentado, dentre diferentes tipos de técnicas de detecção de defeitos originados pela corrosão interna, é o mais usado no mundo. O pig instrumentado basicamente é um equipamento capaz de navegar junto com o fluido transportado. Ele é dotado de sensores ao longo do seu corpo que realizam a inspeção do duto. As técnicas básicas de medição utilizadas pelos pigs instrumentados são: ultrassônica, magnética e geométrica. Essas tecnologias possuem vantagens, desvantagens e limitações diversas que dependem das características do duto e do tipo de defeito esperado na inspeção [2]. As tecnologias utilizadas pelos pigs magnéticos, ultrassônicos e geométricos serão apresentadas nos tópicos seguintes.

Nas décadas de 80 e 90 no Brasil, os dutos *onshore* tiveram investimentos significativos para adaptação a inspeções com pigs instrumentados. Dentre algumas adaptações para viabilizar a “pigabilidade” do duto pode-se citar: retirada de curvas de pequeno raio, instalação de lançadores e recebedores, uniformização de diâmetro, alteração de derivações e retirada de obstáculos a passagem de pigs instrumentados. A definição básica de “pigabilidade” resume a capacidade do duto

na passagem de pigs [3]. Alguns dutos *offshore* receberam o mesmo tratamento, mas estas adaptações não se estenderam a toda a malha, em função de dificuldades tecnológicas e alto valor dos investimentos. Todavia as próximas décadas da indústria petrolífera provavelmente exigirão o aumento da produção de petróleo devido ao consumo mundial, e profundidades de extração de petróleo *offshore* cada vez maiores serão atingidas. Estes dutos de produção, por razões estruturais de projeto *offshore*, terão aumento de espessura de parede e redução de diâmetro.

A implicação deste aumento de espessura aliada ao pequeno diâmetro do duto reduz a capacidade de medição dos Pigs Magnéticos M.F.L. (*Magnetic Flux Leakage*). Esses pigs apresentam redução de “sensibilidade” de medição para tubulações de parede espessas, ou maiores que uma polegada, que piora ainda mais quando o diâmetro do duto espesso é menor que 14 polegadas. A combinação desses dois fatores limita a capacidade de magnetização do pig, pois o volume interno dentro do duto restringe a quantidade de magnetos presos ao corpo do pig. Outra técnica utilizada na medição de corrosão interna é a emissão de ondas acústicas do Pig Ultrassônico convencional, mas a necessidade do fluido homogêneo interfere na qualidade da medida do equipamento. Esta ferramenta precisa de um líquido “acoplante” com boa propriedade acústica para propagação das ondas acústicas emitidas pelos sensores, portanto o “petróleo vivo” composto por óleo, gás e água, limita o uso dessa técnica. Este “petróleo vivo” é normalmente encontrado em dutos *offshore*. Na inspeção de gasodutos a solução encontrada é introduzir um “colchão de diesel”, um procedimento complexo que pode impossibilitar a realização deste tipo de operação no campo.

Outro aspecto relevante na inspeção *offshore* com pigs instrumentados é que sua principal causa de deterioração deve-se a corrosão interna, geralmente na geratriz inferior, que ocorre devido à presença de água produzida juntamente com o óleo. A corrosão externa é facilmente evitada pela proteção catódica, e avarias externas são identificadas na maioria das vezes através da inspeção visual por *R.O.V. (Remotely Operated Vehicle)*. Considera-se, então que o grande foco da inspeção de dutos *offshore* de produção de petróleo é a detecção e quantificação da corrosão interna e, em menor grau, de defeitos externos relacionados à ação de terceiros.

O Pig Palito é uma inovação tecnológica pioneira na área de pigs instrumentados para a medição de defeitos geométricos oriundos de corrosão interna no duto [4]. Os sensores palito realizam uma medição direta por apalpamento da superfície interna do duto, portanto não há limite de espessura de parede do duto e seu emprego independe do fluido transportado. Apesar de usar uma técnica de medição geométrica, os apalpadores do Pig Palito utilizam transdutores de efeito *Hall*. Estes apalpadores, ou sensores geométricos, são pré-programados e configurados de acordo com as especificações do duto, tais como parâmetros de espessura e diâmetro interno, e portanto apresentam qualidade diferenciada de pigs geométricos convencionais. A eficácia da ferramenta na quantificação da corrosão interna foi verificada em testes e inspeções de campo [5, 6, 7].

Além das inspeções campo realizadas em dutos *onshore* e *offshore*, o Pig Palito obteve bom resultado nas inspeções de tubulações de refinarias, como dutos de forno. O desenvolvimento do Pig Cobra Palito que usa a tecnologia convencional do Pig Palito [6], porém montado em estrutura flexível de poliuretano, permite a inspeção de dutos com raios de curvaturas acentuados e altas restrições geométricas à passagem de pigs instrumentados convencionais. As condições de limpeza do duto para inspeção com o Pig Palito são semelhantes às praticadas com pigs instrumentados convencionais. Em geral, uma rotina de limpeza de duto é empregada com o uso de tipos variados de pig de limpeza para remoção de diferentes tipos de detritos e parafina do interior do duto.

A presente dissertação apresenta a análise e o estudo da tecnologia utilizada pelo Pig Palito, que além de mostrar resultados de campo e alguns detalhes de projeto do equipamento, concentra-se na caracterização e análise da técnica de medição de corrosão interna pelo sensor palito. Este trabalho está dividido sistematicamente em seis capítulos com vários tópicos. Nesse primeiro capítulo, o foco é o contexto, a história e a aplicação deste tipo de tecnologia de controle e inspeção em dutos. O segundo capítulo procura explicar conceitos de sistemas de medição e monitoração de corrosão interna, mostrar equipamentos utilizados no controle e determinação de corrosão interna em dutos, e ainda introduz conhecimentos básicos dos tipos de corrosões normalmente encontradas em dutos de petróleo. O terceiro capítulo demonstra o princípio de funcionamento do sistema de medição do Pig Palito, o processo de calibração da ferramenta e

detalhes relevantes de medição do transdutor de efeito *Hall* usado no sensor palito, assim, como a motivação para o desenvolvimento deste novo pig instrumentado. No quarto capítulo, os resultados experimentais de análise de medição, vibração e simulação são demonstrados após o detalhamento conceitual das limitações técnicas do sistema de medição. Um provável método de detecção de anomalia baseado num erro de interpretação de medida gerado pelo sensor palito é demonstrado neste capítulo. Os resultados de inspeções de campo com Pigs Palito são também apresentados nesse capítulo. Finalmente, o Capítulo 5 apresenta a conclusão, perspectivas futuras e considerações finais desta dissertação.