

Thiago Salcedo

Análise do Sensor de um Pig Instrumentado do Tipo Palito

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Arthur Martins Barbosa Braga

Rio de Janeiro
Outubro de 2009

Thiago Salcedo

Análise do Sensor de um Pig Instrumentado do Tipo Palito

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Arthur Martins Barbosa Braga

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica - PUC-Rio

Prof. Jean Pierre von der Weid

CETUC - PUC-Rio

Prof. Marcelo Roberto Baptista Pereira Luís Jimenez

CETUC - PUC-Rio

Prof. João Marcos Alcoforado Rebello

COPPE/UFRJ

Dr. Sergio Ricardo Kokay Morikawa

PETROBRAS

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador(a) Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 20 de outubro de 2009

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Thiago Salcedo

Graduou-se em Engenharia Elétrica na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro em 2005. Atuou como estagiário, técnico e engenheiro de projetos de pesquisa em tecnologias de inspeção, parceria entre o CPTI/CETUC/PUC-Rio e o CENPES/PETROBRAS, de 2004 a 2009. E neste período colaborou ativamente no desenvolvimento de pigs instrumentados para detecção e dimensionamento de perda de espessura em dutos.

Ficha Catalográfica

Salcedo, Thiago

Análise do sensor de um pig instrumentado do tipo palito / Thiago Salcedo ; orientador: Arthur Martins Barbosa Braga. – 2009.

92 f. : il. (color.) ; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

Inclui bibliografia

1. Engenharia mecânica – Teses. 2. Corrosão interna. 3. Engenharia de dutos. 4. Inspeção de dutos. 5. Petróleo. 6. Pigs instrumentados. 7. Pig palito. I. Braga, Arthur Martins Barbosa. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. III. Título.

CDD: 621

Aos meus pais.

Agradecimentos

A Deus pela ajuda na minha força de vontade, determinação e em tudo que eu conquistei na minha vida.

Aos meus pais pelo apoio, paciência, incentivo e suporte durante toda minha vida acadêmica e profissional.

A minha namorada Ana Helena Costa pela paciência, incentivo e apoio durante toda a minha dissertação de mestrado.

Aos amigos Rodrigo Carvalho Ferreira e Daniel Camerini pelo apoio e auxílio neste trabalho.

Ao professor Arthur Martins Braga pela paciência e orientação neste trabalho.

Ao professor Jean Pierre Von der Weid pela oportunidade de trabalho no Centro de Pesquisa de Tecnologias de Inspeção (CPTI).

Aos engenheiros Claudio Camerini e Miguel Freitas pela oportunidade e apoio nos trabalhos com pigs instrumentados.

Ao engenheiro José Augusto Pereira da Silva pelos importantes conselhos durante esta dissertação.

À equipe do Centro de Pesquisas e Tecnologias de Inspeção (CPTI) pelo apoio, testes e inspeções com Pigs Palito: Miguel Freitas, Marcelo Jimenez, Henrique Benincaza, Christiano Goulart, Guttemberg Coelho, Felipe dos Santos, Rafael Honório, Edgard Vieira, Felipe Oliveira, Rodrigo Oliveira, Monica Farias, David Viana, Maximilien Bayser, Ramon da Silva, Flavio da Silva, Rodrigo Castro, Sergio Paes, Samir Caki, Adriana Nazario, Daniel Mendes, Thieplo Bertola e, em especial, Luiz Domingos e Nilson Souza.

Resumo

Salcedo, Thiago; Braga, Arthur Martins Barbosa. **Análise do Sensor de um Pig Instrumentado do Tipo Palito**. Rio de Janeiro, 2009. 92p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Este trabalho apresenta a análise do sistema de medição utilizado pelo pig instrumentado tipo palito usado para detecção e dimensionamento de perda de espessura em dutos provocada por corrosão interna. A aplicação de testes experimentais de vibração, perfilagem geométrica e análise por elementos finitos têm objetivo de avaliar o sistema de medição dos sensores palito do Pig Palito, assim como mostrar os resultados obtidos com esta nova tecnologia de dimensionamento de micro geometria. Os dutos submarinos (*offshore*) empregam tradicionalmente as mesmas tecnologias de inspeção usadas em dutos terrestres (*onshore*) e uma dessas tecnologias é o pig instrumentado. No entanto, é encontrada uma vasta quantidade de dutos *offshore* com diferentes tipos de obstáculos que inviabilizam o uso dos pigs instrumentados convencionais, como os Pigs Magnéticos M.F.L. (*Magnetic Flux Leakage*) e Ultrassônicos. Os fatores relevantes que dificultam a inspeção, especialmente em dutos *offshore*, são os multi-diâmetros, raios de curvatura acentuados, equipamentos instalados ao longo do duto, alta espessura de parede do duto, escoamento multifásico, etc. Atualmente, o uso de Pigs Ultrassônicos e Magnéticos são as técnicas disponíveis no mercado para inspeção da corrosão. Contudo, esses pigs possuem suas próprias limitações. Dentro deste contexto, foi desenvolvido um novo pig instrumentado, chamado de Pig Palito, para detecção e dimensionamento de perda de espessura em dutos com corrosão interna. Esta ferramenta foi desenvolvida para superar diversas limitações que outros pigs instrumentados convencionais têm durante a inspeção. Os resultados obtidos pela instrumentação do sensor palito na análise experimental indicam que a vibração dos sensores pode interferir na medição de micro geometria gerando erros de interpretação. A possibilidade de detecção, minimização e/ou eliminação desta possível deficiência do sensor palito são factíveis e abordadas na presente dissertação. Os bons resultados das inspeções de campo com os Pigs Palito

comprovam o sucesso e viabilidade técnica no emprego desta tecnologia.

Palavras-chave

Corrosão Interna; Engenharia de Dutos; Inspeção de Dutos; Petróleo;
Pigs Instrumentados; Pig Palito.

Abstract

Salcedo, Thiago; Braga, Arthur Martins Barbosa (Advisor). **Analysis of the Sensing System of a Feeler Pig**. Rio de Janeiro, 2009. 92p. MSc. Dissertation - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This work presents the analysis and study of the technology used by the instrumented pig called Feeler Pig, used for detection and measurement of loss of wall thickness in pipelines due to internal corrosion. Those study's objective are the evaluation of dynamic measurement of Feeler Pig's sensors, through the application of experimental vibration tests, geometric evaluation's tests and finite elements analysis, so that are showed the results rewarded by this new micro geometric measurement technique. Submarine pipelines (offshore pipelines) inspection traditionally employs the same technologies used for onshore pipelines and one of such technologies is the instrumented pig. However, it is very common to find offshore pipelines with many kinds of obstacles that may prevent the use of conventional instrumented pigs, like MFL (Magnetic Flux Leakage) pigs and ultrasonic ones. The relevant factors that make the inspection difficult, particularly in offshore pipelines, are the different diameters along the pipeline, small radius bends, equipments installed in the pipeline (such as manifolds and valves), increased wall thickness, multi-phase fluids, etc. Currently available techniques in the market to inspect these pipelines are ultrasonic and magnetic pigs, which, nevertheless, have their own limitations. Focusing on this context, a new tool was developed to detect and measure the loss of wall thickness in pipelines due to internal corrosion. This tool, called Feeler Pig, was designed to be able to overcome some of the limitations of conventional inspection pigs. The results achieved by instrumentation of the feeler type sensor's body, experimental analysis tests, proved that vibration modes of the sensor interferes in the measurement of micro geometric. The possibility of detection, mitigation and / or elimination of the deficiencies of sensor's issues are viable and addressed in this work. These, coupled with the excellent results of Feeler Pigs field inspections prove the technical feasibility and success in using this technology.

Keywords

Internal Corrosion; Pipeline Engineering; Pipeline Inspection;
Petroleum; Instrumented Pigs; Feeler Pig.

Sumário

1	Introdução	18
2	Sistemas de Medição de Corrosão Interna em Dutos	22
2.1	Tipos de Corrosão Interna em Dutos	22
2.2	Sistemas de Monitoração de Corrosão Interna	25
2.3	Pigs instrumentados	27
2.3.1	Pig Magnético MFL	28
2.3.2	Pig Ultrassônico	30
2.3.3	Pig Geométrico	31
3	Pig Palito – Fundamentos e Conceitos Básicos	33
3.1	Motivação	34
3.2	Princípio de funcionamento	35
3.3	Calibração	37
3.3.1	Transdutor de efeito <i>Hall</i>	40
3.3.2	Faixa de Operação do Sensor Palito	43
3.3.3	Polinômio de Calibração	47
3.4	Materiais	49
4	Análise do sistema de medição	52
4.1	Limitações do sistema de medição	52
4.1.1	Testes de Bancada	54
4.1.2	Detecção do efeito de <i>overshoot</i> no sensor palito	77
4.2	Pré-conceitual para nova versão de sensor palito	79
4.3	Resultados de inspeções de campo do Pig Palito	80
4.3.1	Pig Cobra Palito	80
4.3.2	Pigs Palito Convencionais	83
5	Conclusão e Perspectivas Futuras	89

Lista de figuras

Figura 1 - Corrosão interna generalizada	23
Figura 2 - Corrosão puntiforme	23
Figura 3 - Corrosão Galvânica	24
Figura 5 - Cupons de corrosão	26
Figura 6 - Pig Magnético	28
Figura 7 - Esquemático do fluxo magnético de fuga na parede do duto	29
Figura 8 - Pig Ultra-Sônico	30
Figura 9 - Pig Geométrico	31
Figura 10 - Sensores palito perfilando uma superfície com defeito	35
Figura 11 - Sensor palito. Imãs da haste (a), base (b), sensor <i>Hall</i> (c), eixo (d)	36
Figura 12 - Visão frontal da ferramenta com distribuição de sensores palito.	36
Figura 13 - Pig Palito em calibração na bancada	39
Figura 14 - Teste de calibração no CTDUT	39
Figura 15 - Visão da parede interna do duto após passagem do Pig Palito	40
Figura 16 - Princípio do efeito Hall	41
Figura 17 - Ilustração das linhas de fluxo magnético atravessando o sensor de efeito <i>Hall</i>	42
Figura 18 - Ilustração do sensor <i>Hall</i> dentro do eixo de rotação do sensor, imãs e chapa ferromagnética	43
Figura 19 - Curvas do sinal de saída vs. densidade de fluxo magnético do transdutor <i>Hall</i>	45
Figura 20 - Ilustração do sinal característico do sensor <i>Hall</i>	45
Figura 21 - Ilustração do estudo da faixa operacional do sensor palito	46
Figura 22 - Foto dos sensores palito no disco giratório	47
Figura 23 - Imagem do sinal amostrado com cotas de calibração	48
Figura 24 - Fotos do teste de desgaste com palitos de aço prata	50
Figura 25 - Configuração mista do palito com ponteira de cerâmica	51

Figura 26 - Simulação do sensor palito apalpando alvéolo	53
Figura 27 - Bancada instrumentada. Câmera de alta velocidade (a). Acelerômetro da mesa (b). Placa de condicionamento de sinais (c). Sensores palito (d)	54
Figura 28 - Foto dos sensores palito durante a perfilagem no disco com alvéolos	55
Figura 29 - Curva de resposta em frequência do filtro digital aplicado ao sensor <i>Hall</i>	56
Figura 30 - Histograma do ruído elétrico medido no sensor palito 1	57
Figura 31 - Histograma do ruído elétrico medido no sensor palito 2	57
Figura 32 - Histograma do ruído medido no sensor palito 3	58
Figura 33 - Escadinha de calibração (3D) de dados dos sensores palito no disco	60
Figura 34 - Sensores palito medindo alvéolo de 20x10 mm (DxP)	60
Figura 36 - Sensores palito medindo alvéolo de 12x6 mm (DxP)	61
Figura 38 - Sensor palito (2) medindo alvéolo de 5 x 2.5 mm (DxP)	62
Figura 39 – Ilustração da profundidade alcançada pelo sensor palito em alvéolo	63
Figura 40 - Solda manufaturada no disco de prova	64
Figura 41 - Palito (2º modo de vibração) com malha de elementos finitos	65
Figura 42 - Ilustração dos modos de vibração do palito (bi-engastado)	65
Figura 43 - Ilustração dos modos de vibração do palito (engastado na base)	66
Figura 44 - Sinais dos transdutores <i>Hall</i> e extensômetro ao apalpar uma solda	68
Figura 45 - Sensor Palito Instrumentado com extensômetro e acelerômetro	69
Figura 46 - Sinais de geometria, flexão e aceleração no palito na perfilagem da solda	69
Figura 47 - Sinal e energia do espectro de frequências do acelerômetro de mesa	70
Figura 48 - Espectro de frequências do sinal do extensômetro	

da Figura 46	71
Figura 49 - Oscilação do sinal do sensor palito no domínio da frequência e do tempo	71
Figura 50 - Espectro e sinal do acelerômetro fixado no palito	72
Figura 51 - Sinal dos sensores palito 1, 2 3 perfilando a solda do disco	73
Figura 52 - Sincronismo de fotos da câmera de alta velocidade com vibração do palito	75
Figura 53 - Sincronismo de fotos da câmera de alta velocidade com vibração do palito (2)	76
Figura 54 - Sinal (verde) e derivada do sinal do sensor (azul) na perfilagem da solda manufaturada.	78
Figura 55 - Trecho de inspeção com <i>overshoot</i> (a). (b) zoom de (a), (c) zoom de (b).	78
Figura 56 - Histograma da taxa do sinal (dy/dx) do sensor	79
Figura 57 - Pig Cobra Palito (1) Vaso de bateria, (2) Vaso de eletrônica, (3) Coroa instrumentada, (4 e 6) Copos de sustentação e tração, (5) Hôdometro.	81
Figura 58 - Pig Cobra Palito no canhão do recebedor	82
Figura 59 - Superfície interna da parede do <i>Riser</i> (" <i>flexbody layer</i> ") - (a) corte longitudinal	82
Figura 60 - Soldas circunferenciais (a) e tubo com diâmetro maior (b) no duto	83
Figura 61 - Pig Palito de 22 pol.	83
Figura 62 - Gráfico comparativo de dados entre o Pig Ultra-Sônico e Palito	84
Figura 63 - Imagem de corrosão interna detectada no duto pelo Pig Ultra-Sônico	84
Figura 64 - Corrosão interna detectada pelo Pig Palito de 22 pol. e pedaço ampliado da imagem em gráfico de linhas.	85
Figura 65 - " <i>Channeling Corrosion</i> " causada por alta produção de água junto ao óleo	85
Figura 66 - Lançamento do Pig Palito de 24 pol.	86
Figura 67 - Pig Palito de 24 pol. no recebedor	86

Figura 68 - “ <i>Channeling corrosion</i> ” mais gráfico de linhas do pedaço selecionado	87
Figura 69 - Visão da superfície do duto com depósitos (a) e corrosão uniforme (b) detectada pelo software da Pipeway.	87
Figura 70 - Visão da superfície interna do duto sem corrosão, com soldas circunferencial e longitudinal (a) e região de desgaste de solda (b).	88
Figura 71 - Depósito (a) encontrado em duto (imagem do <i>software</i>)	88

Lista de equações

Equação 1 – Cálculo da resolução circunferencial nominal do Pig Palito	36
Equação 2 – Tensão de saída do elemento <i>Hall</i>	41
Equação 3 – Intensidade de fluxo magnético	41
Equação 4 - Polinômio quadrático e seus coeficientes	47
Equação 5 - Somatório dos quadrados das diferenças entre a curva ajustada e os dados adquiridos	48
Equação 6 – Derivada parcial da soma dos quadrados da diferença das distâncias	48

Lista de tabelas

Tabela 1 – Tabela de desgaste do palito	50
Tabela 2 – Tabela de médias e desvios padrões do ruído elétrico de cada sensor palito	57
Tabela 3 – Tabela de equações de distância do sensor em função de sua aquisição	59
Tabela 4 – Resumo de medidas de alvéolos no disco de prova	63
Tabela 5 - Profundidade efetiva de medição versus medida do sensor palito central	63
Tabela 6 - Modos de vibração do palito (bi-engastado) e características de malha	66
Tabela 7 - Modos de vibração do palito (engastado na base) e características de malha	67
Tabela 8 - Tabela de folgas entre as hastes e a base do sensor palito	74