

JOÃO MARCOS SABINO

**AVALIAÇÃO POR PIG DE PERFILAGEM DE DANOS SUPERFICIAIS NOS
MATERIAIS DAS PAREDES DE DUTOS DE PETRÓLEO**

Natal
2009

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

JOÃO MARCOS SABINO

**AVALIAÇÃO POR PIG DE PERFILAGEM DE DANOS SUPERFICIAIS NOS
MATERIAIS DAS PAREDES DE DUTOS DE PETRÓLEO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Norte para obtenção do título de Mestre em Engenharia

Área de Concentração:
Tecnologia de Materiais

Orientadores: Prof. Dr. João Bosco da Silva; Prof. Dr. João Telésforo Nóbrega de Medeiros

Natal
2009

Divisão de Serviços Técnicos

Catálogo da Publicação na Fonte. UFRN / Biblioteca Central Zila Mamede

Sabino, João Marcos.

Avaliação por pig de perfilagem de danos superficiais nos materiais das paredes de dutos de petróleo / João Marcos Sabino. – Natal, RN, 2009.
65 f.

Orientador: João Bosco da Silva.

Co-orientador: João Telésforo Nóbrega de Medeiros.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

1. Inspeção de duto – Dissertação. 2. Pig de inspeção – Dissertação. 3. Avaliação da integridade estrutural – Dissertação. 4. Avaliação de dano – Dissertação. I. Silva, João Bosco da. II. Medeiros, João Telésforo de. III. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. IV. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 620.19

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos colegas com os quais compartilho conhecimento e trabalho para assegurar a integridade de dutos.

AGRADECIMENTOS

À Deus, por me possibilitar esta realização;

À minha família, pelo apoio e pela compreensão por faltas motivadas por este trabalho;

Aos amigos, pelo apoio e pela compreensão por ausências e distanciamentos motivados por este trabalho;

À Petrobras, que aqui represento na pessoa do seu gerente Roberto Lúcio, pelo incentivo e oportunidade de aprender estudando e vivenciando experiências;

Ao Cláudio Camerini, pelo estímulo e apoio espontâneos, principalmente quando mais precisei;

A Erivan Eloi, Ivan Janvrot, José Augusto, Karina e Ossian Caldas pelos conhecimentos e trabalhos que compartilhamos, bem como pelo apoio;

Aos Professores João Bosco da Silva e João Telésforo de Medeiros, pelo apoio, estímulo, orientações e compreensão por eventuais faltas;

Aos membros da banca examinadora, pela boa vontade em aceitar o convite;

E a todos os que ajudaram diretamente ou indiretamente na realização deste trabalho.

RESUMO

A moderna tecnologia de materiais e de integridade estrutural de dutos pressupõe o uso de ferramentas de inspeção denominadas pigs de inspeção para detectar, localizar e medir comprimento, largura e profundidade das perdas de espessura de parede de dutos em serviço enterrados ou submersos. Essas ferramentas os percorrem internamente, realizando e registrando medições, com desempenho que varia de acordo com a tecnologia do pig. Recentemente foi desenvolvida uma tecnologia de pig de inspeção, chamada de pig de perfilagem. O objetivo desta pesquisa é indicar fatores que influenciam o desempenho da tecnologia de pig de perfilagem na detecção e na exatidão de medição de comprimento, largura e profundidade de perdas de espessura na superfície interna da parede de um oleoduto, em condições normais de inspeção de oleodutos com pig. Neste trabalho, faz-se um levantamento de tais fatores e uma análise desta tecnologia, baseados na literatura disponível, bem como um experimento para observar a tecnologia e fatores operando. No experimento, utiliza-se um pig de perfilagem em um duto construído em aço carbono e em operação escoando petróleo, no qual se constata áreas com perdas de espessura internas ocorridas naturalmente. Algumas destas áreas e suas dimensões, medidas por varredura de ultra-som automatizado, são comparadas com as indicadas pelo pig de perfilagem. Com base no levantamento, na análise e no experimento, discute-se a influência de fatores objetos desta pesquisa. Conclui-se que, entre estes, ocorrem fatores relacionados à tolerância de fabricação dos tubos, ao desgaste de componentes do pig, ao desgaste adesivo interno ao duto, a outros danos no duto e a características da tecnologia. Por fim, são sugeridas ações para conhecer melhor, aprimorar e delimitar a aplicabilidade desta tecnologia.

Palavras-chave: Inspeção de Duto; Pig de Inspeção; Avaliação da Integridade Estrutural; Avaliação de Dano.

ABSTRACT

The modern technology of materials and structural integrity of pipelines requests the use of inspection tools named inspection pigs to detect, localize and measure the length, width and depth dimensions of the thickness losses of walls of buried and underwater pipelines in service. These tools run them internally, performing and recording measurements, with performance that varies according to the pig's technology. It has been developed recently an instrumented pig technology, called feller pig. This work aims to indicate factors that influence the feller pig technology performance in the detection and in the accuracy of measurement of the length, width and depth dimensions of the thickness losses on the internal surface of an oil pipeline wall under normal conditions of oil pipe inspection with pig. In this work, is made a collection of factors and an analyses of the technology based on the available literature, as well as an experiment to observe the technology and the factors operating. In the experiment, a feeler pig is used in a pipeline built in carbon steel and in operation that flows petroleum, in witch are observed areas with internal thickness losses occurred naturally. Some of these areas and their dimensions taken by automated ultra-sound scanner are compared with the ones indicated by the feller pig. Based on the data collection, on the analysis and on the experiment, the influence of factors object of this research is discussed. It is concluded that, among these, there are factors related to pipe fabrication tolerances, to wear of pig components, to internal adhesive wear of pipeline, to other pipeline damages and to technology characteristics. Finally, actions are suggested to know better, improve and define the applicability of this technology.

Key-words: Pipeline Inspection; Inspection Pig; Structural Integrity Evaluation; Damage Evaluation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Funcionamento dos sensores de pig de perfilagem	16
Figura 2 - Fotografia de sensores de pig de perfilagem	16
Figura 3 - Visão frontal de pig de perfilagem	17
Figura 4 - Visão da montagem dos sensores no pig	18
Figura 5 - Pig de perfilagem para duto de diâmetro de 16 polegadas	18
Figura 6 - Modo de medição de pig de perfilagem	19
Figura 7 – Representação gráfica de linhas indicativas da profundidade	21
Figura 8 - Representação gráfica colorida indicativa das anomalias	22
Figura 9 - Definição das dimensões comprimento e largura	25
Figura 10 - Mapa de classificação das áreas de perda de espessura	25
Figura 11 – Definição de limiar de medição	34
Figura 12 - Gráfico de velocidade do pig de perfilagem no experimento	37
Figura 13 - Foto do equipamento de varredura por ultra-som	39
Figura 14 – Representação gráfica da varredura por ultra-som	40
Figura 15 – <i>Overshoot</i> do pig de perfilagem	45
Figura 16 – Subdimensionamento devido contacto em outro ponto	46
Figura 17 - Mapa de aplicação da tecnologia de pig de perfilagem	47

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	8
1.1 Importância do conhecimento do desempenho do pig de perfilagem	10
1.2 Definição do objetivo da pesquisa	11
1.3 Apresentação dos próximos capítulos	13
2 REVISÃO DA LITERATURA	15
2.1 Definição e classificação de pigs instrumentados	15
2.2 Descrição da tecnologia de pig de perfilagem	16
2.2.1 Processamento dos dados para dimensionar a perda de espessura	20
2.2.2 Comparação com as aplicações das tecnologias convencionais	23
2.3 Classificação dimensional de áreas com perda de espessura	24
2.4 Avaliação estrutural de áreas com perda de espessura em dutos	26
2.5 Incertezas na avaliação da integridade de dutos	29
2.6 Fundamentação da verificação da exatidão de medição das dimensões	31
2.7 Outros parâmetros de desempenho da tecnologia	33
3 MATERIAIS E MÉTODOS	36
3.1 Desenvolvimento do experimento	36
3.1.1 Varreduras de ultra-som automatizadas	38
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
4.1 Susceptibilidades da tecnologia a fatores relacionados ao desempenho	42
4.2 Campo de aplicação da tecnologia a ser considerado	47
4.3 Resultados do experimento	48
4.4 Discussão dos resultados	51
5 CONCLUSÃO	54
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	55
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58
GLOSSÁRIO	62
APÊNDICE A – A EQUAÇÃO NG-18	65

1 INTRODUÇÃO

Dutos podem falhar por ação de um ou de uma combinação de mecanismos de falha de material. Alguns destes mecanismos levam a perdas de espessura de suas paredes, entre os quais estão corrosão, erosão e abrasão. Tais perdas de espessura em paredes ocorrem na superfície interna ou externa e, dependendo da magnitude destas, podem levar a vazamento ou a rompimento. Para evitar estes modos de falhas¹, dutos com perda de espessura de parede devem ter suas capacidades de contenção de fluido avaliadas. Estas avaliações são baseadas na espessura remanescente de parede ou em cálculos da pressão que pode levar à falha. A maioria dos métodos de avaliação disponíveis, que são os de aplicação mais simples, de menor custo e disseminada, necessita da profundidade, comprimento e largura das áreas de perda de espessura. Estes métodos são definidos como de primeiro nível nos procedimentos de avaliação em três níveis propostos por Chochaoui e Pick (1994) e amplamente usados.

Falhas em dutos de petróleo em operação têm geralmente conseqüências potencialmente graves. Para diminuir a probabilidade de ocorrência destas falhas, são inspecionados em operação periodicamente com as técnicas aplicáveis a cada duto. A maior parte deles é enterrada ou submersa, o que faz do uso de ferramentas de inspeção denominadas pigs instrumentados de inspeção de perda de espessura o modo mais eficiente e usual de detectar, localizar e medir as dimensões volumétricas das perdas de espessura de parede presentes neles. Estas ferramentas os percorrem internamente realizando e registrando medições que permitem dimensionar as perdas de espessura, com desempenho que varia de acordo com a tecnologia. Para as avaliações de integridade estrutural de dutos baseadas em indicações fornecidas por pigs instrumentados de perda de espessura é necessário se considerar, além das dimensões volumétricas das perdas de espessura indicadas, seu desempenho na medição destas dimensões (MAES; DANN; SALAMA, 2008).

¹ As notações de falhas nesta dissertação são baseadas na *International Standard Organization* (2006a).

Os pigs instrumentados comumente disponíveis² não conseguem detectar, localizar e medir dimensões de perdas de espessura em muitos dutos, devido a dificuldades relacionadas às características operacionais dos pigs, aos seus requisitos de condicionamento e geometria dos dutos ou, ainda, relacionadas ao formato das perdas de espessura predominantes. Entre as dificuldades mais comuns estão temperatura, velocidade e pressão no duto fora das faixas toleráveis pelo pig, graus de limpeza do duto e de homogeneidade do fluido requeridos pelo pig impossíveis de serem obtidos, grandes variações no diâmetro interno do duto, raio de curvatura de curvas muito acentuadas, acessórios e componentes com partes indevidamente intrusivas ao duto, câmaras de lançamento e de recebimento de pigs mais curtas que o necessário, superfície interna da parede com muita rugosidade ou muito irregular, paredes espessas ou com propriedades acústicas ruins etc³. Por isto, se procura desenvolver tecnologia de pigs instrumentados que superem as dificuldades.

Assim desenvolveu-se uma tecnologia de pig instrumentado de inspeção, chamada de pig de perfilagem, que é capaz de superar muitas das principais dificuldades e que tem capacidade de detectar, localizar, medir e registrar as áreas de perdas de espessura na superfície interna da parede. Esta tecnologia já foi testada e resultados da experimentação desta tecnologia foram apresentados por Camerini et al. (2005, 2008).

Considerando-se as características da tecnologia de pig de perfilagem, descritas no capítulo de revisão da literatura, é razoável supor, necessitando de comprovação experimental, um possível campo de aplicação desta tecnologia maior que os das tecnologias convencionais de pig para inspeção de perda de espessura na superfície interna do duto. A limitação desta tecnologia de inspeção à superfície interna torna-se menos relevante pelo fato de que na maioria dos dutos as perdas de espessura na superfície interna de parede de duto são as mais difíceis de serem detectadas e medidas com outras técnicas de inspeção que não por pig.

² São eles os pigs convencionais MFL - *Magnetic Flow Leakage* e de ultra-som. Para conhecer características destes pigs e das demais tecnologias de inspeção por pig ver *NACE International* (2000).

³ Considerações sobre características físicas e operacionais e limitações de pigs de inspeção convencionais, que definem os campos de aplicação das tecnologias, são apresentadas em detalhe em *NACE International* (2002).

Um próximo passo rumo à utilização desta tecnologia em larga escala é a avaliação de seu desempenho na detecção e na exatidão de medição das dimensões volumétricas das perdas de espessura. Esta dissertação apresenta fatores que influenciam este desempenho em um oleoduto em condições comuns de inspeção com pig e um experimento para verificá-los nestas condições, em um oleoduto com áreas de perdas de espessura ocorridas naturalmente na superfície interna da parede.

1.1 Importância do conhecimento do desempenho do pig de perfilagem

As inspeções com pigs de perda de espessura resultam em relatórios com uma lista de indicações de perda de espessura, cada qual com respectivas profundidade máxima, comprimento no sentido longitudinal, largura no sentido circunferencial e localização, que contempla a distância para soldas e outras referências ao longo do duto. As indicações são tanto de descontinuidades longitudinais, com comprimento maior que a largura, como de descontinuidades circunferenciais, com largura maior que o comprimento.

As indicações de perda de espessura necessitam de avaliação quanto à resistência do duto em suas presenças. Para avaliações baseadas unicamente na inspeção por pig é necessário se seguir métodos baseados em critérios para os quais sejam desnecessárias mais informações do que aquelas levantadas por este tipo de inspeção. Para descontinuidades longitudinais, tais métodos são definidos como de primeiro nível nos procedimentos de avaliação em três níveis propostos por Chochaoui e Pick (1994).

Existem métodos de avaliações mais precisas, entre os quais os métodos de segundo e terceiro níveis para descontinuidades longitudinais. Os métodos de avaliações mais precisas requerem dimensionamento detalhado das perdas de espessura de parede, são de aplicação mais trabalhosa e têm maior custo do que os métodos de primeiro nível, os quais são mais conservativos quanto à segurança. Assim, utilizam-se os métodos de avaliações mais precisas somente para as indicações de perda de espessura de parede avaliadas pelos métodos de primeiro nível como passíveis de levar o duto à falha.

Outros motivos para este procedimento referem-se à extensão da lista de indicações de perda de espessura na parede do duto e ao acesso a cada uma delas. A lista normalmente é extensa, requerendo automatização desta avaliação. Considerando tempo de processamento e por tratar-se de duto em operação, esta automatização é viável somente se for usado algum método para o qual sejam desnecessárias mais informações do que aquelas levantadas pela inspeção com pig. Além disto, o acesso a cada área para medi-la detalhadamente com outra técnica de inspeção para poder usar métodos de avaliação mais precisos é impraticável na maioria dos dutos, por ser submersa ou enterrada.

Tão importante quanto o conhecimento do desempenho do pig de perfilagem na exatidão de medição das dimensões volumétricas de áreas de perda de espessura é o conhecimento do seu desempenho na detecção dessas áreas. Como é difícil a detecção das perdas de espessura na maior parte dos dutos com outra técnica de inspeção que não por pig, é preciso considerar as indicações destas perdas pelo pig. Contudo, deve-se saber o quanto é possível confiar que todas as perdas de espessura presentes no duto sejam indicadas pelo pig, ou seja, é preciso conhecer a capacidade de detecção do pig de inspeção, que pode ser indicada como probabilidade de detecção.

Assim, considerando-se que a tecnologia de pig de perfilagem tem desempenho ainda pouco conhecido, convém verificar quais fatores podem influenciar este desempenho na detecção e na exatidão de medição das dimensões volumétricas de perdas de espessura na superfície interna da parede de um oleoduto em condições normais de inspeção de oleodutos com pig. Com isto é possível se considerar tais fatores junto com este desempenho no resultado final da avaliação da integridade estrutural.

1.2 Definição do objetivo da pesquisa

O objetivo da pesquisa é indicar fatores que influenciam o desempenho da tecnologia de pig de perfilagem na detecção e na exatidão de medição das

dimensões volumétricas de perdas de espessura na superfície interna da parede de um oleoduto em condições normais de inspeção de oleodutos com pig.

Alcançando-se o objetivo desta pesquisa, contribui-se para o conhecimento do desempenho desta tecnologia. Este conhecimento é necessário para diminuir as incertezas relacionadas aos resultados do uso da referida tecnologia e, assim, tornar mais seguras possíveis avaliações de integridade de dutos com perdas de espessura de parede na superfície interna medidas com pig de perfilagem.

Convém ressaltar que esta tecnologia de pig possibilita tanto a inspeção em dutos não inspecionáveis ou dificilmente inspecionáveis por outros pigs, bem como a medição de dimensões volumétricas de perda de espessura na superfície interna não dimensionáveis em inspeções por outros pigs.

Esta pesquisa é qualitativa e se restringe a fatores que influenciam o desempenho da tecnologia de pig de perfilagem na detecção e na exatidão de medição das dimensões volumétricas de perdas de espessura na superfície interna da parede de um oleoduto em condições normais de inspeção de oleodutos com pig. Seus resultados se aplicam apenas ao uso da tecnologia de pig de perfilagem em dutos com características e condições de inspeção semelhantes aos do objetivo da pesquisa.

Está fora do objetivo desta pesquisa: avaliar ou comparar custos de inspeção por pig; comparar o desempenho do pig de perfilagem com o desempenho de outras tecnologias de pig de inspeção; avaliar o desempenho da tecnologia; fazer estimativa que possa ser generalizada para algum parâmetro de desempenho da tecnologia; indicar fatores que influenciam outros parâmetros de desempenho da tecnologia que não os do objetivo indicado; considerar anomalias que não sejam perda de espessura na superfície interna da parede do duto; descrever mecanismos e modos de falhas em dutos e seus métodos de monitoração e prevenção; descrever métodos e tecnologias de inspeção de dutos além de pig de perfilagem; descrever os métodos de avaliação da integridade estrutural de dutos; descrever abordagens probabilísticas de avaliação da confiabilidade de dutos.

1.3 – Apresentação dos próximos capítulos

Após esta seção de Introdução, segue a seção de Revisão da Literatura. Ela inicia com definição e classificação de pigs instrumentados, para situar a tecnologia objeto desta dissertação entre as tecnologias de pig instrumentado. Após isto descreve a tecnologia de pig de perfilagem. Na seqüência a compara com tecnologias que executam a mesma função, quanto às possibilidades de aplicação.

Como o desempenho da tecnologia pode ser diferente para diferentes classes dimensionais, é apresentado um capítulo com uma classificação dimensional das perdas de metal para se ter como referência estas classes no desenvolvimento da dissertação. Em seguida é apresentado um capítulo que trata da avaliação da integridade estrutural de dutos com perda localizada de espessura de parede onde estão ausentes outros carregamentos significativos além da pressão interna, para com isto mostrar como as informações geradas por inspeção de pig de perfilagem são utilizadas nesta avaliação.

Tendo o pig de perfilagem incertezas de medição e os métodos de avaliação estrutural citados possuindo incertezas intrínsecas, no capítulo seguinte são apresentadas as incertezas na avaliação da integridade de dutos e citadas metodologias para tratá-las. Em capítulo seguinte são apresentados parâmetros relacionados às incertezas de medição das dimensões volumétricas de perda de espessura por pigs para se poder verificar a exatidão de medição das dimensões para pigs de perda de espessura conforme *American Petroleum Institute* (2005 p. 11).

Para encerrar a seção de Revisão da Literatura, são citados outros parâmetros de desempenho da tecnologia que, apesar de não serem objeto deste trabalho, são importantes.

A seção Materiais e Métodos descreve a metodologia adotada e faz uma descrição do experimento feito para observar fatores objeto da pesquisa em operação, com menção dos materiais e equipamentos utilizados no experimento.

A seção Resultados e Discussão apresenta um levantamento de fatores objeto da pesquisa, com base numa análise do experimento e da tecnologia descrita na literatura disponível. Com base no levantamento é delimitado um campo de aplicação hipotético, ao qual se limitam os resultados apresentados e a discussão.

A Conclusão indica fatores que influenciam o desempenho da tecnologia de pig de perfilagem na detecção e na exatidão da medição das dimensões volumétricas de perdas de espessura na superfície interna da parede de um oleoduto em condições normais de inspeção de oleodutos com pig.

Para finalizar são apresentadas sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Definição e classificação de pigs instrumentados

Pig é um dispositivo sólido, introduzido em tubulações e dutos, deslocado pela vazão do fluido. Pig instrumentado pode ser definido como um pig com instrumentos para exercer alguma função ou medição em um duto. Entre os pigs instrumentados existem pigs de inspeção e pigs utilitários. Os pigs de inspeção fornecem informações que podem subsidiar a avaliação da integridade de dutos. Os demais pigs instrumentados podem ser definidos como pigs utilitários, entre outros, pigs para medir e registrar temperatura, pressão ou aceleração, pigs para detectar vazamentos ou pigs para bloquear o fluxo.

A escolha para o uso de uma tecnologia de pigs de inspeção é de acordo com o objetivo da inspeção. Entre os pigs de inspeção, os mais comuns são os geométricos e os de perda de espessura. Os geométricos medem os desvios de circularidade da secção transversal ao longo do duto, sendo que alguns medem também raio de curvatura nas curvas do duto. Os de perda de espessura realizam medições na superfície interna do duto de desvios de forma de 2ª ordem, na classificação de desvios de forma segundo DIN 4760 (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, 1982). Os desvios de forma de 2ª ordem para os quais foram projetados os pigs de perfilagem são os decorrentes de perdas de espessura de paredes de dutos por mecanismos de falha de material, entre os quais corrosão, erosão e abrasão.

Também são usados pigs de inspeção de trincas e pigs inerciais. Os de trinca as detectam na parede do duto e os inerciais registram coordenadas geográficas tridimensionais do eixo do duto ao longo dele. Existem ainda pigs especiais de inspeção, alguns dos quais combinam tecnologias de inspeção e outros com tecnologias pouco experimentadas. Entre as tecnologias de pig de inspeção de perda de espessura pouco experimentadas ainda está a de pig de perfilagem, descrita a seguir.

2.2 Descrição da tecnologia de pig de perfilagem

Os pigs de perfilagem funcionam baseados em sensores que realizam uma medição direta por contato na superfície interna do duto. Cada sensor tem uma haste rígida que permanece com uma extremidade em contato com a superfície interna do duto, por pressão de uma mola, e com a outra extremidade montada em um conjunto que contém ímãs permanentes de NdFeB e que permite movimento de inclinação em torno de um eixo que contém um transdutor de efeito Hall⁴. A Figura 1 ilustra o funcionamento dos sensores e junto com a Figura 2 mostra o formato deles.

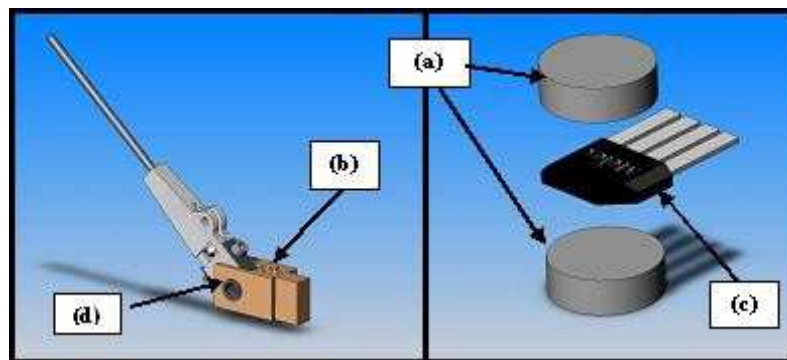


Figura 1 - Funcionamento dos sensores de pig de perfilagem. Dois ímãs permanentes de NdFeB (a) são fixos na base da haste (b) em posições simétricas em relação ao eixo (d) em torno do qual se inclinam. Um transdutor Hall (c) é fixado dentro do eixo. Qualquer inclinação do conjunto haste e sua base em torno do eixo é detectada pelo transdutor Hall. (CAMERINI et al., 2008)

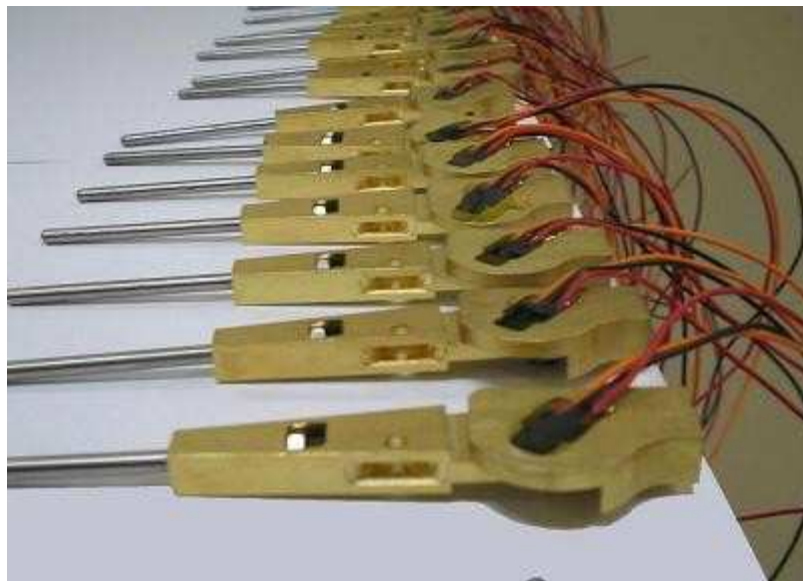


Figura 2 - Fotografia de sensores de pig de perfilagem. As hastes estão à esquerda e a fiação conectada aos transdutores de efeito Hall à direita. (CAMERINI et al., 2005)

⁴ Tosin (2005, p. 69-73) descreve o transdutor Hall.

A haste permanece inclinada e tem movimento de inclinação em um plano longitudinal ao duto passando pelo seu eixo. Ao alterar a inclinação da haste ocorre uma variação de fluxo magnético e o transdutor gera um sinal analógico proporcional a esta inclinação. O sensor é projetado para ter sensibilidade a qualquer variação de posição angular da haste.

Cada sensor é calibrado individualmente de modo a inserir no software de aquisição de dados a curva real de resposta de cada sensor, correlacionando ângulo da haste com a tensão gerada no transdutor. Os sensores são montados radialmente e uniformemente distribuídos formando coroas, conforme mostrado na Figura 3.

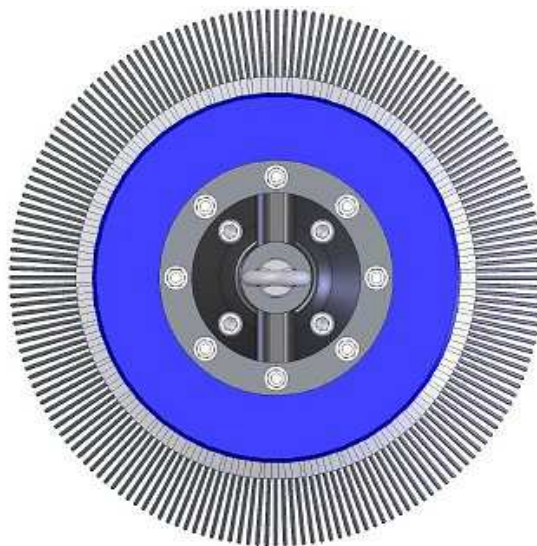


Figura 3 - Visão frontal de pig de perfilagem. Mostra as hastas dos sensores na coroa externa. (CAMERINI et al., 2005)

Algumas coroas semelhantes e com mesmo número de sensores são montadas em cada pig com defasagem angular entre elas de modo que o conjunto de sensores fique uniformemente distribuído na circunferência.

Como em qualquer outro pig instrumentado, a estrutura do corpo do pig serve de apoio à fixação dos sensores e alojamento da eletrônica e das baterias. O corpo do pig é constituído de módulos ligados axialmente por articulações e cabos elétricos.

A Figura 4 mostra em detalhe a montagem dos sensores no pig formando coroas e a Figura 5 mostra a disposição das coroas de sensores no pig.

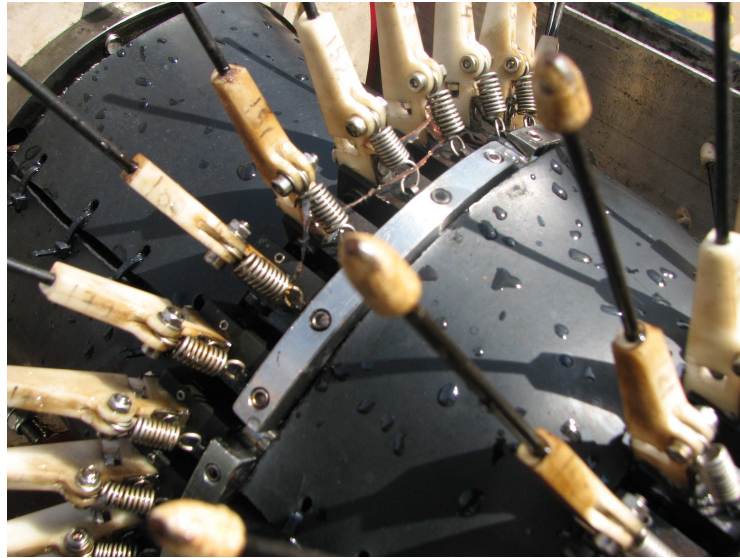


Figura 4 - Visão da montagem dos sensores no pig. Formam as coroas. A imagem mostra as molas e hastes com insertos de cerâmica de alumina na extremidade.

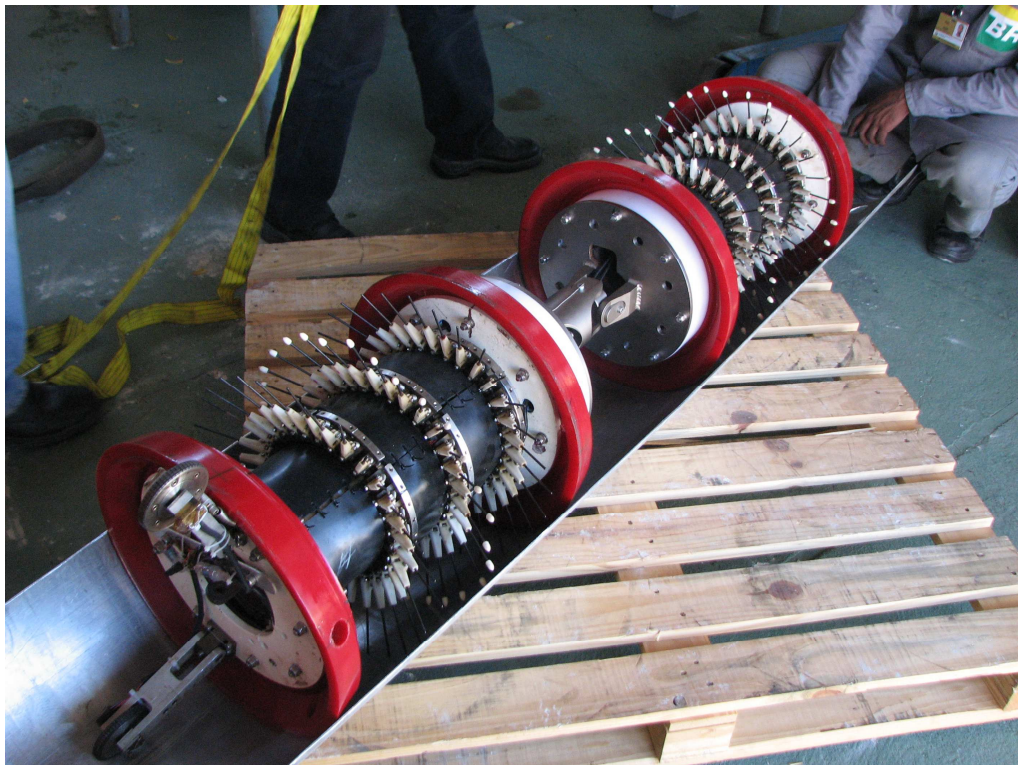


Figura 5 - Pig de perfilagem para dutos de diâmetro de aproximadamente 400 mm ou 16 polegadas. Tem 6 coroas de 30 sensores, total de 180 sensores. A eletrônica e as baterias são alojadas internamente ao pig.

Pratos de poliuretano nas extremidades dos módulos servem de guias, de modo a exercerem as funções de centralização do pig no duto. Os pratos de poliuretano no módulo da frente do pig fazem a selagem para a passagem de fluido pelo pig, de

modo a movimentá-lo no duto no sentido do fluxo. Dois hodômetros, com rodas que permanecem em contacto com a superfície interior do duto na extremidade posterior do pig, em posições diametralmente opostas, medem a distância percorrida. Um sensor de giro do pig em torno de seu eixo, chamado de sensor de posição horária, é instalado internamente à eletrônica para servir de referência para registrar a posição circular dos sensores. A eletrônica embarcada no pig também inclui um relógio.

Com o pig sendo deslocado no duto, as hastes dos sensores têm suas inclinações alteradas ao passar por perdas de espessura internas na parede do duto que alteram sua espessura, gerando sinais que têm correlação com as dimensões das perdas, como ilustrado na Figura 6.

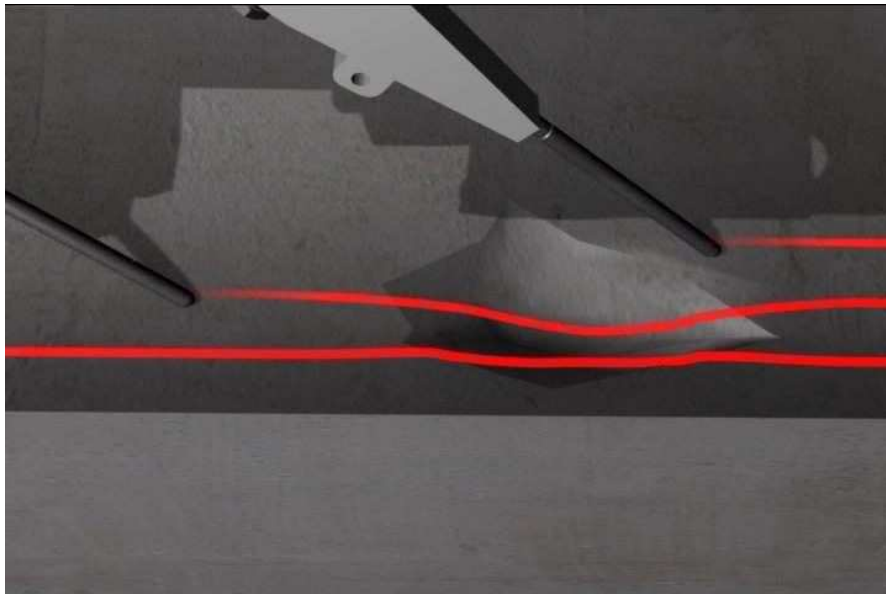


Figura 6 - Modo de medição de pig de perfilagem. Perdas de espessuras na superfície interna da parede do duto são medidas pela variação da inclinação das hastes dos sensores ao passar por elas. (CAMERINI et al., 2008)

A resolução de um pig de perfilagem no sentido longitudinal do duto é definida pela taxa de amostragem e pela velocidade da ferramenta. Tomando-se como exemplo a velocidade de 1 m/s e a taxa de amostragem de 512 Hz, tem-se a resolução longitudinal em 2 mm acrescida do diâmetro da haste em sua extremidade em contacto com a parede do duto. Já a resolução circunferencial é dada pela razão entre o perímetro interno do duto e o número total de hastes. Por exemplo, para um

pig de 400 mm de diâmetro interno, aproximadamente 16 polegadas⁵, com 180 sensores, distribuídos uniformemente na circunferência, resulta em 7 mm somado ao diâmetro da haste em sua extremidade em contacto com a parede do duto. Este diâmetro a ser acrescido é menor que 2 mm, o diâmetro da haste.

Uma descrição da tecnologia do pig de perfilagem necessita descrever os princípios e critérios adotados para o processamento dos dados registrados pelos pigs, apresentados a seguir.

2.2.1 Processamento dos dados para dimensionar a perda de espessura

Os sinais coletados por pig de perfilagem quanto às alterações das inclinações das hastes são registrados e processados para assim medir a profundidade das perdas de espessura. Janvrot (2008a; 2008b; 2008c) desenvolveu softwares para processar os dados destes sinais. Um deles cria uma superfície de referência que procura compensar variações nos sinais decorrentes dos seguintes fatores:

- Calibração de sensores com variação de erro;
- Ovalizações e variações de diâmetro dos tubos decorrentes de sua fabricação;
- Desgaste da extremidade da haste em contacto com a parede do duto;
- Giro do pig sobre seu eixo;
- Descentralização e inclinação do pig em relação ao eixo do duto, por exemplo: se o pig não girar sobre seu eixo e ocorrer um desgaste preferencial na geratriz inferior dos pratos do pig; se as coroas de sensores ficarem com o centro com diferentes deslocamentos em relação ao eixo do duto por ocorrência de movimento transversal significativo do pig, isto é, a frente se deslocar radialmente em um sentido enquanto a traseira no sentido oposto, como em curvas ou em decorrência de um desgaste maior no prato da frente que nos demais;
- Ocorrência de crostas nas superfícies internas nas paredes de dutos.

⁵ Para dutos de petróleo e gás natural convencionou-se indicar o diâmetro em polegadas.

As profundidades das perdas de espessura são indicadas pelos sinais correspondentes às alterações das inclinações das hastes tomando por referência esta superfície gerada da compensação dos fatores citados.

A Figura 7 mostra uma representação gráfica de linhas indicativas da profundidade das perdas de espessura em cada sensor em uma área da parede do duto. Esta indicação tem por referência a superfície gerada da compensação dos fatores citados. As linhas retas vermelhas indicam a superfície de referência. As linhas com ondulações para cima indicam perda de espessura e para baixo indicam ganho de espessura.

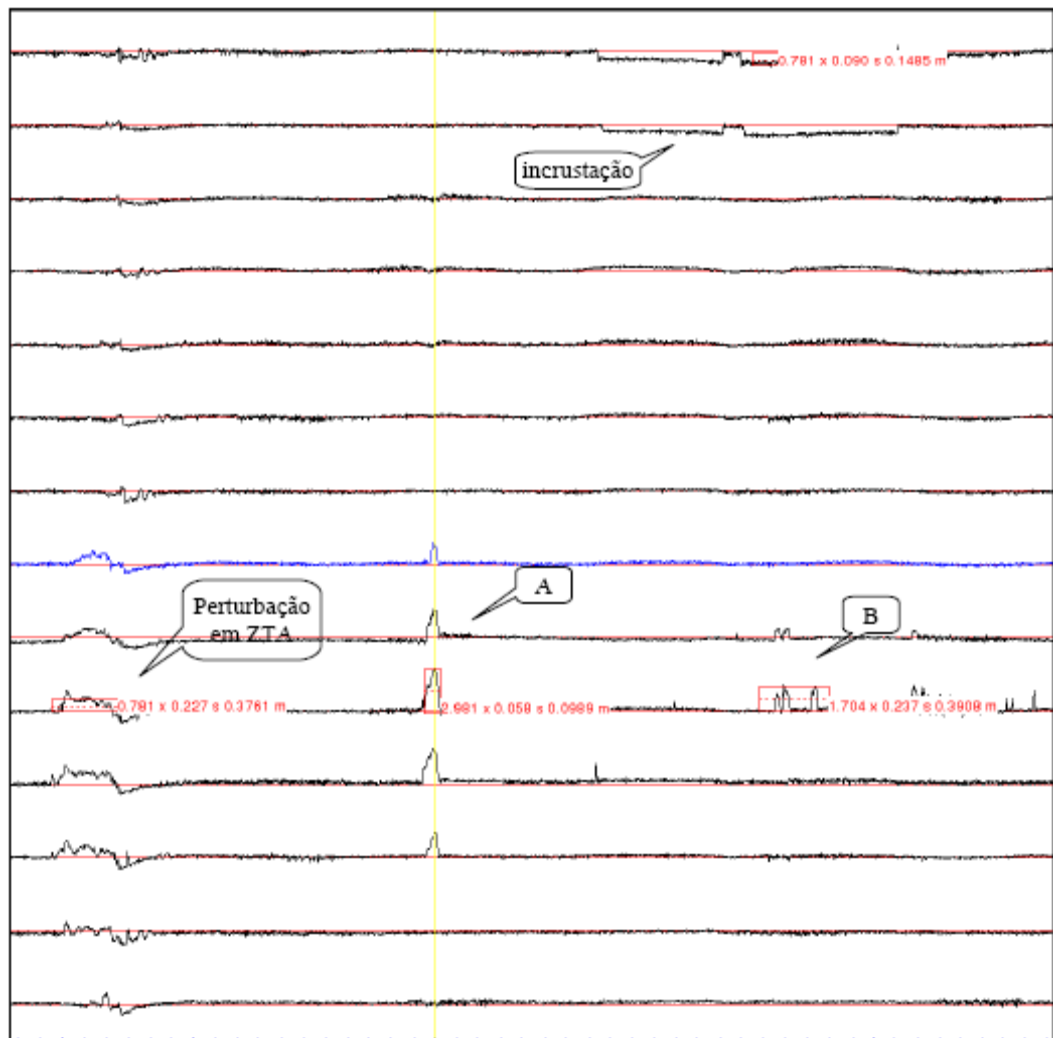


Figura 7 – Representação gráfica de linhas indicativas da profundidade das perdas de espessura em região com perdas de metal, incrustação, solda e zona termicamente afetada, ZTA. Cada linha corresponde a um sensor. A profundidade é indicada pelo afastamento da linha em relação à superfície de referência, indicada por linhas em vermelho. Adaptado de Pipeway Engenharia Ltda (2008)

Janvrot (2008d) também desenvolveu algoritmos de delimitação das áreas com perda de espessura o qual indica largura e comprimento das áreas a partir da agrupamento de sinais dos sensores. Nele, uma alteração na inclinação da haste de cada sensor indicada pelo respectivo sinal é indicada como anomalia de canal. Anomalias de canal de sensores circunferencialmente contíguos são agrupadas quando têm superposição na direção do comprimento do duto. O conjunto de anomalias de canal de sensores agrupadas define a área de perda de espessura, a qual tem suas dimensões indicadas conforme critérios do *European Pipeline Operators Forum* (2005, p. 18 -19).

A Figura 8 mostra uma representação gráfica colorida indicativa das anomalias registradas no trecho do duto que contém a área da Figura 7. Nela as anomalias são delimitadas a partir dos algoritmos de delimitação de áreas desenvolvidos por Janvrot (2008d) e se indica com as cores azul e verde os ganhos de espessura e com as cores preto, vermelho e amarelo as perdas de espessura. O sentido de movimentação do pig é da esquerda para direita. O trecho do duto está planificado, com as bordas superior e inferior da representação gráfica correspondendo à geratriz superior do duto. As perdas de espessura estão na geratriz inferior.

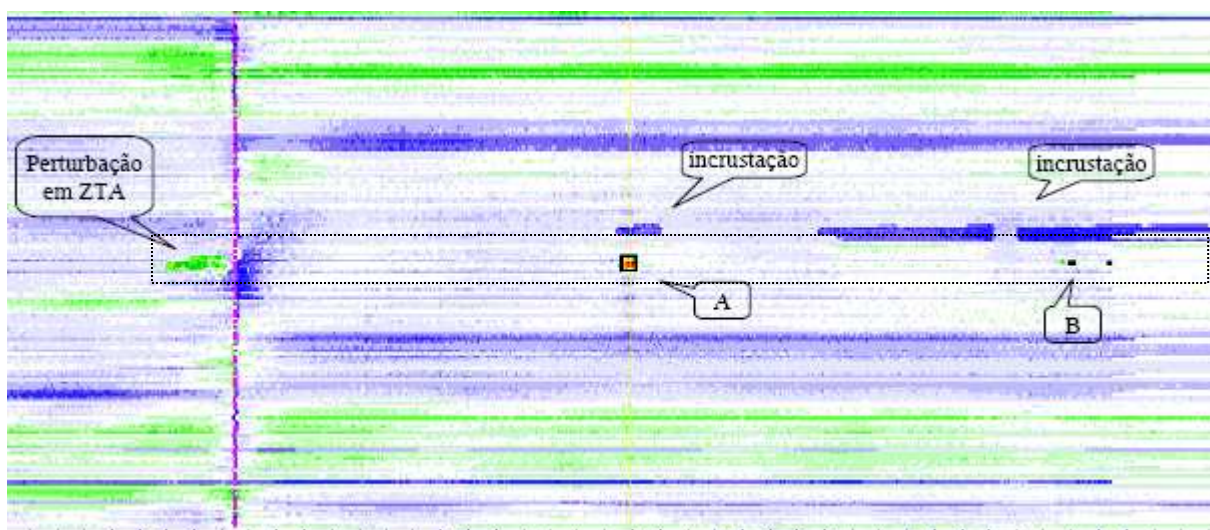


Figura 8 - Representação gráfica colorida indicativa das anomalias registradas em trecho de duto que abrange a área da Figura 7, indicada pelo retângulo pontilhado. Adaptado de Pipeway Engenharia Ltda (2008).

As anomalias detectadas são listadas com as seguintes informações de cada uma delas: Identificação da solda circunferencial anterior mais próxima, conforme

numeração sequencial a partir da primeira válvula de bloqueio do duto; Distância da solda circunferencial anterior mais próxima às referências anterior e posterior mais próximas; Distância da anomalia à primeira válvula de bloqueio do duto; Distância da anomalia à solda circunferencial anterior mais próxima; Posição horária; Profundidade; Comprimento; Largura; Classe dimensional. Estes cinco últimos são indicados conforme *European Pipeline Operators Forum* (2005 p. 18 e 19).

A descrição da tecnologia do pig de perfilagem abre caminho para uma comparação de suas possibilidades de aplicação com as aplicações das tecnologias convencionais.

2.2.2 Comparação com as aplicações das tecnologias convencionais

A tecnologia de pig de perfilagem possibilita a medição das dimensões de áreas de perdas de espessura na superfície interna de dutos que não poderiam ter ou dificilmente teriam esta medição. As tecnologias de pigs de inspeção convencionais para inspeção de áreas de perda de espessura, MFL e ultra-som, têm limitações de aplicações superadas pela tecnologia do pig de perfilagem.

A tecnologia de pig de ultra-som tem aplicação muito restritiva quanto às características do fluido e da parede do duto. O pig de ultra-som precisa permanecer imerso em líquido homogêneo e limpo durante toda a inspeção. Este líquido é necessário para fazer o acoplamento sônico de cada transdutor com a parede do duto. Precisa ser homogêneo e limpo para não dissipar o sinal sônico no trajeto de ida e volta entre o transdutor e a parede do duto. Além disso, esta tecnologia não tem bom desempenho em superfície da parede do duto com muita rugosidade, pois se no ponto de encontro do feixe sônico com a parede do duto a superfície for muito inclinada, em relação ao eixo do duto, a reflexão se dará em outra direção que não será captada pelo transdutor.

Já a tecnologia de pig MFL, mesmo a de alta resolução, não tem bom desempenho em riscos ou sulcos axiais de pequena largura ou muito compridos, porque nestes casos os sinais de desvio do campo magnético são difíceis de serem captados. Além disso, também não tem bom desempenho em dutos de menores diâmetros e

paredes espessas, pois nesta situação fica difícil saturar magneticamente a parede do duto de modo a haver desvio de campo magnético para fora da parede e este desvio ser captado pelos sensores na ocorrência de perda de metal.

Os projetos dos pigs convencionais não permitem passar em dutos com reduções de diâmetro ou em acessórios e componentes do duto com partes intrusivas ao duto que reduzam o diâmetro da seção transversal livre do duto em mais que aproximadamente 10%. Por sua vez, a geometria dos sensores do pig de perfilagem permite uma grande inclinação das hastes, possibilitando que ele passe em dutos com variações do diâmetro interno maiores e em acessórios e componentes do duto com partes intrusivas ao mesmo, os quais impediriam a passagem de pigs convencionais.

O princípio de funcionamento da tecnologia de pig de perfilagem permite inspecionar dutos que combinam condições que impossibilitariam a inspeção com pigs convencionais, tais como parede do duto com grande espessura, que não permite inspeção com pig MFL, e superfície interna muito rugosa, que não permitem inspeção por pig de ultra-som.

Como o desempenho da tecnologia de pig de perfilagem pode ser diferente para diferentes classes dimensionais, convém que sejam definidos critérios para classificação, localização e indicação das dimensões de áreas com perda de espessura de parede de dutos, definidos no capítulo a seguir, para continuar a tratar do desempenho da tecnologia de pig de perfilagem

2.3 Classificação dimensional de áreas com perda de espessura

O princípio de funcionamento dos pigs de perfilagem permite que possam detectar, localizar e medir áreas de perda de espessura na superfície interna da parede. A localização e as dimensões medidas por pigs instrumentados são apresentadas conforme definição feita pelo *European Pipeline Operators Forum* (2005, p. 18 -19), que pode ser entendida através da Figura 9. O mesmo documento também estabelece uma classificação das áreas de perda de espessura quanto às suas dimensões, conforme mostrado na Figura 10.

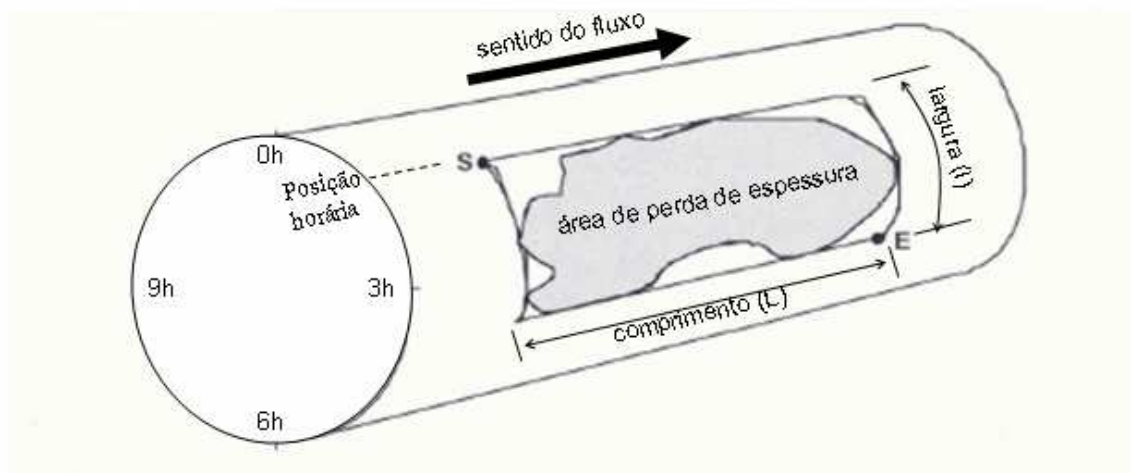


Figura 9 - Definição das dimensões comprimento e largura de área de perda de espessura em dutos. L – comprimento, dimensão longitudinal ao duto; l – largura, dimensão do arco de circunferência; Baseada no *European Pipeline Operators Forum* (2005, p. 18).

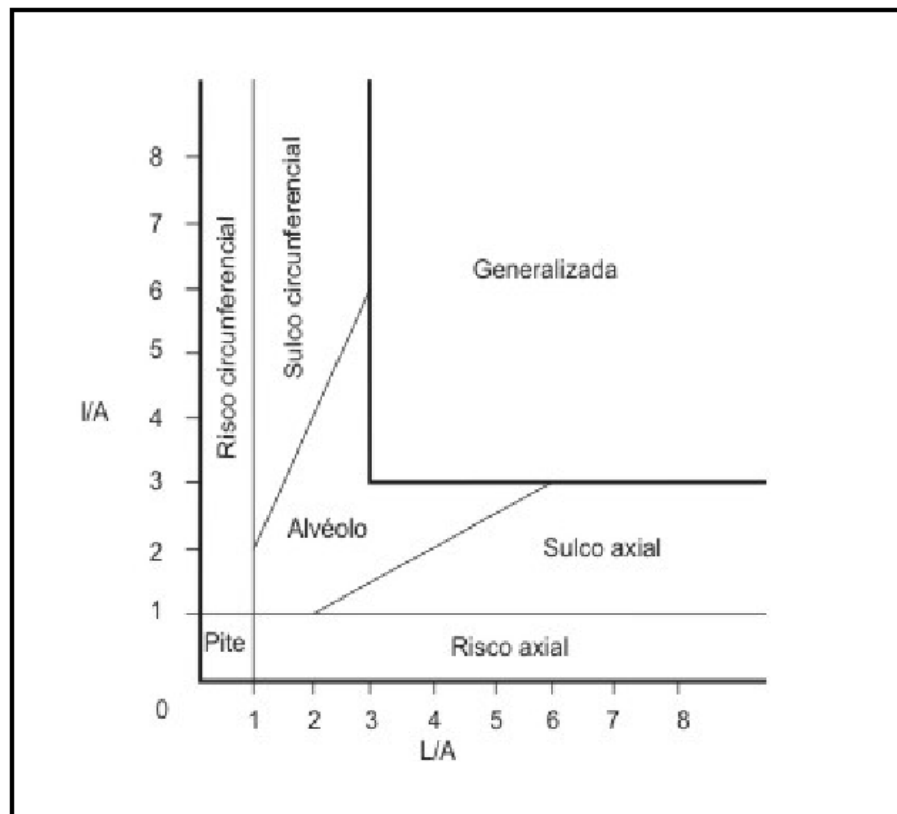


Figura 10 - Mapa de classificação das áreas de perda de espessura em dutos quanto às suas dimensões. “A” é corresponde à espessura de parede do duto ou 10 mm se a espessura for menor que esta. Baseada no *European Pipeline Operators Forum* (2005, p. 19).

A detecção e o dimensionamento de descontinuidades de perda de espessura em parede de dutos têm por fim possibilitar a avaliação estrutural, abordada no capítulo seguinte.

2.4 Avaliação estrutural de áreas com perda de espessura em dutos

O Método dos Elementos Finitos (MEF) é um método numérico que pode ser usado para fazer a avaliação local da resistência de dutos com descontinuidades de qualquer geometria e submetidos a qualquer tipo de carregamento. Porém, o MEF necessita de informações detalhadas da geometria da descontinuidade, pessoal muito especializado, além de muito tempo para sua aplicação em cada local de descontinuidade, o que inviabiliza a sua aplicação na avaliação de uma grande quantidade de descontinuidades em um duto.

Para fazer a avaliação local da integridade do duto para uma grande quantidade de áreas com perdas de espessura de parede na superfície interna, são mais indicados métodos para os quais as informações de dimensões fornecidas pela inspeção por pig, comprimento, largura e profundidade, sejam suficientes.

Para descontinuidades longitudinais, estes métodos são os de primeiro nível nos procedimentos de avaliação em três níveis propostos por Chochaoui e Pick (1994), que são baseados na tensão no sentido circunferencial. Para descontinuidades circunferenciais, além dos métodos de primeiro nível, é possível usar o método da equação de Kastner (KASTNER et al., 1981), para considerar a tensão no sentido longitudinal. Para esta equação as dimensões largura e profundidade da perda de espessura são suficientes. Usando-se a equação de Kastner nas avaliações de descontinuidades circunferências, adota-se o resultado mais conservativo entre o desta equação e o do método de primeiro nível adotado.

Os métodos de primeiro nível são semi-empíricos e 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 melhor representado por métodos baseados na Teoria da Mecânica da Fratura.

As áreas com perdas de espessura de parede nas superfícies internas de dutos normalmente resultam de um ou de uma combinação dos mecanismos de falha corrosão, erosão ou abrasão. Estas áreas normalmente têm contornos e perfis relativamente suaves e os mecanismos citados geralmente causam baixa concentração de tensão. Em geral estas áreas estão em dutos ou trechos de dutos onde estão ausentes outros carregamentos significativos além da pressão interna. Geralmente os dutos são construídos em tubos de aço específicos para dutos⁶, nos quais a falha do material é por colapso plástico e não por fratura frágil. Nestas condições, e considerando a localização das áreas, é possível usar os métodos de primeiro nível para dutos.

Para os métodos de primeiro nível as dimensões comprimento e profundidade da perda de espessura são suficientes. Estes métodos foram desenvolvidos a partir da equação *NG-18 Surface Flaw Equation* (KIEFNER et al., 1973 apud BENJAMIM, 2004, p. 1)⁷. Ela requer o valor da área longitudinal de material perdido⁸, calculado a partir do comprimento e da profundidade da perda de espessura. Esta equação foi formulada no início da década de 70 no Instituto Battelle, usando conceitos da Mecânica da Fratura e resultados de ensaios, para determinação da tensão circunferencial de ruptura em vasos cilíndricos pressurizados. Ela foi formulada a partir de ensaios com descontinuidades externas, porém os métodos desenvolvidos a partir dela podem ser usados, também, na avaliação de descontinuidades internas (CHOCHAOU; PICK, 1994).

Os métodos de primeiro nível empregam um fator denominado fator de dilatação (*bulging factor*) “M”, também chamado *Folias factor*, para considerar o momento fletor causado pela pressão interna na parede do duto ao longo do comprimento da descontinuidade.

Nestes métodos o material é caracterizado por uma tensão denominada σ_{flow} (*Flow Stress*). A tensão σ_{flow} é usada na literatura sobre dutos e vasos de pressão com o objetivo de representar um material elasto-plástico que apresente endurecimento por

⁶ O padrão internacional é a norma API Specification 5L/ISO 3183 (*INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION*, 2007)

⁷ A equação NG-18 é apresentada no Apêndice A.

⁸ É a área de material perdido em projeção cilíndrica em plano que contenha o eixo do duto.

meio de um material elasto-plástico perfeito⁹ equivalente, cuja tensão de escoamento é maior que a tensão de escoamento convencional (BENJAMIM, 2004). Apesar de ser usada como uma característica do material, a tensão σ_{flow} não pode ser determinada através de ensaio, o que faz com que existam várias definições para o seu valor. Seja qual for a definição adotada, o valor de σ_{flow} encontra-se sempre dentro do intervalo $\sigma_y < \sigma_{flow} \leq \sigma_u$, onde σ_y é a tensão de escoamento do material e σ_u é a limite de resistência à tração do material.

A maioria destes métodos classifica defeitos como curtos ou longos, cada método com seu critério, e para cada uma destas classes formula diferentes equações para cálculo da área longitudinal de material perdido e para cálculo do fator de dilatação.

Assim, estes métodos têm em comum a base na NG-18, mas se diferenciam nos critérios de definição do σ_{flow} , de cálculo da área longitudinal de material perdido e do fator de dilatação. Os mais conhecidos e usados¹⁰ são o ASME B31G (*AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS*, 1991), 0,85 dL ou ASME B31G modificado (KIEFNER; VIETH, 1989) e DNV RP-F101 (*DET NORSKE VERITAS*, 1999).

O método ASME B31G foi o primeiro método baseado em norma para avaliação de integridade de dutos corroídos submetidos a carregamento de pressão interna e continua sendo muito utilizado. Foi formulado no início da década de 70 a partir da equação NG-18. Assume que σ_{flow} é $1,1 \sigma_y$ e que a área longitudinal de material perdido tem perfil parabólico para defeitos curtos e perfil retangular para defeitos longos. Seus resultados indicam a pressão segura para operar o duto em relação à pressão de projeto. É considerado um método com resultados muito conservadores em defeitos longos.

No final da década de 80 foi proposto o método 0,85 dL, também conhecido como B31G modificado, que indica valores de pressão de ruptura para defeitos longos

⁹ Um material elasto-plástico perfeito é um material idealizado que atingida a tensão de escoamento, perde a capacidade de absorver novos incrementos de tensão e passa a escoar sob tensão constante, vindo a romper por excesso de deformação plástica.

¹⁰ Apresentados em artigo de Caleyó (2002).

bem maiores que o método ASME B31G original. O método DNV RP-F101 também indica valores de pressão de ruptura para defeitos longos bem maiores que o método ASME B31G original, apesar de não fazer distinção entre defeitos longos e defeitos curtos.

A variedade de métodos de avaliação da integridade de dutos e os condicionantes para a aplicação deles indicam incertezas intrínsecas aos próprios métodos. Além destas, existem outras incertezas na avaliação da integridade de dutos, citadas a seguir.

2.5 Incertezas na avaliação da integridade de dutos

A integridade de dutos depende de muitos fatores. Isto decorre da natureza da operação de dutos e, principalmente, da característica de dutos que os diferencia de tubulações: dutos são extramuros das unidades produtivas. Esta característica implica em maior complexidade na avaliação da integridade de dutos do que na avaliação de tubulações e vasos de pressão em geral, decorrente do fato de dutos atravessarem áreas mais extensas e sob influência de fatores que afetam a integridade e que variam ao longo da extensão do duto e do tempo.

As decisões a respeito da adequação de dutos para operação baseadas na avaliação de sua integridade precisam considerar muitas incertezas, várias delas e suas conseqüências relacionadas à inspeção por pig, abordadas por Maes e Salama (2008). A avaliação da integridade de dutos é feita tanto para considerar o estado no momento da inspeção, denominada avaliação presente, como para prever o estado futuro, chamada avaliação futura. A avaliação futura é necessária para se definir prazos para futuros reparos ou inspeções, sendo válida somente se as premissas adotadas para esta avaliação forem mantidas válidas nestes prazos. Grande parte das incertezas precisa ser considerada na avaliação presente e outra parte para a avaliação futura.

Entre as incertezas a serem consideradas nas decisões a respeito da adequação de dutos para operação baseadas na avaliação de integridade estão algumas relacionadas às tecnologias de inspeção utilizadas, tais como exatidão de medição

das discontinuidades, limitações de capacidade de detecção relacionadas às dimensões e formas das discontinuidades, probabilidade de detecção ou não detecção, probabilidade de indicação falsa, adequação dos procedimentos de inspeção, abrangência das inspeções feitas. Existem até incertezas intrínsecas aos próprios métodos de avaliação da integridade de dutos, haja vista a variedade de métodos existentes e os condicionantes para a aplicação deles.

Também precisam ser consideradas outras incertezas que estão relacionadas ao projeto e construção do duto, tais como material e espessura dos tubos, classe de pressão dos demais constituintes do duto e normas de projeto. Há, ainda, as incertezas associadas à operação, manutenção e inspeção periódica, entre elas, regime e carregamentos operacionais, adequação, estado e vida útil remanescente de reparos executados e calibração dos sistemas de proteção à sobrepressão.

É necessário se considerar também as incertezas associadas às características do processo de corrosão no duto, entre elas morfologia das discontinuidades resultantes e, para a avaliação futura, taxa de corrosão nas dimensões profundidade, comprimento e largura das discontinuidades, adequação e confiabilidade dos sistemas de monitoração da corrosão e dos sistemas de inibição ou proteção contra corrosão interna e externa. Quando existente abrasão ou erosão, valem as mesmas considerações feitas para corrosão.

Apesar de tantas incertezas, as decisões a respeito da adequação de dutos para operação baseadas na avaliação de sua integridade considerando as incertezas e os riscos associados podem ser tomadas com base teórica, modelos e procedimentos bem conhecidos, os quais geralmente requerem uma abordagem probabilística¹¹. A Inspeção Baseada em Riscos ou *Risk-based inspection (RBI)*, entre outras técnicas, fornece uma abordagem probabilística que pode ser aplicada a dutos para considerar as incertezas¹².

¹¹ Um sumário das linhas de abordagens probabilísticas de avaliação da integridade para dutos pode ser vista em Maes e Faber (2007) e Caleyó (2002). Uma abordagem probabilística para avaliação da integridade de estruturas pode ser vista em *Joint Committee on Structural Safety* (2001) e outra específica para dutos em *International Standard Organization* (2006 b).

¹² Ver e.g. American Petroleum Institute (2002).

O desempenho da tecnologia de pig de perfilagem na detecção e na exatidão de medição das dimensões comprimento, largura e profundidade de perdas de espessura precisam ser consideradas nas decisões a respeito da adequação de dutos para operação baseadas na avaliação de integridade¹³.

Uma classe de incertezas na avaliação da integridade de dutos é a de incertezas de medição das dimensões volumétricas de perdas de espessura, abordada no capítulo seguinte.

2.6 Fundamentação da verificação da exatidão de medição das dimensões

Conforme *American Petroleum Institute* (2005 p. 11), os seguintes parâmetros devem ser contemplados na caracterização da exatidão de medição de pigs de inspeção na medição das dimensões comprimento, largura e profundidade de áreas de perdas de espessura:

1. Uma tolerância para o erro na medida indicada pelo pig, e.g., profundidade da perda de espessura indicada no relatório do pig é a indicada $\pm 10\%$ da espessura original da parede do duto no local.
2. Uma certeza, expressa em termos de probabilidade de que o erro esteja dentro da tolerância especificada, e.g., 80% das vezes a profundidade da perda de espessura indicada pelo relatório do pig está dentro da tolerância especificada.
3. Um nível de confiança, indicando a confiança com a qual a tolerância e a certeza especificadas são atendidas, e.g., 95%.

Vários métodos podem ser usados na verificação do desempenho de pigs de inspeção, entre eles os métodos gráfico, RMSE/D, de Grubb, de Jaech e de Thompson¹⁴. Outros métodos consideram tendências, seqüências de resultados ou métodos de estimação de Bayes (CARVAJALINO; MARANGONE; FREIRE, 2006). Porém, os métodos citados não contemplam os três parâmetros de especificação de desempenho de pigs instrumentados na medição das dimensões de áreas de perdas de espessura conforme *American Petroleum Institute* (2005).

¹³ Exemplo de tratamento da incerteza relacionada à exatidão de medição para considerá-la na avaliação da integridade de dutos pode ser vista em Carvajalino; Marangone e Freire (2006).

¹⁴ Ver e.g. Carvajalino; Marangone; Freire, 2006; Desjandins; Reed; Nickle, 2006; McCann; McNealy; Gao, 2007; Morrison et al., 2002.

Métodos de aplicação mais recentes para verificação de desempenho de pigs instrumentados, baseados no *American Petroleum Institute* (2005), contemplam os três parâmetros, tendo como base a distribuição de probabilidade binomial (DESJANDINS; REED; NICKLE, 2006; MCCANN; MCNEALY; GAO, 2007) e se prestam à verificação do atendimento às especificações. São métodos que analisam se pigs instrumentados atendem à especificação da medição das dimensões verificando se foi atendida em uma amostra de áreas com perda de espessura indicadas por inspeção com pig.

A distribuição binomial é especialmente útil para caracterizar dados de contagem, tal como o número de observações que satisfazem um critério especificado. Pode ser usada quando os dados da amostra são coletados ou gerados de modo que satisfazem aos seguintes requisitos:

1. existe um número fixo de observações;
2. cada observação resulta em somente um de dois resultados possíveis, designados como “sucesso” e “falha”;
3. as observações são independentes, ou seja, nenhum resultado de observação influencia resultados de outras observações;
4. a probabilidade de cada resultado é a mesma para cada observação.

A metodologia adotada pelo *American Petroleum Institute* (2005) tem por base a contagem da quantidade de áreas com perda de espessura indicadas por inspeção com pig que atendem à tolerância dentre um número fixo de áreas observadas com perda de espessura. Ela verifica se o pig atende ou não ao desempenho especificado quanto à certeza, geralmente de 80%, com um nível de confiança, geralmente de 95%, usando a distribuição cumulativa binomial.

Esta metodologia está de acordo com os pontos 1 e 2 dos requisitos acima enumerados para o uso da distribuição binomial. O item 4 corresponde à certeza especificada. É preciso uma análise atenciosa das áreas observadas com perda de espessura para verificar se satisfazem aos requisitos 3 e 4. Esta análise deve considerar o modo de funcionamento da tecnologia de pig, o procedimento de medição para conferir as dimensões das áreas observadas com perda de espessura e o método de escolha delas.

Considerando que o modelo de probabilidade para o número de áreas com as medidas indicadas pelo pig dentro da tolerância é uma distribuição binomial, os parâmetros para a verificação se o pig atende ao desempenho especificado para a profundidade de um defeito reportado são:

- o número de áreas com perda de espessura medida
- o número de áreas com as medidas indicadas pelo pig dentro da tolerância
- certeza, que corresponde à probabilidade maior ou igual ao valor desta certeza de que a dimensão da área com perda de espessura indicada pelo pig esteja dentro da tolerância especificada
- nível de confiança de que a tolerância e a certeza são atendidas

Além dos parâmetros de desempenho da tecnologia objeto desta dissertação, outros parâmetros de desempenho da tecnologia são importantes e são apresentados no capítulo seguinte.

2.7 Outros parâmetros de desempenho da tecnologia

A tecnologia do pig de perfilagem, como qualquer tecnologia, tem um campo de aplicação e dentro dele limitações para o desempenho das funções que se espera desta tecnologia. Esta dissertação foca dois aspectos da tecnologia de pig de perfilagem relacionados ao desempenho: capacidade de detecção e da exatidão de medição do comprimento, largura e profundidade das descontinuidades detectadas. Além destes, existem outros aspectos da tecnologia de pig de perfilagem relacionados à sua capacidade de cumprimento das funções que se espera que realize.

As funções básicas que se espera que uma tecnologia de inspeção de perda de espessura em dutos como a do pig de perfilagem realize são detecção, medição e indicação do local de cada descontinuidade. Existem outras funções complementares, entre as quais, classificação das descontinuidades, avaliação local da integridade do duto na presença de cada descontinuidade e identificação de cada componente do duto, tais como, curvas, tês, válvulas, flanges e acessórios.

Dois parâmetros de desempenho importantes para a função de detecção são: limiar (“*threshold*”) e probabilidade de detecção. O limiar de detecção é a menor redução de espessura que o pig é capaz de detectar e indica a sensibilidade para a detecção.

O limiar de medição é o similar para a medição e também é importante parâmetro de desempenho na medição. Os limiares de detecção e medição são definidos conforme critérios do *European Pipeline Operators Forum* (2005, p. 4,19). O limiar de medição define a largura e o comprimento da descontinuidade como pode ser visto na Figura 11.

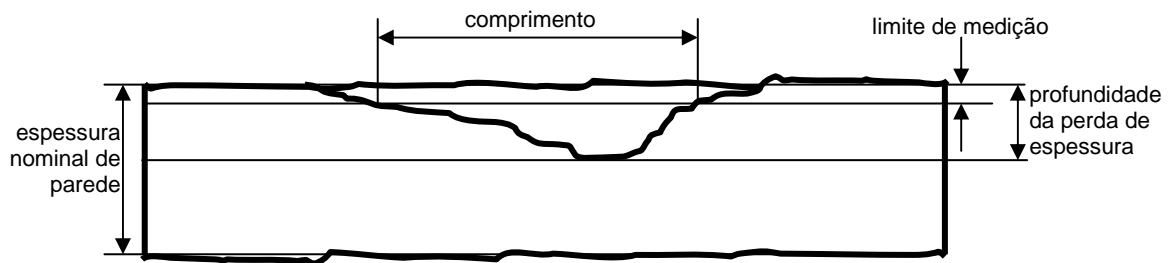


Figura 11 – Definição de limiar de medição. Limiar de medição diminui o comprimento e a largura medidos. Baseada no *European Pipeline Operators Forum* (2005, p. 19).

A medição tem como parâmetros de desempenho mais importantes os relacionados à exatidão de medição, apresentados conforme *American Petroleum Institute* (2005 p. 11) no capítulo anterior, para os quais podem ser atribuídos valores distintos para cada classe da classificação de áreas de perda de espessura em dutos quanto às suas dimensões.

Na indicação do local de cada descontinuidade, os parâmetros de desempenho importantes são a exatidão da medição da distância da descontinuidade à referência mais próxima, medida ao longo do duto e a exatidão da medição da posição circunferencial da descontinuidade.

Os componentes do duto, tais como, curvas, tês, válvulas, flanges e acessórios servem como referências para localização de descontinuidades. Portanto a probabilidade de identificação destes componentes é também um importante parâmetro de desempenho da tecnologia.

Outros parâmetros de desempenho são a repetitividade e a reprodutibilidade dos resultados das medições por pig com esta tecnologia. A norma E456 *ASTM International* (2008) define repetitividade e a reprodutibilidade como sendo a precisão dos resultados em condições de repetitividade e reprodutibilidade, respectivamente. Condições de repetitividade ocorrem quando os resultados de teste são obtidos com os mesmos métodos e itens de testes idênticos no mesmo laboratório e com o mesmo operador usando o mesmo equipamento em intervalos de tempo curtos. Condições de reprodutibilidade ocorrem quando os resultados de teste são obtidos com os mesmos métodos e itens de testes idênticos, porém, em laboratórios diferentes e com operadores diferentes usando equipamentos diferentes. Para a aplicação destes conceitos aqui, entenda-se laboratórios como sendo dutos. Ainda outro parâmetro de desempenho da tecnologia é a sensibilidade da tecnologia a cada fator que pode influenciá-lo.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia consiste de um levantamento de fatores objeto da pesquisa e de uma análise da tecnologia descritos na literatura disponível, complementados por um experimento para observar a tecnologia e os fatores operando.

Com base no levantamento, é delimitado um campo de aplicação hipotético, ao qual se limitará a pesquisa, no mapa de classificação das áreas de perda de espessura em dutos quanto às suas dimensões baseado no *European Pipeline Operators Forum* (2005, p. 19). Com isto se exclui da pesquisa áreas de perda de espessura com dimensões fora do campo de aplicação hipotético.

Para o experimento, utiliza-se o pig de perfilagem em condições normais de inspeção com pig e utilizam-se áreas de perdas de espessura internas ocorridas naturalmente em trechos de um duto que escoa petróleo sem tratamento, construído em aço carbono e em operação. Comparam-se as descontinuidades e suas dimensões medidas com varredura de ultra-som automatizada com as descontinuidades e suas dimensões indicadas pelo pig de perfilagem e, com isto, avalia-se o desempenho da tecnologia na capacidade de detecção e na medição das dimensões volumétricas. Havendo discrepâncias, observa-se os fatores presentes que podem ter causado-as.

3.1 Desenvolvimento do experimento

Um programa de limpeza com pigs precedeu a passagem do pig de perfilagem no duto de forma a garantir a retirada de todo material que pudesse ser retirado de seu interior com pigs de limpeza convencionais, entre eles pig com escovas e pig com magnetos. Em 20/12/2007 utilizou-se um pig de perfilagem em um duto de 16 polegadas de diâmetro nominal com 55 km de extensão com perdas de espessura de parede ocorridas naturalmente ao longo do tempo de operação. Este duto escoava 18.000 m³/d, em média, de petróleo Grau API 23 sem tratamento, com BSW de 75%, temperatura média de 40°C e pressão entre 32 e 67 bar. A velocidade média do pig foi de 1,5 m/s com variação de velocidade instantânea entre 1,2 e 1,8 m/s,

conforme Figura 12. A passagem do pig no duto durou 9 h e 52 min. O material do duto é aço carbono API 5L-X 60 com espessura nominal de parede de 6,35 mm.

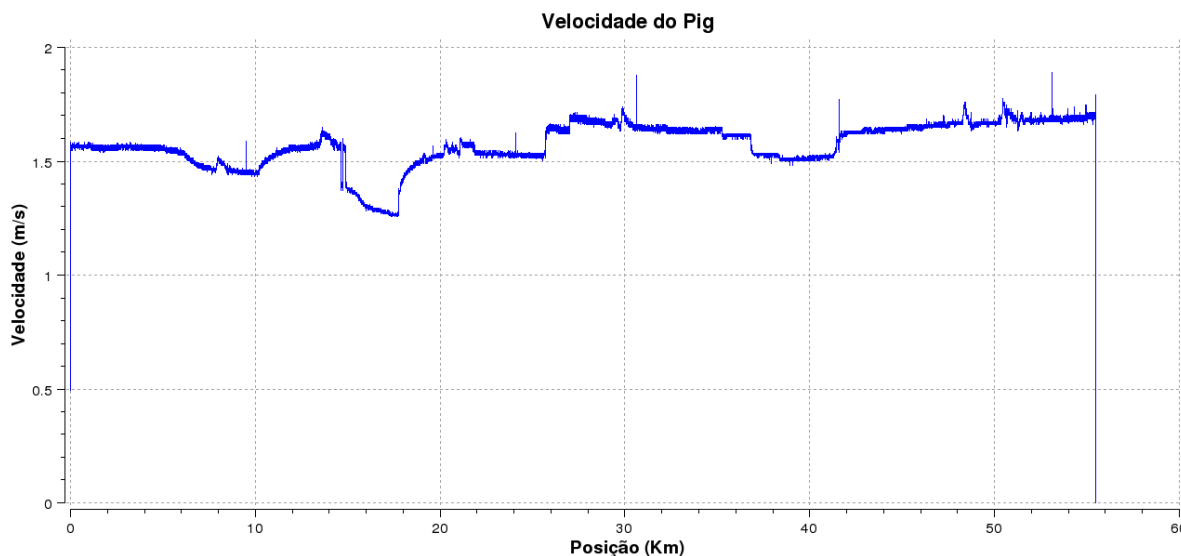


Figura 12 - Gráfico de velocidade do pig de perfilagem no experimento.

O pig de perfilagem utilizado, mostrado na Figura 5, foi um pig específico para dutos de 16 polegadas de diâmetro nominal, da Petrobras e desenvolvido pelo Centro de Pesquisas de Tecnologia de Inspeção – CPTI da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC - Rio. Tem 2 módulos, com total de 6 coroas e total de 180 sensores, o que corresponde a uma resolução circunferencial de 9 mm, e tem taxa de amostragem de 512 Hz, que correspondeu no experimento a uma resolução longitudinal variando entre 2,3 e 3,5 mm, proporcionalmente à velocidade do pig¹⁵.

As varreduras de ultra-som automatizadas foram realizadas entre 03 e 18 de janeiro de 2008. O intervalo de 29 dias entre a inspeção com pig de perfilagem e a última varredura por ultra-som não foi considerado por não ser significativo. Neste intervalo não ocorreu nenhuma anormalidade no escoamento de petróleo no duto que possa ter levado a uma maior perda de espessura de parede que alterasse significativamente os resultados da pesquisa.

¹⁵ Outras características: Baterias de lítio com autonomia de 30 h; Aproximadamente 1700 mm de comprimento e 180 kg de massa; Suporta temperatura máxima 60°C, pressão máxima 150 bar e velocidade máxima 2 m/s;

As perdas de espessura de parede na superfície interna usadas para comparação foram escolhidas com base em relatório de uma inspeção com pig MFL anterior. Entre as perdas de espessura de maior magnitude indicadas pelo pig MFL escolheu-se 17 considerando também a facilidade de localização e acesso. Foram feitas varreduras por ultra-som em trechos de dois metros ou mais para cada uma das 17 perdas de espessura. Como o equipamento de ultra-som automatizado utilizado varre 500 mm de cada vez, os trechos tiveram quatro ou mais varreduras. Em cada varredura que indicou áreas de perdas de espessura se escolheu a maior delas. Algumas destas ficaram com parte em uma varredura e parte em outra. Desta forma, foram escolhidas 57 áreas de perdas de espessura de parede entre as existentes em 17 trechos indicados pelo pig MFL.

Os valores das dimensões profundidade, comprimento e largura das áreas com perdas de espessura de parede na superfície interna medidos pela varredura com ultra-som foram comparados com os valores destas dimensões medidos pelo pig de perfilagem. Nesta comparação, tomaram-se como verdadeiros os valores das medições da varredura por ultra-som, desconsiderando suas incertezas de medição, da ordem de centésimos de milímetros para profundidade e de 1 mm para comprimento e largura, porque as diferenças entre os valores indicados pela varredura por ultra-som e pelo pig de perfilagem foram de magnitude muito superior às incertezas de medição da varredura por ultra-som.

A diferença de valores observada nesta comparação foi atribuída a erro do pig de perfilagem, o qual foi comparado com as especificações típicas de tolerância de dimensionamento de pig MFL de alta resolução, indicadas por *NACE International* (2000 p.28), por ser este o pig de inspeção mais usual para perda de espessura.

3.1.1 Varreduras de ultra-som automatizadas

As varreduras de ultra-som automatizadas foram realizadas com equipamento que varreu um comprimento de 500 mm em toda a circunferência do duto, com resoluções circunferencial e longitudinal de 1 mm obtidas com transdutor de 10 MHz de número de série 8080343401 do fabricante Panametrics, com água como

acoplante, e equipamento do modelo LSI 4 do fabricante *Physical Acoustics Corporation*.

O transdutor de ultra-som se desloca longitudinalmente em relação ao duto, em trechos de 500 mm, guiado por trilho que faz parte de um carro que executa movimento circunferencial transversal ao duto. O carro tem rodas magnéticas com tração comandada por softwares de controle e monitoração da posição, os quais comandam também o movimento longitudinal do transdutor. O sistema de varredura automatizada de ultra-som foi configurado para detectar erosão, corrosão e outros tipos de desgaste da parede do duto com perda de espessura. A Figura 13 mostra uma foto do equipamento.

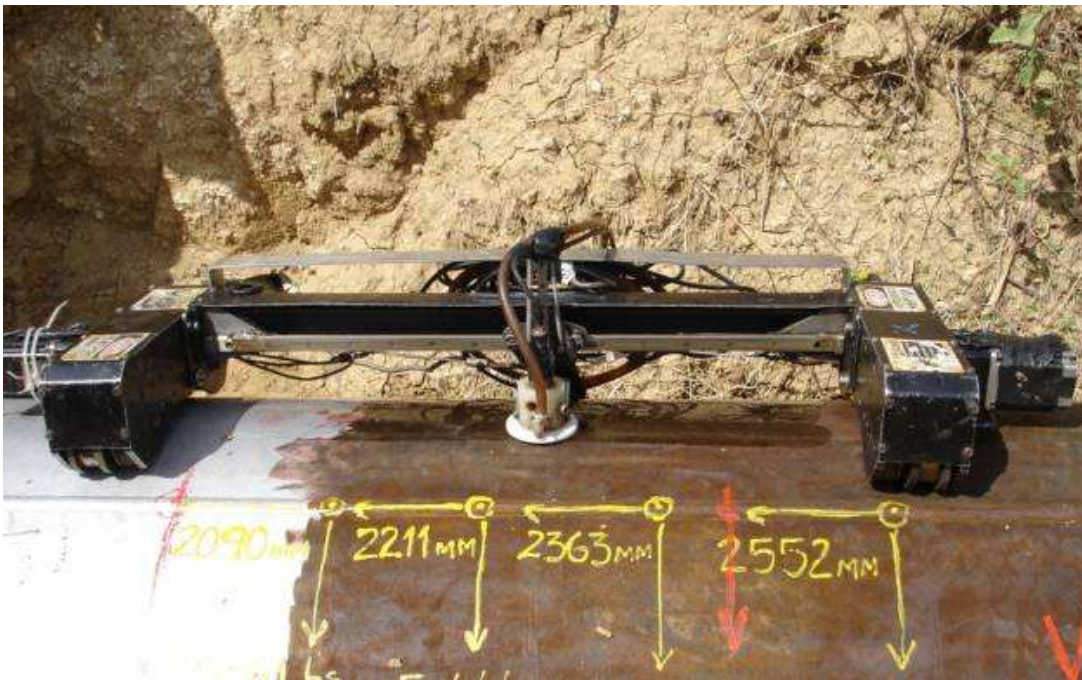


Figura 13 - Foto do equipamento de varredura por ultra-som.

A metodologia empregada na varredura por ultra-som foi baseada nas recomendações da *American Society of Mechanical Engineers* (2007) no código *ASME Section V, Article 4, Ultrasonic examination methods for inservice inspection*, as quais especificam um bloco de referência para calibração do sistema de medição com velocidade e espessuras conhecidas. Duas diferentes técnicas de ultra-som foram usadas: análise do tempo de percurso sônico (TOF), para indicar profundidade e posicionamento das discontinuidades; análise da amplitude de

reflexão do eco de fundo, para avaliação de perda de sinal associado ao tipo de dano e condição de deterioração do material.

O resultado da varredura por ultra-som foi apresentado de forma gráfica, indicando a totalidade de cada área varrida e a espessura medida em cada ponto. As representações gráficas foram geradas a partir dos dados de medição, de forma automatizada, e apresentadas em escala de cores associadas a diferentes tempos de percurso sônico e variações de amplitude de sinal. Estas representações foram apresentadas nos modos conhecidos como B-Scan e C-Scan de varredura por ultra-som. A figura 14 apresenta o resultado da varredura em uma região com uma indicação de baixa espessura no duto do experimento.

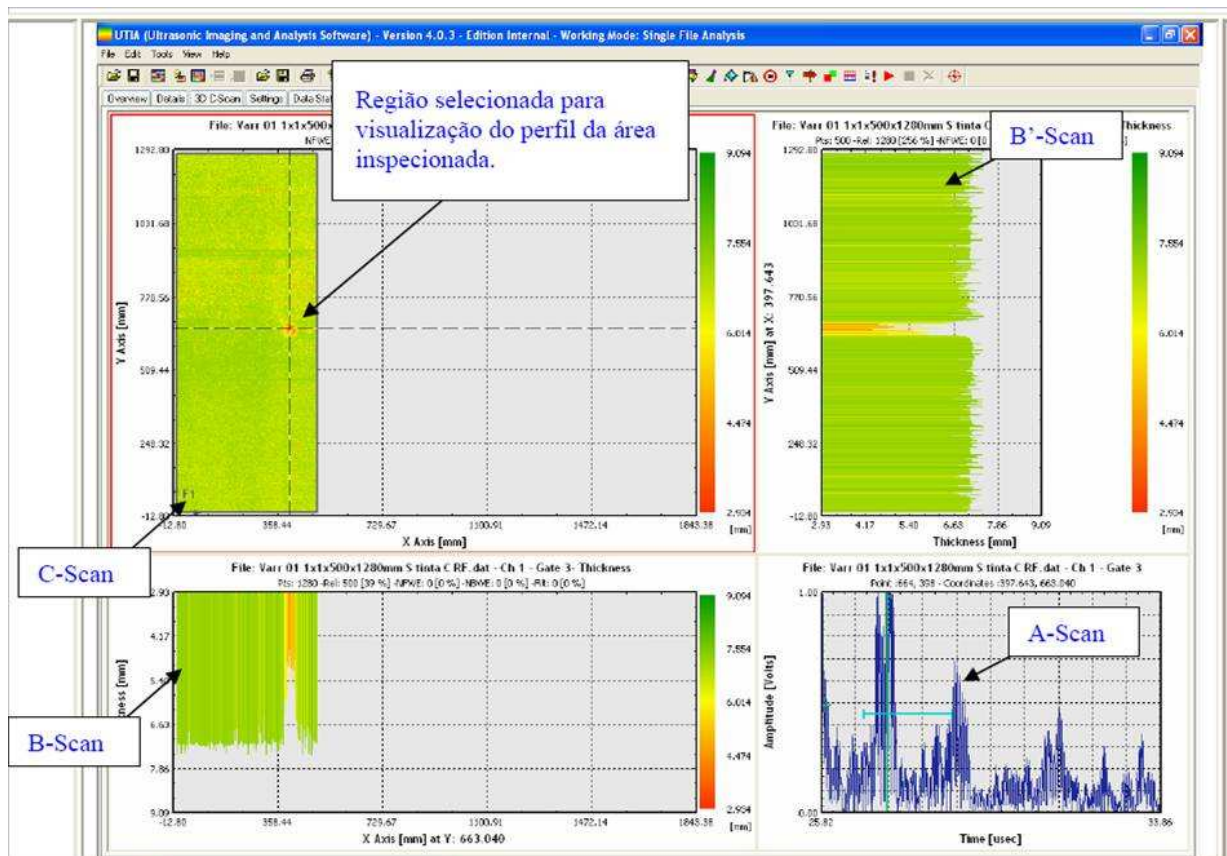


Figura 14 – Representação gráfica da varredura por ultra-som nos modos B-Scan e C-Scan. Physical Acoustics South America (2008)

No canto superior esquerdo está o C-Scan da varredura, correspondente à planificação da parede do duto, com largura de 500 mm no eixo X e o perímetro da superfície externa do duto no eixo Y, com a indicação de uma região de perda de

metal. No canto superior direito está o B-Scan na linha vertical mostrada sobre a imagem do C-Scan, correspondente a uma seção transversal ao duto passando pela região de perda de metal. No canto inferior esquerdo está o B-Scan na linha horizontal mostrada sobre a imagem do C-Scan, correspondente a uma seção longitudinal ao duto passando pela região de perda de metal. O gráfico A-Scan no canto inferior direito corresponde ao tempo de percurso sônico e a amplitude de reflexão do eco, com base nos quais se indica a espessura no ponto de cruzamento das linhas horizontal e vertical sobre o C-Scan. O comprimento, a largura, a espessura mínima e a localização de cada anomalia, bem como a espessura média em cada varredura, foram determinadas com base no software de processamento e análise das varreduras, no B-Scan e no C-Scan.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Susceptibilidades da tecnologia a fatores relacionados ao desempenho

O desempenho da tecnologia do pig de perfilagem é susceptível a fatores que influenciam a capacidade de detecção e a exatidão de medição das dimensões volumétricas de perdas de espessura na superfície interna da parede de um oleoduto em condições normais de inspeção de oleodutos com pig. Os softwares de processamento dos sinais captados pelo pig de perfilagem precisam compensar variações nos sinais decorrentes dos fatores que podem ser compensados, apresentados no capítulo 2. Falhas nesta compensação podem influenciar o desempenho na detecção e na exatidão de medição das dimensões volumétricas de perdas de espessura.

Um destes fatores que torna a tecnologia mais susceptível à falha e que pode influenciar o desempenho na detecção e na exatidão de medição das dimensões volumétricas de perdas de espessura é sua extrema sensibilidade à calibração dos sensores. Como ressaltado por Janvrot (2008a; 2008b; 2008c), para a análise automatizada de grande quantidade de sinais indicativos da presença de perdas de espessura, a calibração precisa ser desenvolvida e sistematizada para diminuir a variabilidade de calibração entre sensores.

Ovalizações dos tubos empregados nos dutos podem ocorrer na fabricação dos tubos, na construção do duto, ou também por algum acidente após entrada do duto em operação. A tolerância de fabricação¹⁶ para ovalização de tubo para um duto como o do experimento, por exemplo, é de até 2% do diâmetro nominal, o que equivale a 8,128 mm. Esta ovalização tolerada na fabricação corresponde à diferença entre o maior e o menor diâmetro na mesma seção transversal do tubo. Considerando que ovalizações podem ser da mesma magnitude da espessura da parede, que podem ocorrer aleatoriamente ao longo do duto e que geralmente têm ao longo do duto início e fim suave, pode ser muito difícil distinguir com a tecnologia

¹⁶ As tolerâncias de fabricação de tubos seguem o padrão internacional que é a norma API Specification 5L/ISO 3183 (INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION, 2007)

do pig de perfilagem os aumentos de diâmetro interno devidos à ovalização dos devidos à perda de espessura generalizada na superfície interna.

Também na fabricação dos tubos, podem ocorrer variações no diâmetro. A tolerância de fabricação para o diâmetro, por exemplo, para tubo para um duto como o do experimento é de $\pm 3,05$ mm, o que equivale a uma variação total de 6,10 mm. Considerando que estas variações podem ser da mesma magnitude da espessura da parede e que podem ocorrer aleatoriamente ao longo do duto e com transições suaves, pode ser muito difícil a tecnologia do pig de perfilagem discriminar entre aumentos de diâmetro interno devidos à variação no diâmetro e perda de espessura generalizada na superfície interna, do mesmo modo descrito para ovalizações.

Também podem ocorrer variações na espessura de parede do tubo na fabricação. A tolerância de fabricação para a espessura, por exemplo, para tubo para um duto como o do experimento é de $\pm 10\%$ da espessura nominal, o que equivale a uma variação total de 1,25 mm. Como estas variações podem ocorrer numa mesma seção transversal do tubo e aleatoriamente ao longo do duto e geralmente têm transição suave, pode ser difícil a tecnologia de pig de perfilagem diferenciar entre a ocorrência de aumento de diâmetro interno devido à variação na espessura de fabricação e a ocorrência de perda de espessura generalizada de grande extensão na superfície interna. As outras tecnologias de inspeção de pig de perda de espessura também têm limitações que fazem com que geralmente não registrem perdas de espessura inferiores a 10% da espessura nominal.

Pode ocorrer desgaste na extremidade da haste em contacto com a parede do duto, se o duto for muito longo e a superfície interna da parede muito áspera. É necessário que os algoritmos dos softwares de análise dos sinais detectem e meçam este desgaste e o compensem quando significativo para os resultados da medição da profundidade das perdas de espessura. As ocorrências de ovalização, variações no diâmetro ou na espessura de parede tornam este procedimento menos efetivo. Assim, o desempenho da tecnologia na exatidão de medição da profundidade das perdas de espessura no trecho final do duto pode ser prejudicado pelo desgaste na extremidade da haste em contacto com a parede do duto.

Geralmente as perdas de espessura internas aos oleodutos se concentram em torno de algumas geratrizes. É mais comum em torno da geratriz inferior, por onde é mais comum que a água e os sedimentos mais pesados escoem, o que facilita a corrosão e a abrasão, e onde é mais comum formar depósitos, o que facilita a corrosão sob depósitos. Também ocorrem em torno de onde a interface óleo/água toca a parede ou em torno da geratriz superior. Nas adjacências das geratrizes onde se concentram as perdas de espessura internas a superfície geralmente é mais áspera, causando maior desgaste nas hastes do pig de perfilagem. A compensação dos desgastes das hastes é mais fácil e menos crítica se o pig girar sobre seu eixo ao longo do duto de modo que o desgaste na extremidade das hastes seja mais distribuído e uniforme entre as hastes. O desgaste de cada prato é também mais uniforme e distribuído em toda a circunferência e o desempenho do pig na exatidão de medição da profundidade das perdas de espessura no trecho final do duto é mais alto se o pig gira em torno do seu eixo desta forma do que se o pig não gira.

Pode ocorrer inclinação do eixo ou descentralização do pig em relação ao eixo do duto. O prato da frente do pig tende a ter maior desgaste, por ser o que arrasta e tem mais contacto com material que causa abrasão nos pratos e por sua superfície em contacto com a parede do duto ser uma superfície de selagem, exercendo maior pressão sobre a parede do duto e, em consequência, tendo maior desgaste por abrasão. Este maior desgaste no prato da frente que nos demais pode inclinar o eixo do pig em relação ao eixo do duto. Esta inclinação pode ocorrer também em curvas. Também ocorrerá descentralização do pig em relação ao eixo do duto se o pig não girar sobre seu eixo e ocorrer um desgaste preferencial na geratriz inferior dos seus pratos. Ocorrendo inclinação ou descentralização do pig, as coroas de sensores ficam com o centro deslocado em relação ao eixo do duto, implicando na necessidade de compensação nos sinais registrados. Falhas nesta compensação podem influenciar na exatidão de medição das dimensões volumétricas de perdas de espessura.

Perdas de espessura na superfície interna de parede de oleoduto podem ser encobertas por crostas firmemente ligadas à superfície de modo a impossibilitar que as hastes penetrem ao fundo e, assim, dificultar ou impossibilitar a detecção e medição das dimensões pelo pig de perfilagem. Estas crostas podem ter origem em

processo corrosivo da parede do duto ou em processo de deposição de material a partir de substâncias presentes no fluido sendo escoado, que pode ter outros componentes além do petróleo. Produtos de corrosão em superfície interna de oleodutos podem formar crostas firmemente ligadas à parede do duto bem como incrustações em superfície interna de oleodutos podem ficar firmemente ligadas à parede do duto, quando presentes condições para isto. A formação de depósitos pode, quando presentes condições para isto, levar a ocorrência de um processo corrosivo sob depósito, denominado corrosão oclusiva.

Entre as susceptibilidades da tecnologia a fatores relacionados ao desempenho está o *overshoot* dos sensores em variações bruscas de espessuras ou em saliências na superfície interna da parede do duto, conforme ilustrado na Figura 15.

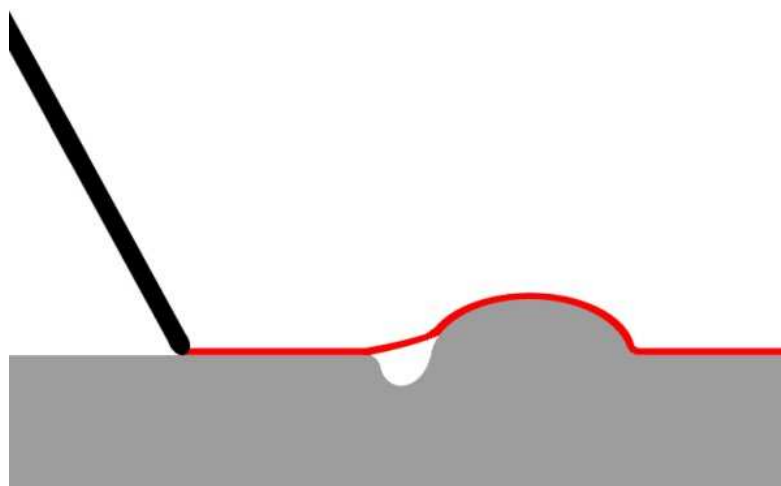


Figura 15 – *Overshoot* do pig de perfilagem. O *overshoot* altera o sinal captado em função da velocidade de passagem do pig no duto.

A possibilidade de *overshoot* dos pigs de perfilagem é relacionada à velocidade do pig, sendo menor quanto menor for a velocidade. O *overshoot* dos pigs de perfilagem influencia seu desempenho na detecção e na exatidão de medição das dimensões volumétricas de perdas de espessura. As soldas circunferenciais ao longo do duto são locais onde é mais comum ocorrer o *overshoot*. Também são locais onde a presença de descontinuidade é mais crítica para a integridade dos dutos, pois algumas descontinuidades no corpo do tubo que não são consideradas defeitos nem requerem reparos por normas ou práticas recomendadas, se ocorrem

atingindo a solda circunferencial podem ser consideradas defeitos e requerem reparos pelas mesmas normas ou práticas recomendadas. Porém, como a tecnologia do pig de perfilagem, também as tecnologias de pig de perda de espessura convencionais têm desempenho menor nas regiões de solda circunferencial que no restante do duto.

Outra já conhecida, da mesma natureza do *overshoot*, é o subdimensionamento de descontinuidades que ocorre quando há contacto da haste do sensor com superfície de descontinuidade mais inclinada que a haste, em outro ponto da haste que não sua extremidade, conforme ilustrado na Figura 16.

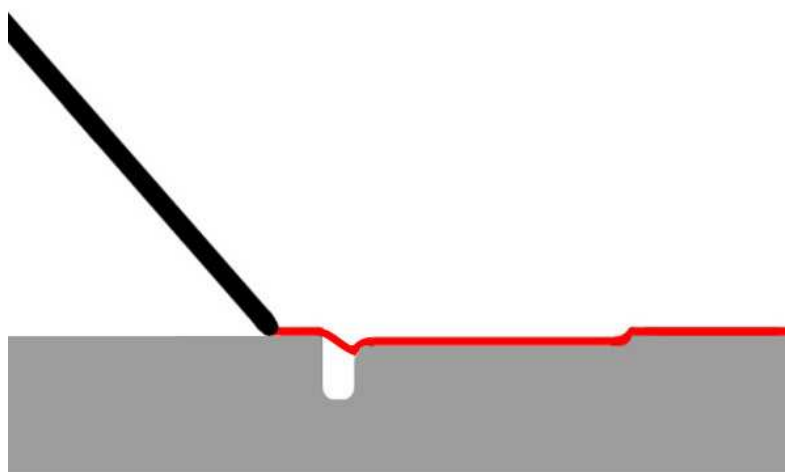


Figura 16 – Subdimensionamento devido contacto em outro ponto da haste que não sua extremidade. Devido inclinação da haste ser menor que a inclinação da superfície da parede.

Outra susceptibilidade da tecnologia a fatores relacionados ao desempenho quanto à capacidade de detecção e na exatidão de medição das dimensões volumétricas de perdas de espessura ocorre quando existe perda de espessura na superfície interna da parede do duto em local onde está presente moessa ou amassamento. A moessa, deslocando a superfície interna para dentro do duto, faz com que as hastes gerem sinais que levam a erros de medição das dimensões volumétricas de perdas de espessura proporcionais às dimensões da moessa, podendo levar a falha na detecção. Falha na detecção deste caso é crítica porque é um caso em que a boa prática recomenda reparo do duto.

Após este levantamento das susceptibilidades da tecnologia a fatores relacionados ao desempenho, convém considerá-las na proposta de um campo de aplicação da tecnologia de pig de perfilagem, apresentado a seguir.

4.2 Campo de aplicação da tecnologia a ser considerado

Considerando-se as características da tecnologia de pig de perfilagem, principalmente as que definem as resoluções circunferencial e longitudinal e suas susceptibilidades a fatores relacionados ao desempenho descritas anteriormente, bem como os resultados da experimentação desta tecnologia apresentados por Camerini et al. (2005, 2008), é razoável considerar para os objetivos desta pesquisa um campo de aplicação desta tecnologia próximo ao indicado no mapa na Figura 17, apesar de não se dispor de suficiente experimentação desta tecnologia para esta afirmativa ser certificada.

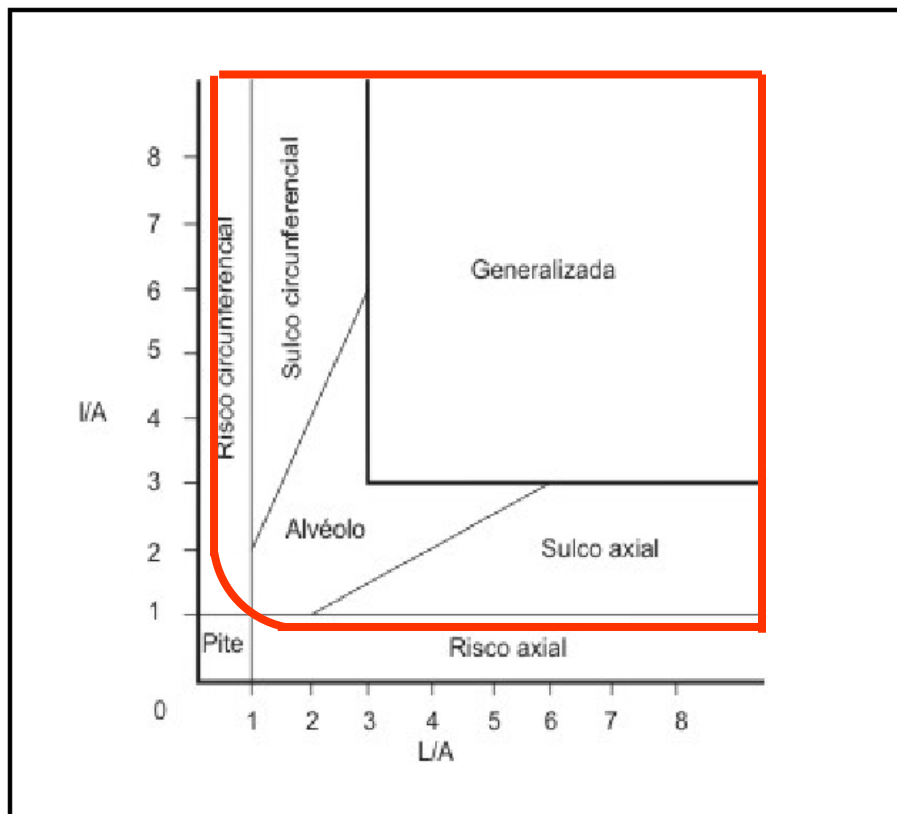


Figura 17 - Mapa de aplicação da tecnologia de pig de perfilagem. A aplicação é restrita ao campo delimitado. Os limites do campo de aplicação são aproximações.

Desconsiderando-se demais fatores e considerando-se somente as dimensões comprimento e largura, a aplicação é irrestrita para as classes Generalizada, Sulco Circunferencial, Sulco Axial e Alvéolo. Com as mesmas considerações, se aplica à maior parte de Riscos Circunferenciais, correspondente aos mais compridos, à menor parte de Riscos Axiais, correspondente aos mais largos, e não se aplica a Pites. O menor comprimento de descontinuidade a partir do qual o pig de perfilagem tem capacidade de detecção considerável é maior que sua resolução longitudinal e que o diâmetro da extremidade da haste em contacto com a superfície da parede do duto e limitado pelo *overshoot*. Este comprimento é menor que a menor largura de descontinuidade a partir do qual o pig de perfilagem tem capacidade de detecção considerável. Esta largura corresponde à resolução circunferencial. É razoável supor que na medida em que tanto o comprimento como a largura de uma descontinuidade diminuem se aproximando das dimensões de um pite, a capacidade de detecção diminui devido principalmente à movimentação lateral da extremidade da haste em contacto com a parede do duto.

O campo de aplicação considerado para a tecnologia do pig de perfilagem exclui perdas de espessura na superfície interna com profundidades inferiores à tolerância de fabricação dos tubos para a espessura de parede.

4.3 Resultados do experimento

Os resultados são apresentados no Quadro 1, a seguir. A primeira coluna indica a classe da perda de espessura quanto às suas dimensões, por suas iniciais: G – Generalizada; A – Alvéolo; P – Pite; RA – Risco axial; SA – Sulco axial; SC – Sulco circunferencial. A quarta coluna indica a espessura média da parede em torno da área de perda de espessura. L e l são as dimensões comprimento e largura da perda de metal conforme definição feita pelo *European Pipeline Operators Forum* (2005, p. 18-19). Nas colunas indicadas por p está indicada a espessura remanescente no ponto de profundidade máxima de cada perda de espessura e nas indicadas por d está a profundidade máxima de cada perda de espessura em relação a espessura original local, indicada por *espes*. As células marcadas com NR indicam que a perda de metal não foi relatada e as células marcadas com X indicam ocorrência na região da anomalia ou próxima.

VARREDURA POR ULTRA-SOM						PIG DE PERFILAGEM									Registros de sinais de perda de metal	
Classe de perda	L (mm)	l (mm)	espes (mm)	p (mm)	d (%)	L (mm)	l (mm)	espes (mm)	p (mm)	d (%)	Erro L (mm)	Erro l (mm)	Erro d (%)	Registros de sinais de crosta	Registros de sinais de perda de metal	
G	49	46	7,07	3,12	56	33	21	6,35	4,38	31	-16	-25	-18			
SA	27	11	7,07	4,22	40	NR	NR	6,35	NR	NR	-	-	-		X	
SA	72	14	7,37	4,80	35	NR	NR	6,35	NR	NR	-	-	-	X	X	
SA	90	12	7,31	5,08	31	NR	NR	6,35	NR	NR	-	-	-	X	X	
G	44	34	7,31	4,30	41	NR	NR	6,35	NR	NR	-	-	-	X	X	
A	38	21	7,31	4,27	42	NR	NR	6,35	NR	NR	-	-	-	X	X	
P	10	5	7,44	5,14	31	NR	NR	6,35	NR	NR	-	-	-	X		
G	79	54	6,76	3,38	50	72	35	6,35	4,00	37	-7	-19	-9	X		
SA	66	25	6,76	3,25	52	47	21	6,35	4,45	30	-19	-4	-18	X		
A	12	10	6,76	4,69	31	NR	NR	6,35	NR	NR	-	-	-	X		
RA	11	6	6,88	4,53	34	NR	NR	6,35	NR	NR	-	-	-	X	X	
RA	19	6	6,94	4,27	38	NR	NR	6,35	NR	NR	-	-	-	X	X	
G	44	36	6,83	3,90	43	30	21	6,35	4,45	30	-14	-15	-8	X		
RA	24	8	6,94	3,83	45	NR	NR	6,35	NR	NR	-	-	-	X	X	
A	27	15	6,85	4,09	40	33	7	6,35	4,70	26	6	-8	-9	X		
A	14	12	6,73	4,06	40	15	7	6,35	4,70	26	1	-5	-9	X		
RA	17	8	7,50	4,74	37	14	7	6,35	4,83	24	-3	-1	-1	X	X	
SA	42	13	7,50	5,14	31	NR	NR	6,35	NR	NR	-	-	-	X		
RA	38	10	6,93	4,69	32	NR	NR	6,35	NR	NR	-	-	-	X	X	
G	46	39	6,98	3,69	47	NR	NR	6,35	NR	NR	-	-	-	X	X	
SA	55	17	7,31	4,30	41	17	7	6,35	4,76	25	-38	-10	-6	X		
RA	19	4	7,07	4,43	37	NR	NR	6,35	NR	NR	-	-	-	X	X	
RA	35	5	7,19	4,74	34	NR	NR	6,35	NR	NR	-	-	-	X		
SA	138	29	7,13	4,03	43	55	14	6,35	4,70	26	-83	-15	-9	X	X	
SA	36	15	6,70	3,67	45	17	7	6,35	4,83	24	-19	-8	-17	X		
RA	27	5	6,63	4,01	40	NR	NR	6,35	NR	NR	-	-	-	X		
A	17	11	7,13	3,54	50	NR	NR	6,35	NR	NR	-	-	-	X		
SC	19	60	7,19	3,27	55	NR	NR	6,35	NR	NR	-	-	-	X		
G	77	57	7,25	4,01	45	NR	NR	6,35	NR	NR	-	-	-		X	
G	206	50	7,13	4,19	41	NR	NR	6,35	NR	NR	-	-	-		X	
SA	24	11	6,82	3,80	44	NR	NR	6,35	NR	NR	-	-	-	X	X	
SC	27	72	6,74	3,80	44	12	7	6,35	5,02	21	-15	-65	-18	X		
SA	61	16	6,74	4,30	36	19	7	6,35	4,70	26	-42	-9	-6	X		
SA	95	23	7,31	4,32	41	NR	NR	6,35	NR	NR	-	-	-	X	X	
SA	33	15	7,25	4,14	43	NR	NR	6,35	NR	NR	-	-	-	X	X	
P	9	3	7,44	4,74	36	NR	NR	6,35	NR	NR	-	-	-	X		
G	124	97	7,31	3,52	52	NR	NR	6,35	NR	NR	-	-	-	X	X	
SA	109	25	7,31	3,80	48	33	14	6,35	4,32	32	-76	-11	-7	X		
SA	85	19	7,25	3,75	48	34	7	6,35	4,70	26	-51	-12	-13	X		
SA	163	25	7,68	3,98	48	13	7	6,35	4,76	25	-150	-18	-10	X		
G	52	34	7,08	4,93	30	46	35	6,35	4,00	37	-6	1	13	X		
SA	61	29	7,80	4,17	47	NR	NR	6,35	NR	NR	-	-	-	X		
A	26	14	6,70	4,22	37	NR	NR	6,35	NR	NR	-	-	-	X	X	
RA	37	10	7,80	4,77	39	NR	NR	6,35	NR	NR	-	-	-	X		
G	125	52	7,31	4,42	40	NR	NR	6,35	NR	NR	-	-	-	X	X	
G	125	52	7,31	4,16	43	NR	NR	6,35	NR	NR	-	-	-	X		
G	38	35	7,25	4,24	42	NR	NR	6,35	NR	NR	-	-	-	X	X	
SA	54	14	7,68	4,93	36	NR	NR	6,35	NR	NR	-	-	-	X	X	
SA	24	12	7,80	4,77	39	NR	NR	6,35	NR	NR	-	-	-	X	X	
SA	303	26	7,80	3,96	49	NR	NR	6,35	NR	NR	-	-	-	X		
G	42	58	6,83	4,09	40	30	28	6,35	4,38	31	-12	-30	-4	X		
A	35	22	7,74	5,08	34	NR	NR	6,35	NR	NR	-	-	-	X	X	
G	44	66	6,77	3,51	48	37	35	6,35	3,43	46	-7	-31	1	X		
G	36	44	7,44	3,72	50	33	35	6,35	2,54	60	-3	-9	16	X		
G	48	79	6,88	3,20	53	33	42	6,35	4,06	36	-15	-37	-13	X	X	
G	55	57	7,37	3,67	50	39	35	6,35	4,45	30	-16	-22	-11	X		

Quadro 1 - Resultados do experimento com tecnologia de pig de perfilagem.

Percebe-se que das 57 anomalias comparadas, 35, equivalente a 61%, não foram relatadas. Destas 35, 32 (91%) tem sinais indicativos de crosta na região ou proximidade. Os sinais indicativos de crosta são sinais correspondentes a ganho de espessura. Das 35 que não foram relatadas, 23 (65%) tiveram registros de sinais na região ou proximidade que podem ser indicativos de perda de espessura.

Utilizou-se como uma base de avaliação dos resultados do experimento uma comparação com as especificações típicas para desempenho na medição das dimensões volumétricas de perdas de espessura da tecnologia do pig MFL de alta resolução. Esta comparação é meramente ilustrativa, pois as duas tecnologias têm campo de aplicação distintos. Segundo a *NACE International* (2000, p. 28), estas especificações típicas para desempenho na medição das dimensões volumétricas de perdas de espessura da tecnologia do pig MFL de alta resolução atendem às tolerâncias apresentadas no Quadro 2.

Largura (circunferencial)	± 10 a 17 mm		
Tipo de perda de metal	Profundidade (% da espessura de parede original)		Exatidão de medição do comprimento (± mm)
	Mínima detectada	Exatidão de medição (±)	
Generalizada	10	10	20
Alvéolo	10 a 20	10	10
Sulco axial	20	-15/+10	20
Sulco circunferencial	10	-10/+15	15
Risco circunferencial	10	-15/+20	15
Risco axial	Não mede		Não mede

Quadro 2 - Especificações típicas para tolerâncias para pig MFL de alta resolução. Conforme *NACE International* (2000, p. 28).

Das 23 anomalias detectadas, 16 (70%)¹⁷ não atenderam às especificações típicas para tolerância na medição das dimensões volumétricas de perdas de espessura da tecnologia do pig MFL de alta resolução. Destas 16, 15 (94%) têm crostas na região ou proximidade.

A classe de perda de espessura com maior frequência foi Generalizada e a com menor foi Pite.

¹⁷ Os números em azul no Quadro 1 indicam as dimensões em que isto ocorreu.

4.4 Discussão dos resultados

Esta discussão se refere a descontinuidades consideradas dentro campo de aplicação da tecnologia de pig de perfilagem.

Um fator fundamental para o desempenho desta tecnologia é a efetividade dos algoritmos dos softwares de processamento dos sinais captados pelo pig na compensação das variações nestes sinais decorrentes da influência dos fatores que demandam compensações. O desempenho da tecnologia de pig de perfilagem na detecção e na exatidão de medição das dimensões volumétricas de perdas de espessura na superfície interna da parede de um duto é dependente do desempenho dos softwares no processamento dos sinais. Este desempenho é favorecido por calibração de sensores precisa, desenvolvida e sistematizada para diminuir a variabilidade de calibração entre sensores.

O desempenho da tecnologia é maior o quanto menor for o quociente entre diâmetro do duto e espessura de parede, pois assim é menor a dificuldade para a tecnologia do pig de perfilagem discriminar entre o aumento de diâmetro interno devido à ovalização ou à variação no diâmetro e a perda de espessura generalizada na superfície interna. Como este quociente geralmente é maior para dutos de maiores diâmetros, esta dificuldade tende a ser maior para dutos de maiores diâmetros. Neste aspecto, o duto escolhido para o experimento é um duto que não favorece a exatidão de medição pesquisada.

A ocorrência de mais de uma entre ovalização, variação no diâmetro ou na espessura do tubo, o que é possível, torna ainda mais difícil a tecnologia do pig de perfilagem discriminar entre perda de espessura generalizada e aumento de diâmetro interno devido a esta ocorrência.

A limitação da tecnologia para detectar e medir as dimensões de perdas de espessura na superfície interna com profundidades inferiores à tolerância de fabricação dos tubos para a espessura de parede não é significativa. Isto se deve à própria natureza desta limitação, pois para a resistência estrutural do duto não faz diferença se uma espessura medida pelo pig dentro da tolerância de fabricação do

tubo é devida à fabricação ou devida ao desgaste em uso do tubo. Fatores de segurança de projetos de dutos compensam esta variação de espessura.

A influência da compensação do desgaste na extremidade das hastes do pig em contacto com a parede do duto no desempenho na exatidão de medição da profundidade da perda de espessura está relacionada à ocorrência de ovalização, variação no diâmetro e na espessura do tubo. A compensação deste desgaste tende a ser menos efetiva na ocorrência de ovalização, variação no diâmetro e na espessura do tubo. Quanto maior o quociente entre diâmetro do duto e espessura de parede, maior é esta tendência. Neste aspecto, o duto escolhido para o experimento não favorece a exatidão de medição pesquisada.

O desgaste na superfície interna do duto geralmente torna-a mais rugosa e abrasiva. Os pigs de perfilagem têm maior desgaste das hastes em dutos com maior desgaste em sua superfície interna. Superfície mais rugosa pode levar a maior vibração da estrutura do pig, o que talvez influencie a exatidão de medição pesquisada. O duto escolhido para o experimento é um duto com muito desgaste na superfície interna e, também neste aspecto, não favorece a exatidão de medição pesquisada.

A utilização das especificações típicas de desempenho na medição das dimensões volumétricas de perdas de espessura da tecnologia do pig MFL de alta resolução para verificar o desempenho da tecnologia de pig de perfilagem precisa ser considerada com ressalvas. Estas especificações são somente uma referência. As diferenças entre os princípios de funcionamento destas tecnologias naturalmente levam a variações diferentes dos seus desempenhos nas diversas classes de perda de espessura em dutos. Por exemplo, a tecnologia do pig MFL com as especificações típicas de desempenho apresentadas tem maior dificuldade na detecção e medição das dimensões de descontinuidades no sentido axial, do comprimento do duto, do que no sentido circunferencial, enquanto o inverso é mais provável para a tecnologia do pig de perfilagem.

No experimento o pig de perfilagem detectou crostas ligadas à parede ao longo do duto e em áreas de perda de espessura utilizadas nas medições para o experimento. Estas crostas estavam ligadas à parede do duto ao ponto de não terem

sido retiradas no programa de limpeza do duto que precedeu a passagem do pig de inspeção. Elas podem ter origem em processo corrosivo da parede do duto ou em processo de deposição de material a partir de substâncias presentes no fluido sendo escoado. Caracterizações químicas por difração de Raio X¹⁸, para identificação dos compostos retirados do duto por pig de limpeza, indicaram presença de Calcita (CaCO_3) e Barita (BaSO_4), que podem formar crostas firmemente ligadas à parede do duto, quando presentes condições para isto. Também indicaram presença dos produtos de corrosão Siderita (FeCO_3), Mackinawita (Fe_9S_8) e Lepidocrocita (gFeO.OH). Estes compostos retirados do duto por pig de limpeza estão entre os resíduos comumente encontrados em oleodutos.

Mais de 90% das áreas de perda de espessura não detectadas pelo pig de perfilagem no experimento bem como mais de 90% das que não atenderam às especificações de tolerância na medição tem crostas na região ou proximidade indicadas pelo pig de perfilagem. As áreas de perda de espessura detectadas pelo pig de perfilagem que não atenderam às especificações de tolerância na medição têm dimensões indicadas pelo pig menores que as dimensões reais, o que é coerente com a presença de crostas no local.

Apesar da presença de crostas ser um fator que prejudica o desempenho da tecnologia de pig de perfilagem na detecção e na exatidão de medição das dimensões volumétricas de perdas de espessura na superfície interna da parede de dutos, o modo de influência deste fator possibilita aplicação da tecnologia para soluções ainda demandadas, que são a detecção, a medição das dimensões e a localização de incrustações.

A velocidade do pig no experimento variou pouco. Desta forma, não foi possível avaliar a influência da velocidade no *overshoot* dos sensores. Esta velocidade é determinada pela velocidade de escoamento do fluido, que é normalmente levemente maior, até 10%, que a do pig. A velocidade de escoamento do fluido no experimento correspondeu a um regime de escoamento laminar.

¹⁸ Conforme Núcleo de Pesquisas em Petróleo e Gás Natural (2008). A difração de Raios-X foi realizada pelo método do pó, em um equipamento da marca Shimadzu modelo XRD – 6000, utilizando tubo de $\text{Cu-K}\alpha$, em voltagem de 40 kV, corrente de 20 mA, 2θ de 20 a 70°, com aquisição contínua de 2° por minuto. A partir dos dados em formato digital, os minerais foram identificados por meio do software HiScore.

5 CONCLUSÃO

São fatores que influenciam o desempenho da tecnologia de pig de perfilagem na detecção e na exatidão de medição das dimensões volumétricas de perdas de espessura na superfície interna da parede de um oleoduto em condições normais de inspeção de oleodutos com pig:

- Calibração de sensores com variação de erro;
- Ovalizações e variações de diâmetro e espessura de parede dos dutos, decorrentes da fabricação dos tubos;
- Desgaste da extremidade da haste em contacto com a parede do duto;
- Giro do pig sobre seu eixo;
- Descentralização e inclinação do pig em relação ao eixo do duto;
- *Overshoot* dos sensores em variações bruscas de espessuras ou em saliências na superfície interna da parede do duto;
- Contacto da haste do sensor com superfície de descontinuidade mais inclinada que a haste;
- Presença de moessa ou amassamento.

O experimento confirma que a ocorrência de crostas ligadas às superfícies internas nas paredes de dutos diminui o desempenho da tecnologia na detecção e na exatidão de medição das dimensões e que induz à indicação de dimensões menores que as reais.

A tecnologia de pig de perfilagem pode ser aplicada também na detecção, medição e localização de incrustações, além de perdas de espessura, na superfície interna da parede de dutos.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se que se desenvolvam trabalhos que possam contribuir para reduzir a variabilidade de calibração entre sensores, tais como, avaliar a influência da variabilidade de calibração entre sensores, definir um limite máximo para esta variabilidade e desenvolver técnicas e sistematizar procedimentos que garantam a variabilidade de calibração entre sensores dentro deste limite. Também sugere-se que se avalie as possíveis fontes de erros dos sensores Hall nos pigs de perfilagem, como por exemplo, variações de temperatura.

Sugere-se, também, que se correlacione a velocidade do pig com o overshoot dos sensores e se estude o projeto mecânico dos sensores para verificar a possibilidade de desenvolvê-lo no sentido de diminuir o overshoot.

Sugere-se, ainda, que se desenvolvam estudos para avaliar possíveis influências do regime de escoamento do fluido e da vibração da estrutura do pig na capacidade de detecção e na exatidão de medição das áreas de perda de espessura pelo pig de perfilagem.

Outro trabalho sugerido é correlacionar a capacidade de detecção de pig de perfilagem e sua exatidão de medição das dimensões volumétricas de perdas de espessura na superfície interna da parede de um duto com os processos de fabricação de tubos, diâmetros e espessura de parede de dutos para verificar a influência de ovalizações e variações de diâmetro e espessura de parede dos tubos decorrentes de sua fabricação.

A pesquisa de materiais e de processos de fabricação de hastes resistentes às condições comuns à inspeção de dutos com pig e com extremidade com resistência ao desgaste pode vir a melhorar o desempenho da tecnologia na exatidão de medição da profundidade das perdas de espessura.

Melhoria neste sentido também poderia ser obtida com o desenvolvimento de projetos de dispositivos que garantam a centralização do eixo do pig em relação ao eixo do duto em toda sua extensão.

A garantia de giro do pig ao longo do duto pode ser buscada estudando-se técnicas já utilizadas para isto em pigs de inspeção.

O desenvolvimento de projetos da ponta da haste em contacto com a parede do duto na extremidade de cada haste para que normalmente fique perpendicular a parede do duto pode evitar o subdimensionamento de descontinuidades devido ao contacto da haste do sensor com superfície mais inclinada que ela.

Para melhorar o desempenho da tecnologia na detecção e na exatidão de medição das dimensões volumétricas de perdas de espessura, convém desenvolver técnicas para detectar presença de moossa ou amassamento em região onde existe perda de espessura na superfície interna da parede do duto e para considerar esta presença para a detecção e a medição daquelas dimensões de perdas de espessura.

Convém avaliar a aplicação da tecnologia de pig de perfilagem na detecção, medição e localização de incrustações, pois ainda se busca o conhecimento de soluções para estas.

Em etapa mais avançada do desenvolvimento da tecnologia do pig de perfilagem, sugere-se o aperfeiçoamento dos softwares de processamento de sinais, no sentido de aperfeiçoar as compensações de sinais demandadas e o estabelecimento de um mapa de aplicação da tecnologia de pig de perfilagem conforme classificação dimensional de áreas de perda de espessura.

Também em etapa mais avançada do desenvolvimento da tecnologia do pig de perfilagem, sugerem-se pesquisas para o estabelecimento dos seguintes parâmetros:

- limiar (*threshold*) e probabilidade de detecção para cada classe dimensional de áreas de perda de espessura;
- exatidão de medição das dimensões de áreas de perda de espessura para cada classe dimensional de áreas de perda de espessura;
- exatidão na localização de áreas de perda de espessura;

- probabilidade de identificação de componentes de duto e de outros tipos de anomalia que não perda de metal;
- Repetitividade e a reprodutibilidade dos resultados.
- Sensibilidade aos fatores que pode influenciar seu desempenho.

Por fim, é sugerida a delimitação das faixas de aplicabilidade da tecnologia definidas por parâmetros relacionados a fatores que influenciam seu desempenho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **RP 580**: risk-based inspection: API recommended practice 580. Washington, 2002.

_____. **STD 1163**: in-line inspection systems qualification standard. Washington, 2005.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **Manual for determining the remaining strength of corroded pipelines**: a supplement to ASME B31 code for pressure piping - ASME B31G-1991. New York, 1991.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **ASME Boiler and Pressure Vessel Code. Section V**: Nondestructive Examination. New York, 2007.

ASTM INTERNATIONAL. **E 456 – 8**: Standard Terminology Relating to Quality and Statistics. West Conshohocken, 2008.

BENJAMIN, A. C. **Avaliação estrutural de dutos corroídos**. Rio de Janeiro: Universidade Corporativa Petrobras, 2004. v.1 (Notas de aula).

CALEYO, F.; GONZALEZ, J.; HALLEN, J. A study on the reliability methodology for pipelines with active corrosion defects. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, v. 79. p. 77-86, 2002.

CAMERINI, C. et al. Comparação do resultado de 3 técnicas de inspeção com pigs instrumentados em um mesmo oleoduto da bacia de campos. In: RIO PIPELINE CONFERENCE, 2005, Rio de Janeiro. **Technical papers...** Rio de Janeiro: IBP, 2005. 1 CD-ROM

_____. Feeler pig: a simple way to detect and size internal corrosion. In: INTERNATIONAL PIPELINE CONFERENCE, 7th, 2008, Calgary. **Proceedings...** New York: ASME, 2008. 1 CD-ROM (IPC 2008-64626).

CARVAJALINO, J. J. L.; MARANGONE, F. C.; FREIRE, J. L. F. Performance of in-line inspection tools and their influence on the structural reliability of corroded pipeline. In: INTERNACIONAL PIPELINE CONFERENCE, 6th, 2006, Calgary, 2006). **Proceedings...** New York: ASME, 2006. 1 CD-ROM.

CHOCHAOU, B. A.; PICK, R. J. A three level assessment of the residual strength of corroded line pipe. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON OFFSHORE MECHANICS AND ARCTIC ENGINEERING, 13th., 1994, Houston. **Proceedings...** New York: ASME, 1994. v. 5. p. 9-18.

DET NORSKE VERITAS. **DNV-RP-F101**: corroded pipelines. Norway, 1999.

DESJANDINS, G.; REED, M.; NICKLE, R. ILI performance verification and assessment using statistical hypothesis testing. In: INTERNACIONAL PIPELINE

CONFERENCE, 6th., 2006, Calgary. **Proceedings...** New York: ASME, 2006. 1 CD-ROM.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **Form deviations. Concepts. Classification system** - DIN 4760. Berlin, 1982.

EUROPEAN PIPELINE OPERATORS FORUM. **Specifications and requirements for intelligent pig inspection of pipelines.** Version 3.2. 2005. Disponível em: <<http://www.iliassociation.org/industrydocuments.shtml>> Acesso em: 4 jun. 2009.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. **Vocabulário internacional de termos fundamentais e gerais de Metrologia**: portaria INMETRO nº 029 de 1995 / INMETRO, SENAI - Departamento Nacional. 5. ed. Rio de Janeiro: SENAI, 2007. 72 p.

INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION. **ISO 14224:2006(E)**: petroleum, petrochemical and natural gas industries: collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment. 2nd ed. Geneva, 2006

_____. **ISO 16708:2006(E)**: petroleum and natural gas industries: pipeline transportation systems — Reliability-based limit state methods. Geneva, 2006.

_____. **ISO 3183:2007 (Modified)**. ANSI/API Specification 5L: petroleum and natural gas industries - steel pipe for pipeline transportation systems. 44th ed. Washington: API Publishing Services, 2007.

JANVROT, I. V. M. **Compensando a ovalização da linha no software Pig Palito.** Versão 0.1. Rio de Janeiro: Pipeway Engenharia LTDA, 2008. (Relatório Técnico Interno, Arquivo eletrônico: Correcao-ovalizacao-pig-palito.pdf.) 30 p. Não publicado.

_____. **Relatório de comparação dos resultados do Pig Palito com os de Ultrassom de Varredura no duto ET-A / ET-O GMR 24" 53.1 km.** Rio de Janeiro: Pipeway Engenharia LTDA, 2008. (Relatório Técnico Interno PBR-PP-001-RL02-01-191207-1601-00-P, Arquivo eletrônico: Comparacao-palito-ut-24pol.pdf.) 24 p. Não publicado.

_____. **Relatório de Avaliação de Corrida de Pig Palito no duto CAM-CENTRAL/ET-A 16" 55.8 km.** Rio de Janeiro: Pipeway Engenharia LTDA, 2008. (Relatório Técnico Interno PBR-PP-001-RL01-01-191207-1601-00-P, Arquivo eletrônico: Avaliacao-corrída-palito-16.pdf) 27 p. Não publicado.

_____. **Relatório Parcial de Inspeção por pig palito:** Petrobras UN-RNCE - Oleoduto ET-A / ET-O GMR 24" 53.1 km. Rio de Janeiro: Pipeway Engenharia LTDA, 2008. (Relatório Técnico Interno PBR-PP-001-RL03-171207-2401-00-P, Arquivo eletrônico: PALITO_PBR-PP-001-RL03-171207-2401-00-P.pdf) 48 p. Não publicado.

JOINT COMMITTEE ON STRUCTURAL SAFETY. **JCSS: Probabilistic Model Code.** 2001. Disponível em: <http://www.jcss.ethz.ch/publications/publications_pmc.html> Acesso em: 24 ago. 2008.

KASTNER, W. et al. Critical crack sizes in ductile piping. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, London: Applied Science Publishers Ltd, v.9, p. 197-219, 1981.

KIEFNER, J. F. et al. **Failure Stress Levels of Flaws in Pressurized Cylinders, Progress in Flaw Growth and Fracture Toughness Testing.**, Philadelphia: ASTM, 1973. p. 461-481. (ASTM Special Technical Publication, 536).

KIEFNER, J. F., VIETH, P. H. **A Modified criterion for evaluating the remaining strength of corroded pipe.** Columbus: Battelle Memorial Institute, 1989. (Final Report on project PR 3-805).

MAES, M.A.; FABER, M.H. Spatial effects in risk-based design and maintenance of pipelines. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON OFFSHORE MECHANICS AND ARCTIC ENGINEERING, 26th., 2007, San Diego. **Proceedings...** San Diego: ASME, 2007.

MAES, M. A.; DANN, M.; SALAMA, M.M. Impact of in-line inspection uncertainties on decision making regarding pipeline integrity. In: CORROSION CONFERENCE, 63. 2008, New Orleans. **Conference papers...** Houston: NACE, 2008. 1 CD-ROM.

MCCANN, R.; MCNEALY, R.; GAO M. In line inspection performance verification. In: CORROSION CONFERENCE, 62., 2007, Nashville. **Conference papers ...** Houston: NACE, 2007. 1 CD-ROM.

MORRISON, T. et al. Statistical estimation of flaw size measurement errors for steam generator inspection tools. In: INTERNATIONAL STEAM GENERATOR AND HEAT EXCHANGER CONFERENCE, 4TH., 2002, Toronto. **Proceedings...** Toronto: CNS, 2002. 1 CD-ROM.

NATIONAL ASSOCIATION OF CORROSION ENGINEERS INTERNACIONAL. **In-Line Nondestructive Inspections of Pipelines.** Houston: NACE, 2000.

_____. **RP0102-2002:** In-Line Inspection of Pipelines. Houston, 2002.

NÚCLEO DE PESQUISAS EM PETRÓLEO E GÁS NATURAL. **Relatório Técnico CCI2008.04-2 C1.** Natal: UFRN, 2008. (Arquivo eletrônico: CCI2008.04-2 C1..pdf) 1 p. Não publicado.

PHYSICAL ACOUSTICS SOUTH AMERICA – PASA. **Relatório de ultra-som automatizado N°UA-0490.** São Paulo, 2008. 83 p. Não publicado

PIPEWAY ENGENHARIA LTDA. **Relatório de inspeção por pig palito:** Petrobras UN-RNCE - CAM-CENTRAL/ET-A 16" 55.8 km. Rio de Janeiro, 2008. (Relatório Técnico Interno PBR-PP-001-RL02-01-191207-1601-00-P, Arquivo eletrônico: PBR-PP-001-RL02-01-191207-1601-00-P.pdf.) 24 p. Não publicado.

TOSIN, G. **Sistema de alta precisão para as medições dos campos magnéticos**

dos dispositivos de inserção do Laboratório Nacional de Luz Síncrotron. 2005
113 p. Tese (doutorado) - Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação,
Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

GLOSSÁRIO

B Scan - Método de apresentação gráfica dos resultados de uma série de medições de espessura por ultra-som que mostra, em escala, o perfil da seção transversal da peça.

BSW - *Basic Sediment and Water*. Teor de água e sedimentos.

Comprimento (de descontinuidade em duto) - Dimensão na direção longitudinal ao duto.

C Scan - Método de apresentação gráfica dos resultados de uma série de medições de espessura por ultra-som que mostra, em escala de cores, o mapeamento de espessuras de uma área da peça.

Descontinuidade circunferencial - Descontinuidade com largura maior que o comprimento.

Descontinuidade longitudinal - Descontinuidade com comprimento maior que a largura.

Diâmetro nominal- Diâmetro de referência, conforme especificado no padrão internacional de tubos para dutos de petróleo e gás natural, que é a norma API Specification 5L/ISO 3183 (*INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION, 2007*).

Dimensões volumétricas - Comprimento, largura e profundidade.

Espessura nominal de parede - Espessura da parede do tubo conforme especificada no padrão internacional de tubos para dutos de petróleo e gás natural, que é a norma API Specification 5L/ISO 3183 (*INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION, 2007*).

Grau API – Padrão de indicação da densidade relativa de um óleo ou derivado. A escala API varia inversamente à densidade relativa.

Largura (de descontinuidade em duto) - Dimensão circunferencial, correspondente ao arco de circunferência do diâmetro externo da seção transversal.

MFL - *Magnetic Flow Leakage*. Método de ensaio não destrutivo que indica perdas de espessuras em peças, baseado em desvio de fluxo magnético em material ferromagnético.

Overshoot - Afastamento do sinal de resposta em relação ao que deveria ser indicado.

Pig - Dispositivo sólido, introduzido em tubulações, deslocado pela vazão do fluido.

Pig instrumentado - Pig dotado de sensores e dispositivos para armazenamento dos dados coletados pelos sensores. Destina-se a medir e registrar determinado(s) parâmetro(s) ao longo do duto.

Pig de inspeção – Pig instrumentado para parâmetros que podem subsidiar a avaliação da integridade de dutos.

Pig de inspeção de perda de espessura – Pig de inspeção que detecta, localiza e dimensiona perdas de espessura de parede de duto.

Pig MFL – Pig instrumentado de inspeção de perda de espessura baseado em medições de desvio de fluxo magnético.

Pig de perfilagem - Pig instrumentado de inspeção de perda de espessura baseado em medições da inclinação de hastes de sensores em contacto com a parede do duto.

Pig palito – O mesmo que pig de perfilagem.

Pite – Perda de metal com formato pontiagudo, com profundidade maior que a largura e comprimento.

Pitiforme – Em formato de pite.

Tolerância - Valores extremos de um erro admissível por especificações, regulamentos etc., para um dado instrumento de medição.

Transdutor Hall – Transdutor feito de semicondutor, utilizado para medição de campo magnético local.

Repetitividade - Precisão dos resultados de teste quando estes são obtidos com os mesmos métodos e itens de testes idênticos no mesmo laboratório e com o mesmo operador usando o mesmo equipamento em intervalos de tempo curtos. Aqui, entende-se laboratórios como sendo dutos.

Reprodutibilidade - Precisão dos resultados de teste quando estes são obtidos com os mesmos métodos e itens de teste idênticos, porém, em laboratórios diferentes e com operadores diferentes usando equipamentos diferentes. Aqui, entende-se laboratórios como sendo dutos.

ZTA – Zona termicamente afetada pela união soldada.

APÊNDICE A – A EQUAÇÃO NG-18

A equação *NG-18 Surface Flaw Equation* (KIEFNER et al., 1973 apud BENJAMIM, 2004, p. 1) é a origem dos métodos semi empíricos definidos por Chochaoui e Pick (1994) como de primeiro nível para avaliação local da integridade de dutos com descontinuidades cujas dimensões longitudinais e circunferenciais são maiores ou iguais à profundidade. Ela é expressa por:

$$\sigma_{rup} = \sigma_{flow} \left[\frac{1 - \frac{A}{A_0}}{1 - \left(\frac{A}{A_0}\right) \cdot M^{-1}} \right]$$

σ_{rup} – Tensão circunferencial da parede do duto com perda de espessura, numa região fora da região com perda de espessura, no instante da ruptura.

σ_{flow} – Tensão de escoamento média do material (*Flow Stress*).

A - Área longitudinal do material perdido.

A_0 - Área longitudinal original do material.

M – Fator de dilatação¹⁹ (*Bulging factor ou Folias factor*), expresso por:

$$M = \left[1 + 0,6275 \cdot \frac{L^2}{Dt} - 0,003375 \left(\frac{L^2}{Dt} \right)^2 \right]^{1/2}$$

L – Comprimento da perda de metal.

D – Diâmetro externo do tubo.

t – Espessura nominal do tubo.

¹⁹ Inserido para considerar o efeito de bolha (*Bulging*) que ocorre ao pressurizar um local com perda de espessura.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)