

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de  
Materiais

PPGE3M

SISTEMA AUTÔNOMO DE INSPEÇÃO DE DUTOS

Giovani Geremia

Dissertação para obtenção do título de Mestre  
em Engenharia

Porto Alegre  
2012

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de  
Materiais

PPGE3M

## SISTEMA AUTÔNOMO DE INSPEÇÃO DE DUTOS

GIOVANI GEREMIA  
Engenheiro Mecânico

Trabalho realizado no Departamento de Metalurgia da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Ciência e Tecnologia dos Materiais

Porto Alegre  
2012

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração em Ciência e Tecnologia dos Materiais, e aprovada em sua forma final, pelo orientador e pela Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Thomas Gabriel Rosauro Clarke, do PPGE3M/UFRGS

Prof. Dr. Adib Paulo Abdalla Kurban, da PETROBRAS

Dr. Rubem Manoel de Braga, do DEMET/UFRGS

Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker  
Coordenador do PPGEM

*"No caráter, na conduta, no estilo, em todas as coisas, a simplicidade é a suprema virtude."*

*(Henry Wadsworth Longfellow)*

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente e acima de tudo, a Deus;

Especialmente aos meus pais, Rosalene Osmarin Geremia e Olavo Geremia;

Especialmente a minha esposa Vania Ferraz Fraga, pelo companheirismo;

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul pelo ensino público, gratuito e de qualidade;

Ao programa de pós-graduação PPGE3M e aos professores e funcionários que compõem seu corpo técnico;

Aos professores do curso de Engenharia Mecânica pelos conhecimentos transmitidos ao longo da minha graduação;

Ao Laboratório de Metalurgia Física pelas oportunidades durante todo o meu período de formação profissional, e por acreditar na idéia;

Ao Prof. Telmo Roberto Strohaecker pela orientação e incentivo;

A todos que são ou passaram pelo grupo RCA – Robótica, Controle e Automação durante todo o período do projeto, pela ajuda em todas as situações;

À Petrobras, em especial ao CENPES e a todos os seus integrantes que orientaram e incentivaram este desenvolvimento;

À Instor Sistemas de Inspeção Robótica e a todos os integrantes;

Ao M.Sc. Eng. Miguel Ignácio Serrano, pela sociedade, parceria e amizade.

## SUMÁRIO

<b>SUMÁRIO.....</b>	<b>6</b>
<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>9</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>12</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>13</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>14</b>
<b>1     INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
1.1    MOTIVAÇÃO .....	16
1.2    OBJETIVOS .....	17
<b>2     REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>18</b>
2.1    DUTOS E TUBULAÇÕES.....	18
2.1.1 <i>Dutos</i> .....	21
2.1.2 <i>Produtos transportados</i> .....	22
2.1.2.1    Óleo e gás .....	22
2.1.2.2    Biocombustíveis.....	23
2.1.2.3    Hidrogênio.....	23
2.1.2.4    Água e esgoto.....	23
2.1.3 <i>Operação</i> .....	24
2.2    CORROSÃO .....	25
2.2.1 <i>Formas de corrosão</i> .....	28
2.2.1.1    Corrosão uniforme.....	29
2.2.1.2    Corrosão por placas.....	29
2.2.1.3    Corrosão alveolar .....	29
2.2.1.4    Corrosão puntiforme.....	29
2.2.1.5    Corrosão intergranular.....	30
2.2.1.6    Corrosão intragranular.....	30
2.2.1.7    Corrosão sob tensão.....	30
2.2.1.8    Corrosão por frestas.....	31
2.2.1.9    Empolamento pelo hidrogênio .....	31
2.2.1.10   Corrosão por cavitação .....	31
2.2.2 <i>Como minimizar os efeitos da corrosão</i> .....	32
2.3    CORROSÃO DE DUTOS .....	33

2.4	ENSAIOS NÃO-DESTRUTIVOS .....	40
2.4.1	<i>Ensaio visual.....</i>	43
2.4.2	<i>Líquidos Penetrantes.....</i>	43
2.4.3	<i>Partículas Magnéticas.....</i>	44
2.4.4	<i>Radiografia, Radioscopia e Gamagrafia.....</i>	45
2.4.5	<i>Correntes Parasitas .....</i>	46
2.4.6	<i>Análise de Vibrações.....</i>	47
2.4.7	<i>Termografia.....</i>	47
2.4.8	<i>Emissão Acústica .....</i>	48
2.5	ULTRASSOM .....	49
2.5.1	<i>Ultrassom – Medição de Espessura .....</i>	50
2.5.2	<i>Características de uma onda sônica .....</i>	52
2.5.3	<i>Geração da onda ultra-sônica .....</i>	54
2.5.4	<i>Tipos de transdutores de ultrassom.....</i>	55
2.5.5	<i>Interface Transdutor-Meio: Acoplantes. ....</i>	58
2.5.6	<i>Aparelhos de ultrassom.....</i>	59
2.6	INSPEÇÃO DE DUTOS .....	61
<b>3</b>	<b>DESENVOLVIMENTO .....</b>	<b>69</b>
3.1	ROBÔ DE INSPEÇÃO DE DUTOS – HISTÓRICO DE DESENVOLVIMENTO.....	69
3.1.1	<i>Protótipo conceitual.....</i>	70
3.1.2	<i>Equipamento final.....</i>	73
3.1.2.1	<i>Módulo de anéis bipartidos.....</i>	74
3.1.2.2	<i>Módulo de rodas longitudinais.....</i>	74
3.1.2.3	<i>Módulo rotacional de cabeçotes de ultrassom .....</i>	75
3.1.2.4	<i>Régua de Sensores.....</i>	75
3.1.2.5	<i>Eletrônica de controle.....</i>	76
3.1.2.6	<i>Modos de funcionamento.....</i>	78
3.2	TESTES .....	79
3.2.1	<i>Testes em laboratório.....</i>	79
3.2.1.1	<i>Testes de movimentação.....</i>	79
3.2.1.2	<i>Teste de medição geométrica externa .....</i>	80
3.2.1.3	<i>Teste com sistema de ultrassom embarcado.....</i>	81
3.2.2	<i>Testes em campo .....</i>	81
3.2.3	<i>Testes em duto de demonstração.....</i>	82
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>85</b>
4.1	TESTES .....	85
4.1.1	<i>Testes em laboratório.....</i>	85

4.1.1.1	Testes de movimentação.....	85
4.1.1.2	Teste de medição geométrica externa .....	87
4.1.1.3	Teste com sistema de ultrassom embarcado.....	91
4.1.2	<i>Testes em campo</i> .....	93
4.1.3	<i>Testes em duto de demonstração</i> .....	98
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>101</b>
<b>6</b>	<b>PROPOSTAS DE MELHORIAS</b> .....	<b>103</b>
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>104</b>

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - MALHA DUTOVIÁRIA DA AMÉRICA DO NORTE (FONTE: WWW.THEODORA.COM/PIPELINES, ACESSADO EM 20/04/2011).....	20
FIGURA 2 - MALHA DUTOVIÁRIA DA EUROPA (FONTE: WWW.THEODORA.COM/PIPELINES, ACESSADO EM 20/04/2011).....	20
FIGURA 3 - MALHA DUTOVIÁRIA DA AMÉRICA LATINA (FONTE: WWW.THEODORA.COM/PIPELINES, ACESSADO EM 20/04/2011).....	21
FIGURA 4 - ESQUEMA DE UMA TUBULAÇÃO .....	24
FIGURA 5 - CORROSÃO ELETROLÍTICA EM TUBOS DE AÇO-CARBONO PROVOCADA POR CORRENTE DE FUGA EM PARTE DE UM EQUIPAMENTO (MERÇON 2004) .....	28
FIGURA 6 - RESÍDUO E CONDENSADO SOBRE CUPOM DE CORROSÃO RETIRADO DE UM DUTO.....	34
FIGURA 8 - OLEODUTO ROMPIDO POR CORROSÃO EM CAMPINAS, 1990. ROMPIMENTO DO GASODUTO (GLP) POR AÇÃO DE TERCEIROS, BARUERI, 2001. ....	37
FIGURA 9 – FORMA DE PROPAGAÇÃO DAS ONDAS (ANDREUCCI, 2008).....	50
FIGURA 10 - TRANSDUTOR NORMAL OU RETO (FONTE: WWW.INTER-METRO.COM.BR, ACESSADO EM 17/10/2011).....	55
FIGURA 11 - TRANSDUTORES ANGULARES (FONTE: WWW.MULTIFLUX.COM.BR, ACESSADO EM 17/10/2011)	56
FIGURA 12 – TRANSDUTORES DE DUPLO-CRISTAL (FONTE: WWW.MULTIFLUX.COM.BR, ACESSADO EM 17/10/2011).....	57
FIGURA 13 – TRANSDUTOR “ <i>PHASED ARRAY</i> ”. (FONTE: WWW.GS-PRESS.COM.AU, ACESSADO EM 17/10/2011) .....	58
FIGURA 14 - APARELHOS DE ULTRASSOM COMERCIAIS E <i>MULTIPLEXER</i> PARA DIVERSOS CANAIS SIMULTÂNEOS .....	59
FIGURA 15 - COLETA DE ECOGRAMAS DE ULTRASSOM COM VARREDURA MANUAL. ....	62
FIGURA 16 – À ESQUERDA, O “PIG” DE CALIBRAÇÃO. À DIREITA, O “PIG” GEOMÉTRICO. ....	63
FIGURA 17 – “PIG” ULTRA-SÔNICO. ....	64
FIGURA 18 - SISTEMA DA QUALITY NETWORK INC.....	66
FIGURA 19 - MODELO PARA INSPEÇÃO DE JOELHOS DE DUTOS .....	66
FIGURA 20 - MODELO AUTOMÁTICO COM SENsoRES ULTRASSOM PARA INSPEÇÃO DE SOLDAS .....	67
FIGURA 21 - MODELO DA PASA, COM REPRESENTANTE NO BRASIL.....	67
FIGURA 22 – SISTEMA DE INSPEÇÃO EXTERNA DE TUBULAÇÕES GIP.....	68
FIGURA 23 - À ESQUERDA, VISTA EXPLODIDA DO ANEL BIPARTIDO, E A DIREITA, A MONTAGEM DO CONJUNTO. ....	71
FIGURA 24 - ESQUEMÁTICO DAS RODAS LONGITUDINAIS DO PROTÓTIPO .....	72
FIGURA 25 - DESENHO EM CAD À ESQUERDA E PROTÓTIPO FABRICADO À DIREITA. ....	73

FIGURA 26 - O ROBÔ MODULAR: O SISTEMA DE LOCOMOÇÃO LONGITUDINAL (1) POSSUI RODAS COM IMÃS PARA UMA MAIOR ADERÊNCIA SOBRE SUPERFÍCIES FERROMAGNÉTICAS. O CABEÇOTE (2) POSSUI BRAÇOS FRONTAIS ONDE É MONTADA A RÉGUA DE SENsoRES. O ANEL (3) POSSUI ENGATES QUE PERMITEM UMA INSTALAÇÃO RÁPIDA E SIMPLES DO MANIPULADOR ROBÓTICO SOBRE O DUTO. ....	74
FIGURA 27 - NA ESQUERDA OBSERVA-SE A RÉGUA COM A DISPOSIÇÃO DE SENsoRES. A DIREITA A RÉGUA, SENsoRES E ACESSÓRIOS MONTADOS NUM DUTO EM TESTES DE CAMPO. ....	76
FIGURA 28 - SOFTWARE DE CONTROLE E HARDWARE DE COMANDO DO EQUIPAMENTO. ....	77
FIGURA 29 - DIFERENTES VISTAS DO EQUIPAMENTO MONTADO EM LABORATÓRIO SOBRE UM DUTO DE 16". .	78
FIGURA 30 – FOTO MOSTRANDO O APALPADOR MONTADO SOBRE UM MÓDULO ROTACIONAL COM PONTEIRA ENCOSTADA NA SUPERFÍCIE DO DUTO. EM BRANCO COLADO NO DUTO, UMA SÉRIE DE PAPÉIS DOBRADOS E COLADOS COM FITA ADESIVA REPRESENTAM UMA PEQUENA VARIAÇÃO NO RAIO DO DUTO.....	80
FIGURA 31 - APARELHO DE ULTRASSOM UTILIZADO.....	82
FIGURA 32 – DUTO DE DEMONSTRAÇÃO EM ACRÍLICO COM O ROBÔ DE INSPEÇÃO DE DUTOS MONTADO. REPARE NAS PALAVRAS “UFRGS” NO TOPO, “LAMEF” NO CENTRO E “PETROBRAS” NA PARTE INFERIOR DA IMAGEM: ESTAS PALAVRAS ESTÃO USINADAS NA FACE INTERNA DO DUTO EM DIFERENTES PROFUNDIDADES. ....	83
FIGURA 33 – À ESQUERDA, UMA IMAGEM EXTERNA ESQUEMÁTICA DA MONTAGEM DOS SENsoRES DE ULTRASSOM. À DIREITA, UMA VISTA EM CORTE DA MESMA MONTAGEM DEMONSTRANDO O PERFIL INTERNO CÔNICO.....	84
FIGURA 34 – À ESQUERDA, SISTEMA COM CORREIAS SINCRONIZADORAS, SUBSTITuíDO PELO SISTEMA POR CORRENTES E ENGENAGENS, À DIREITA .....	85
FIGURA 35 – À ESQUERDA, O SISTEMA TRACIONADO POR ATRITO. À DIREITA, O SISTEMA TRACIONADO POR CORRENTE E ENGENAGENS SUBSTITUTO. ....	86
FIGURA 36 – À ESQUERDA, A RÉGUA DE SENsoRES DE ULTRASSOM CONTROLADO POR MOTOR. À DIREITA, A RÉGUA DE SENsoRES PRESSIONADA POR MOLAS.....	87
FIGURA 37 – GRÁFICO C-SCAN DA INSPEÇÃO DA GEOMETRIA EXTERNA DO DUTO COM SENSOR APALPADOR.88	
FIGURA 38 – ESQUEMATICAMENTE SE ILUSTRA A EXCENTRICIDADE MEDIDA ENTRE O ANEL – EM AZUL – E O DUTO – EM VERMELHO – COM O SISTEMA DE APALPADOR. OS PONTOS 1, 2, 3 E 4 CORRESPONDENTES MESMOS NÚMEROS DA FIGURA 37.....	89
FIGURA 39 – RESULTADO DO C-SCAN DA INSPEÇÃO GEOMÉTRICA EXTERNA DO DUTO COM ANTEPARO DE PAPEL COLADO NA SUPERFÍCIE EXTERNA. ....	90
FIGURA 40 - ID MONTADO NO DUTO DA REFAP .....	93
FIGURA 41 - MEDIÇÃO DE ESPESSURA POR ULTRASSOM NA SEÇÃO INFERIOR DO DUTO .....	94
FIGURA 42 - MEDIÇÃO DE ESPESSURA POR ULTRASSOM NA SEÇÃO INFERIOR DO DUTO.....	95
FIGURA 43 – DEFEITO EM FORMA DE CORROSÃO GENERALIZADA SIMULADO NA REGIÃO INTERNA DO DUTO.96	
FIGURA 44 – C-SCAN DO DUTO COM PERDA DE ESPESSURA INTERNA SIMULADA EM LABORATÓRIO. ....	97

FIGURA 45 – ROBÔ INSPECTOR EM DUTO DE ACRÍLICO .....	98
FIGURA 46 – C-SCAN DA INSPEÇÃO DO DUTO DE ACRÍLICO DE DEMONSTRAÇÃO .....	99
FIGURA 47 – C-SCAN DO DUTO DE ACRÍLICO PROJETADO NUM PERFIL EM 3D PARA VISUALIZAÇÃO MAIS INTUITIVA DA INSPEÇÃO .....	100

## **LISTA DE TABELAS**

TABELA 1 – ALGUNS DOS PRINCIPAIS ACIDENTES POR FALHAS EM DUTOS OCORRIDOS NO BRASIL DE 1983 A 2010. FONTE: SÍTIOS DA CETESB E AMBIENTEBRASIL, ACESSADOS EM MAIO/2010.....	36
TABELA 2 - DISTRIBUIÇÃO DAS CAUSAS DOS ACIDENTES COM DUTOS (1980 A 2006). .....	38
TABELA 3 – CAUSAS DE VAZAMENTOS EM DUTOS, SEGUNDO DADOS DA CONCAWE.....	39
TABELA 4 – ANÁLISE DA TIPOLOGIA DOS ACIDENTES EUROPEUS.....	40
TABELA 5 – VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS EM DIFERENTES MEIOS. .....	51
TABELA 6 - ACOPLANTES MAIS UTILIZADOS PARA ENSAIOS POR ULTRASSOM. .....	59

## **RESUMO**

A principal forma de transporte de petróleo e derivados, entre outras substâncias, são os dutos, e um dos processos críticos relacionados é a sua inspeção periódica, que é necessária e obrigatória, de alto custo devido à sua complexidade, e que na maioria das vezes são realizadas manualmente, em procedimentos demorados, pouco confiáveis e insalubres devido ao meio e aos riscos a que o trabalhador é exposto.

Este trabalho tem o objetivo de testar diversas aplicações e situações de um sistema de inspeção de dutos robótico desenvolvido. O interesse de observação foi a praticidade e facilidade de montagem e desmontagem do equipamento sobre a tubulação, a agilidade dos graus de liberdade propostos para o sistema, a flexibilidade do equipamento para utilização de diferentes métodos de inspeção, a rapidez e confiabilidade dos resultados de inspeção por ultrassom para varredura de espessuras em busca de corrosão generalizada interna de uma tubulação e a capacidade de precisão e resolução desta inspeção por ultrassom.

Para abordar estes pontos, foram realizados uma série de testes, inicialmente para verificação do bom funcionamento dos graus de liberdade do sistema, e posteriormente com métodos diferenciados de inspeção, como testes para medição geométrica externa de uma tubulação, testes com sistemas de ultrassom embarcado em laboratório e em campo com diferentes malhas de inspeção e com um ou múltiplos cabeçotes, e para diferentes tubulações e formatos de redução de espessuras de parede na tubulação.

**Palavras-chave:** Dutos, Corrosão, Inspeção, Robótica, Ultrassom

## **ABSTRACT**

The main way for transporting petroleum and substances alike is through ducts, and one of the most critic processes involved is the periodic inspection, which is necessary and mandatory, with a high cost due to its complexity, and, in most cases, done manually in long time consuming procedures and with little reliability and high risk for the workers involved.

This work is intended to test various situations of a robotic inspection system developed. The observation interest was the practicity and easiness of assembling and disassembling the equipment on the pipes, the agility of degrees of freedom proposed for the system, the flexibility of the equipment for the use in different methods of inspection, the quickness and reliability of the results by ultrasound for scanning different thicknesses of a duct in search of "generalized internal corrosion" and the level of precision and resolution of this ultrasound scan.

To approach this topics, a series of test were conducted, at first to check if the degrees of freedom of the system were working as intended and afterwards with different methods of inspection, such as external geometric measurements of the pipes, tests with onboard ultrasound systems in lab and on the field with different inspection grades and with one or multiple ultrasound sensors, and for different kinds of pipes and thickness reduction shapes of the pipe's walls.

**Keywords:** pipe, corrosion, Inspection, Robotic, Ultrasonic

## 1 INTRODUÇÃO

No mundo moderno, o petróleo e seus derivados têm importância vital para o dia-a-dia do ser humano, tanto por suas vantagens tecnológicas como por problemas causados pela sua utilização. As empresas petrolíferas diariamente anunciam descobertas de novas reservas e aberturas de novos poços de extração e investem grande tempo de pesquisa para desenvolver formas de melhor uso e, em especial para o escopo deste trabalho, de manuseio mais seguro deste produto e seus derivados. (Geremia 2007)

O Brasil é um dos países com a maior taxa média de crescimento do consumo de petróleo, 4,1 % ao ano como expectativa até 2020, e a produção nacional deverá continuar crescendo neste período. É um setor vulnerável a crises internacionais como a que se observou no último trimestre de 2008, porém ainda assim, não diminui a necessidade e o interesse de investimentos em novas tecnologias de segurança.

A principal forma de transporte de petróleo e derivados, entre outros produtos, são os dutos. Um dos processos críticos relacionados é a sua inspeção periódica, que é necessária e obrigatória, de alto custo devido à sua complexidade e que na maioria das vezes são realizadas manualmente, em procedimentos demorados, pouco confiáveis e insalubres devido aos riscos em que o trabalhador é exposto.

As empresas procuram em geral processos que se diferenciam pela velocidade de inspeção, tecnologia utilizada e custo de operação, além de desejarem fazer a menor quantidade de inspeções possíveis, devido aos gastos que decorrem destas, tentando prorrogar o prazo ao máximo.

As exigências vão mudando conforme a importância dos componentes a serem inspecionados: quanto mais complexa a linha de dutos, quanto mais importantes para a dinâmica de funcionamento de uma empresa e quanto mais adversos são os ambientes em que estão inseridos, maior a tecnologia demandada e, em consequência, maior o valor técnico e financeiro agregado ao procedimento.

O grande desafio, porém, é mudar a cultura da maioria das empresas, que ainda pensam muito em manutenção corretiva ao invés da manutenção preditiva ou preventiva. Segue a diferença entre estes dois processos:

A manutenção preditiva (do inglês, *predictive maintenance*) é aquela que é realizada a qualquer tempo, visando corrigir uma fragilidade percebida antecipadamente

à ocorrência de um problema. É a manutenção realizada quando se prevê que há iminência da ocorrência de um problema. Difere da manutenção preventiva por se realizar em virtude da constatação de uma tendência.

A manutenção preventiva, por exemplo, ocorre a intervalos regulares, independente do desempenho do equipamento ou mecanismo, de acordo com um planejamento, como a troca de óleo do carro que é realizada a cada 3, 5 ou 10 mil quilômetros independentemente de como está se comportando o veículo. A manutenção preditiva, por sua vez, se realiza uma vez que se perceba uma tendência: por exemplo, o conserto ou a troca de um pneu que se percebe esvazia com uma frequência distinta do padrão.

A demanda por dutos para o transporte de petróleo, de seus derivados e de gás natural deverá aumentar significativamente no Brasil nos próximos anos. O aumento do consumo de combustíveis, aliado à crise energética e ao aumento do uso de gás pelas indústrias, fará a malha nacional crescer para estimados 25 mil quilômetros de tubos. (Guimarães, 2005) Ao mesmo tempo, aumenta a necessidade de identificar e avaliar de forma mais precisa, rápida e eficaz os dutos com defeitos para evitar prejuízos econômicos e ambientais.

### 1.1 Motivação

Uma das ocorrências possíveis em tubulações é a corrosão. Nos pontos onde há corrosão, a parede do duto fica mais delgada, podendo comprometer a sua resistência mecânica.

Empresas do setor de energia e mesmo o governo vêm manifestando interesse em investir em métodos que garantam maior confiabilidade e segurança operacional das linhas. Por um outro ponto de vista, a sociedade tem feito crescentes exigências quanto à redução de eventos com dutos, que resultem em danos às pessoas e ao meio ambiente.

A competição de mercado exige dos operadores de dutos, confiabilidade e disponibilidade dos serviços de transferência e transporte de hidrocarbonetos, importante elo da cadeia logística da produção de petróleo. Este cenário leva, muitas vezes, os agentes regulamentadores a emitirem medidas prescritivas para a garantia da integridade dos dutos.

Apesar disto, acidentes com dutos têm ocorrido. Em resposta a este cenário desafiador, a indústria tem se organizado para sistematizar o gerenciamento da integridade de dutos baseando-se em risco.

Este trabalho apresenta uma ferramenta alternativa às existentes para detecção de defeitos em dutos, representando uma redução em tempo de procedimento, com incremento de precisão e facilidade de interpretação de dados.

## 1.2 Objetivos

Este trabalho tem o objetivo de testar diversas aplicações e situações do sistema de inspeção de dutos desenvolvido. Os grandes pontos de observação serão a praticidade e facilidade de montagem e desmontagem do equipamento sobre a tubulação, a agilidade dos graus de liberdade propostos para o sistema, a flexibilidade do equipamento para utilização de diferentes métodos de inspeção, a rapidez e confiabilidade dos resultados de inspeção por ultrassom para varredura de espessuras em busca de corrosão generalizada interna de uma tubulação, e a capacidade de precisão e resolução desta inspeção por ultrassom.

Para alcançar os objetivos propostos, uma série de testes em laboratório e em campo foi prevista, para abordar todos os pontos de funcionamento e avaliar criticamente os pontos positivos e negativos do sistema e, por fim determinar a viabilidade técnica da aplicação de métodos de END (ensaios não-destrutivos) automatizados em tubulações, principalmente para transporte de petróleo, gás e seus derivados, bem como produtos químicos diversos.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Dutos e Tubulações

O duto é um componente utilizado em larga escala para o transporte de fluidos no mundo inteiro, desde água e esgoto até petróleo, gás e derivados, incluindo produtos químicos de grande diversidade. Em especial para estes últimos, as tubulações são especialmente projetadas visando obedecer a normas de segurança exigentes.

Em comparação com outras formas de transporte de fluidos (rodoviária, ferroviária e aquática) os dutos representam um ganho em tempo, dinheiro e segurança, pelo fato de poderem transportar grandes quantidades a longas distâncias. Em geral são construídos através de chapas calandradadas e soldadas, recebendo proteção contra corrosão, e devem passar por frequentes inspeções e ser monitoradas continuamente. Na linha de dutos, uma série de equipamentos de segurança são montados com o intuito de evitar, diminuir ou minimizar os efeitos de acidentes, como por exemplo, válvulas de bloqueio instaladas em intervalos ao longo da via.

Tubulações podem estar situadas internamente a uma planta industrial, a fim de alimentar a cadeia produtiva com matéria prima ou para geração da energia necessária, ou escoar a produção das empresas processadoras dos fluidos transportados. Podem ser aéreos e submarinos como os situados nas imediações das plataformas de petróleo e de terminais, embora sua predominância seja de dutos enterrados.

Também podem interligar cidades, estados e países para fornecimento destes produtos. Atravessam áreas rurais pouco povoadas, áreas urbanas de alta densidade demográfica, passando sob ruas, avenidas, estradas, próximas a escolas, universidades, montanhas, rios, mares, entre outros. Interligam píeres, terminais marítimos e fluviais, campos de produção de petróleo e gás, refinarias, companhias distribuidoras e consumidores, sendo assim de importância vital para a economia dos países.

O Brasil está entrando em seu terceiro ciclo de investimentos de infra-estrutura de transporte e logística para o setor de petróleo e gás. Com início em 2005, essa fase deverá compreender, a exemplo das anteriores, dez anos e será marcada por vultosos investimentos, tanto da Petrobras S.A. como de empresas da iniciativa privada.

Marcelino Guedes Ferreira Mosqueira Gomes, diretor de terminais e oleodutos da Transpetro, para quem o país entrou em nova fase de expansão econômica, com mudanças que alteraram o perfil da demanda de energia, fez a seguinte análise: “O aumento da produção e exportação de etanol, de produção e consumo de gás natural e, ainda, da produção de petróleo exige a expansão da infra estrutura de transporte. Os vinte anos passados foram caracterizados primeiramente pela implementação de uma rede de dutos e terminais junto às refinarias (1965 a 1975). Em seguida (1985 a 1995), veio a necessidade de expansão da rede de dutos, especialmente oleodutos, e também o planejamento do gasoduto Brasil-Bolívia - a carta de intenções entre Brasil e Bolívia foi assinada em 1991, e o gasoduto foi construído entre 1997 e 2000. Agora, há a necessidade de levar os insumos para o interior do país, pois a demanda da economia por energia expandiu-se territorialmente” (fonte: [www.newscomex.com.br](http://www.newscomex.com.br), acessado em 20/04/2011).

Contudo, o Brasil tem uma rede de tubulações muito tímida. Segundo o Anuário Estatístico 2006 da ANP, a malha de dutos instalada no Brasil alcançava aproximadamente 15.000 km. Em comparação, a rede de tubulações Argentina chega a 28.000 km, a rede mexicana a 42.000 km e a norte-americana a 440.000km, aproximadamente.

Relativamente, o transporte dutoviário, no Brasil, representa apenas 4,5% na matriz de transportes, enquanto nos EUA chega a 15,1%, segundo análise do Centro de Estudos em Logística (CEL) da Coppead. As pesquisas do CEL indicaram também que a predominância do transporte rodoviário para transportar petróleo e derivados, no Brasil, pode dobrar o custo do transporte do produto.

Pode-se observar, da Figura 1 até a Figura 3, a comparação das malhas dutoviárias norte-americanas, européias e da América Latina.



Figura 1 - Malha dutoviária da América do Norte (fonte: [www.theodora.com/pipelines](http://www.theodora.com/pipelines), acessado em 20/04/2011)



Figura 2 - Malha dutoviária da Europa (fonte: [www.theodora.com/pipelines](http://www.theodora.com/pipelines), acessado em 20/04/2011)



Figura 3 - Malha dutoviária da América Latina (fonte: [www.theodora.com/pipelines](http://www.theodora.com/pipelines), acessado em 20/04/2011)

### 2.1.1 Dutos

Os dutos podem ser classificados basicamente em três tipos: os subterrâneos, os aparentes e os submarinos:

Os Dutos Subterrâneos são aqueles enterrados para serem protegidos contra intempéries, contra acidentes provocados por outros veículos e máquinas agrícolas, e também, contra a curiosidade e vandalismo por parte de vizinhos à linha de dutos.

Os Dutos Aparentes são aqueles visíveis, o que normalmente acontece nas chegadas e saídas das estações de bombeio, nas estações de carregamento e descarregamento.

Os Dutos Submarinos são assim denominados devido à que a maior parte da tubulação está submersa no fundo do mar. Este método é geralmente utilizado para o transporte da produção de petróleo de plataformas marítimas.

Outra classificação que pode ser feita para os dutos são de seu propósito: coleta, transporte ou distribuição.

Tubulações de coleta é um grupo de pequenos gasodutos interligados formando redes complexas com a finalidade de trazer o petróleo bruto ou gás natural a partir de vários poços nas proximidades de uma estação de tratamento ou a uma instalação de processamento. São geralmente pequenos (alguns metros de distância e em pequenos diâmetros). Há também gasodutos submarinos para a coleta do produto a partir de plataformas de produção em águas profundas.

Tubulações de transporte são longos, com grandes diâmetros, que deslocam os produtos (petróleo, gás, produtos refinados) entre cidades, países e até continentes. Estas linhas de transporte incluem diversas estações de compressão, para gases, ou estações de bombeamento, para líquidos.

Tubulações de distribuição são compostas de diversos dutos de pequeno diâmetro interconectados, usado para levar o fluido transportado ao seu consumidor final. São ramais que distribuem gás para as residências ou outros para empresas que utilizam nas suas linhas de produção. Dutos em terminais de distribuição de produtos aos reservatórios e instalações de armazenagem estão incluídos neste grupo.

### 2.1.2 Produtos transportados

#### 2.1.2.1 Óleo e gás

As linhas de dutos são geralmente a forma mais econômica de se transportar por longas distâncias quantidades significativamente grandes de óleos e derivados e gás natural. Comparado com as linhas ferroviárias, tem-se um custo por unidade e uma capacidade de transporte significativamente maior.

Oleodutos são normalmente fabricados com ligas de aço ou são poliméricos, com diâmetros internos típicos de 10 a 120 cm (4" à 48"). A maioria dos oleodutos são enterrados a uma profundidade típica de cerca de 1 - 2 metros. O óleo transportado é bombeado através de estações de bombeamento ao longo da linha, e geralmente fluem numa velocidade média de 1 a 6 m/s. Alguns dutos podem transportar mais de um produto em sequência, e geralmente não há separação física entre os produtos.

Já os gasodutos são construídos também por ligas de aço, com diâmetros internos geralmente entre 51mm à 1500mm de diâmetro (2" à acima de 60"), dependendo do tipo de gasoduto. O gás natural é composto principalmente por metano e etano e, além de ser mais leve do que o ar (o que faz com que se dissipe em caso de vazamento) não é tóxico. O gás pode ser pressurizado por estações de compressão, fluindo na forma líquida, ou na forma gasosa. Já o GLP é composto basicamente por propano e butano, gases altamente inflamáveis. É transportado e armazenado em cilindros de diversos tamanhos e recebe uma substância odorizante, mercaptana, a qual permite a percepção olfativa em caso de vazamento.

#### **2.1.2.2 Biocombustíveis**

Dutos para transporte de biocombustíveis têm sido utilizados para o transporte de etanol no Brasil e existem vários projetos de gasodutos para estes fluidos no Brasil e os Estados Unidos.

O maior problema relacionado a estes fluidos são sua concentração de substâncias corrosivas ao material, com oxigênio, a absorção de água e impurezas, que geralmente são um problema menor quando se tratam de gasodutos e oleodutos, e estes problemas vêm limitando a evolução das linhas dutoviárias para estes tipos de fluidos.

#### **2.1.2.3 Hidrogênio**

Linhos de transporte dutoviário de hidrogênio são usadas para conectar os locais de produção aos locais de demanda, armazenamento ou distribuição. A maioria do hidrogênio é produzido de 40 a 100 milhas de distância. Dados de 2004 relatam 1450km de dutos de hidrogênio de baixa pressão nos Estados Unidos e 1500km na Europa.

#### **2.1.2.4 Água e esgoto**

A aplicação mais antiga para dutos, os dutos são usualmente utilizados no mundo para o transporte de água, para consumo ou irrigação, através de longas distâncias nos territórios, onde precisam sobre passar montanhas, atravessar canais. Também, são utilizados nas cidades para esgoto.

### 2.1.3 Operação

Quando uma linha de dutos é construída, o projeto envolvido não considera somente sua obra civil, com dutos e estações de compressão ou bombeamento. Ele também tem que cobrir todos os trabalhos relacionados com a instalação dos dispositivos de campo que irão apoiar a operação remota.

Os dispositivos de campo são, basicamente, a instrumentação, os sistemas de coleta de dados e os sistemas de comunicação. A instrumentação inclui sensores que relatam sobre a pressão, fluxo e temperatura, entre outros que sejam relevantes ao bom funcionamento e manutenção da linha. Estes dispositivos são instalados ao longo da linha em locais especificados em projeto como locais de importância, como por exemplo os locais de entrada e saída do fluido na linha, estações de bombeamento para líquidos ou de compressão para gases, válvulas, entre outros.

A informação lida por estes sensores é processada em unidades terminais remotas, que transferem a informação dos dados de campo para uma localização central em tempo real usando sistemas de comunicação, como satélites, por exemplo.

As tubulações, então, são controladas remotamente, através do que é conhecido como Sala de Controle Central. Nestes centros, todos os dados medidos de múltiplas unidades terminais remotas em campo são consolidados em uma central de dados. É comum encontrar estas centrais em cada estação instalada ao longo da linha de dutos.

Uma rede de dutos é composta de uma série de equipamentos que, operando juntos, movem o produto do início ao fim do percurso. Os principais elementos desta são representados na Figura 4, abaixo, e explicada nos parágrafos subsequentes.

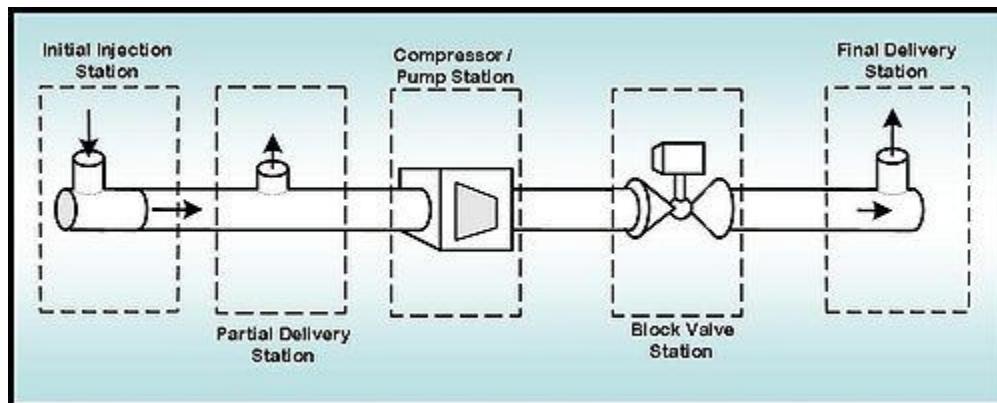


Figura 4 - Esquema de uma tubulação

Estação inicial de injeção (Initial injection station): É o início do sistema, onde o produto é injetado dentro da linha. As instalações de armazenamento, bombas ou compressores são geralmente localizadas nesses locais.

Compressores e estação de bombeamento (Compressor/pump stations): Bombas para líquidos ou compressores para gases estão localizados ao longo da linha para mover o produto através da tubulação. A localização destas estações é definida pela topografia do terreno, o tipo de produto a ser transportado, ou as condições operacionais da rede.

Estações de descarga parcial (Partial delivery station): Conhecido também como estações intermediárias, permitem entregar parte do produto transportado.

Válvulas bloqueadoras (Block valve station): Estes são a primeira linha de defesa para a tubulação. Com estas válvulas, o operador pode isolar qualquer segmento da linha para trabalhos de manutenção ou isolar uma ruptura ou vazamento. Estações de Válvulas geralmente estão localizadas a cada 50 km, dependendo do tipo de duto. A localização destas estações depende exclusivamente da natureza do produto a ser transportado, a trajetória do duto e/ou as condições operacionais da linha.

Estações reguladoras (Regulator station): Este é um tipo especial de válvula, onde o operador pode liberar pouco da pressão da linha. Reguladores geralmente estão localizados na descida de montanhas.

Terminal de saída (Final delivery station): Este é o local onde o produto será distribuído ao consumidor. Poderia ser um terminal de tancagem de tubulações de líquidos ou uma ligação a uma rede de distribuição de gasodutos.

## 2.2 Corrosão

Os metais são sempre encontrados na natureza na forma de compostos: óxidos, sulfetos, etc, formas mais estáveis para os mesmos, com algumas exceções como ouro ou platina, por exemplo.

Por sua vez, depois de metalurgicamente processados e transformados aos metais que utilizamos na indústria, a corrosão é a tendência destes materiais de voltar a sua forma original do minério. Como exemplo, a ferrugem, portanto, é o retorno do ferro de um aço a sua forma termodinamicamente mais estável, na forma de óxido.

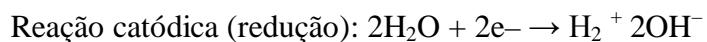
Cientificamente, o termo corrosão tem sido empregado para designar o processo de destruição total, parcial, superficial ou estrutural dos materiais por um ataque eletroquímico, químico ou eletrolítico. As formas que podem ocorrer são várias e dependem muito do meio em que está inserido, da sua composição química e do modo em que é processado e utilizado o material.

Os metais ao ar, em sua maioria, tendem a combinar-se com o oxigênio, tendo como resultado desta combinação os seus respectivos óxidos, e isso é conhecido como a oxidação. Porém, em alguns metais, sendo o mais conhecido o alumínio, acontece a passivação, que é a formação de uma camada de óxido na superfície que isola o material do meio, e em consequência, impede a continuação do processo de oxidação. Assim, o alumínio não se consome por corrosão, mesmo tendo um potencial de oxidação maior do que o aço.

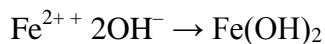
Para evitar que ocorra a corrosão, alguns métodos são utilizados comumente, como a pintura e tratamentos de recobrimento superficial (cromagem, niquelagem, etc.), para isolar o metal do meio. Também a utilização de materiais apassivados, como alumínio ou aços inoxidáveis, são alternativas, porém às vezes financeiramente ou tecnicamente inviáveis.

O processo de corrosão dos metais, como dito, pode ocorrer por ataque eletroquímico, químico e eletrolítico, e assim são classificadas as formas de corrosão: eletroquímica, química e eletrolítica. Estas estão brevemente descritas nos itens subsequentes.

A corrosão eletroquímica é um processo espontâneo, passível de ocorrer quando o metal está em contato com um eletrólito, onde acontecem, simultaneamente, reações anódicas e catódicas. É a mais frequente na natureza e se caracteriza por realizar-se necessariamente na presença de água, na maioria das vezes a temperatura ambiente e com a formação de uma pilha de corrosão. Como exemplo, tem-se a formação da ferrugem, demonstrada nas reações abaixo.



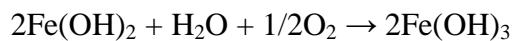
Neste processo, os íons  $\text{Fe}^{2+}$  migram em direção à região catódica, enquanto os íons  $\text{OH}^-$  direcionam-se para a anódica. Assim, em uma região intermediária, ocorre a formação do hidróxido ferroso:



Em meio com baixo teor de oxigênio, o hidróxido ferroso sofre a seguinte transformação:



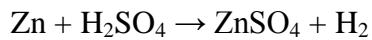
Por sua vez, caso o teor de oxigênio seja elevado, tem-se:



O produto final da corrosão consiste nos compostos  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , de coloração preta, e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , de coloração alaranjada. Outro exemplo desse tipo de corrosão ocorre quando se colocam dois metais diferentes ligados na presença de um eletrólito.

A corrosão química, também conhecida como seca por não necessitar de água, corresponde ao ataque de um agente químico diretamente sobre o material, sem transferência de elétrons de uma área para outra. No caso de um metal, o processo consiste numa reação química entre o meio corrosivo e o material metálico, resultando na formação de um produto de corrosão sobre a sua superfície.

Um exemplo desse processo é a corrosão de zinco metálico em presença de ácido sulfúrico:



Os polímeros (plásticos e borrachas) também podem sofrer uma degradação pela ação do meio, por solventes ou de oxidantes enérgicos. Nessa corrosão, as reações químicas levam à cisão das macromoléculas, em geral com comprometimento das

propriedades físicas e químicas do material. Dessa forma, há a descaracterização do material com a perda da rigidez e da flexibilidade, acarretando a sua deterioração, além de mudanças no seu aspecto.

A corrosão eletrolítica se caracteriza por ser um processo eletroquímico, que se dá com a aplicação de corrente elétrica externa, ou seja, trata-se de uma corrosão não-espontânea. Esse fenômeno é provocado por correntes de fuga, também chamadas de parasitas ou estranhas, e ocorre com freqüência em tubulações de petróleo e de água potável. Geralmente, essas correntes são devidas a deficiências de isolamento ou de aterramento, fora de especificações técnicas. A Figura 5 apresenta um furo em tubo de aço-carbono causado por esse tipo de corrosão.



Figura 5 - Corrosão eletrolítica em tubos de aço-carbono provocada por corrente de fuga em parte de um equipamento (Merçon 2004)

### 2.2.1 Formas de corrosão

A corrosão pode ocorrer sob diversas formas. Nos itens subsequentes temos algumas das formas mais conhecidas e mais comuns para o escopo deste trabalho.

#### 2.2.1.1 Corrosão uniforme

Também conhecida como corrosão generalizada, é aquela que se caracteriza por um ataque corrosivo ao longo de toda a superfície do metal em contato com o meio danoso com consequente perda de espessura ao longo de toda esta superfície de forma uniforme. É a forma mais comum de corrosão ocorrendo, por exemplo, em metais não protegidos expostos à atmosfera.

É a corrosão de mais fácil acompanhamento e de mais fácil controle, dado este fato de ser uniforme ao longo de toda a superfície. Mesmo assim, é de suma importância seu controle, pois a perda de espessura causa a diminuição de resistência mecânica, o que pode causar rupturas inesperadas nos componentes.

#### 2.2.1.2 Corrosão por placas

Ocorre em grandes extensões da superfície do metal, mas não de forma generalizada como a corrosão uniforme, e sim formando placas de corrosão com profundidades uniformes.

Acontece comumente em materiais que formam películas protetoras que, ao ganharem espessura pelo aumento do volume do produto de corrosão, fraturam e se desprendem por perda de aderência no metal base, expondo assim novas áreas a ação do meio corrosivo.

#### 2.2.1.3 Corrosão alveolar

Ocorre quando a perda de volume provocado pela corrosão se dá sob forma mais localizada, com maior profundidade que a corrosão por placa e sem o desprendimento de material não corroído como a corrosão por placas, passando a formar crateras. Normalmente iniciam por corrosão por pite. São frequentes em metais que formam películas semi-protetoras ou quando o processo de corrosão se dá por depósito, como em casos de corrosão por aeração diferencial.

#### 2.2.1.4 Corrosão puntiforme

Consiste na formação de pequenas cavidades iniciadas na superfície do metal, que crescem perpendicularmente, chegando a perfurar o metal. Uma característica marcante é

sua difícil detecção visual, por ser pequena e não apresentar praticamente nenhuma perda de espessura.

É extremamente localizada, sendo o fator deste processo a ação do oxigênio ou dos oxidantes sobre uma área limitada. Esta área torna-se anódica, enquanto a área com excesso de oxigênio, catódica, provocando uma corrosão galvânica muito localizada, com limitada difusão de íons e de taxa de crescimento relativamente alta.

#### 2.2.1.5 Corrosão intergranular

Pela diferença da resistência à corrosão entre a matriz e o contorno do grão em alguns metais, causado pela diferença da composição química nestes locais, têm-se um caminho preferencial para a corrosão no contorno do grão, e os grãos vão sendo destacados na medida da propagação desta corrosão. Pode se processar entre os grãos da rede cristalina do material metálico, o qual perde suas propriedades mecânicas e pode fraturar quando solicitado por esforços mecânicos

#### 2.2.1.6 Corrosão intragranular

Se difere da corrosão intergranular por se processar no interior dos grãos cristalinos, causando perda nas propriedades mecânicas e podendo fraturar o metal sob solicitações mais baixas do que o metal original, geralmente de forma mais catastrófica em comparação com a intergranular

Está associado a fenômenos de natureza eletroquímica, e sua formação e propagação pode ser controlada com a proteção do material através de correntes catódicas. Existem muitas teorias para explicar esse tipo de fratura, porém ainda muito divergentes, mas a fragilização por hidrogênio é a que sustenta uma das teorias mais bem aceitas.

#### 2.2.1.7 Corrosão sob tensão

Ocorre sob a ação conjunta de tensões mecânicas, sejam tensões residuais causadas por algum processo de manufatura ou tensão externa aplicada ao componente, e um meio corrosivo. Caracteriza-se pela formação de trincas que favorecem a ruptura do material e acontece comumente em materiais dúcteis. Não caracteriza perda de material, permanecendo o componente com bom aspecto visual até sua ruptura.

#### 2.2.1.8 Corrosão por frestas

É uma forma de corrosão localizada associada a condições onde há a estagnação de eletrólitos em ambientes restritos, ou seja, em frestas, como entre chapas e parafusos ou arruelas, ou entre duas chapas sobrepostas, por exemplo.

Acontece devido aos seguintes mecanismos: a solução dentro da fresta torna-se desoxigenada devido a uma corrosão inicial que consome através do processo catódico o oxigênio da solução. A velocidade de difusão do oxigênio para dentro da fresta não é suficientemente rápida para repor o oxigênio, e o processo catódico se move para fora da fresta, onde o oxigênio é abundante.

#### 2.2.1.9 Empolamento pelo hidrogênio

Ocorre quando o hidrogênio em estado atômico, gerado na superfície do metal, difunde para o interior do metal e acumula em regiões de defeitos. Este hidrogênio, quando acumulado, passa da forma atômica para a molecular, provocando o surgimento de bolhas de altas pressões nas falhas do interior do metal, surgindo, assim, um empolamento.

#### 2.2.1.10 Corrosão por cavitação

É um processo de desgaste devido a ondas de choque de um líquido fluindo sobre a superfície do metal, oriundas do colapso de bolhas gasosas formadas por ebulição.

Ocorrem em regiões de redução de seção de escoamento no duto ou de mudança de direção de escoamento como em joelhos de tubulações. Nele, ocorrem breves momentos de baixas pressões suficientes para a formação das bolhas de vapor, seguidos de reversão para altas pressões que causam o colapso destas bolhas, reduzindo de forma praticamente instantânea seu volume e provocando ondas de choque que causam impacto do fluido sobre o metal.

A cavitação provoca a quebra da camada passiva protetora da superfície, propiciando o ataque corrosivo, e com o acréscimo de provocar a deformação plástica com o encruamento causado pela ação das ondas de choque de alta pressão e, portanto, a formação de novas regiões anódicas.

### 2.2.2 Como minimizar os efeitos da corrosão

A troca de um componente corroído pode ser de alto custo, tanto pelo próprio processo de manufatura da peça quanto pelo tempo de substituição acarretando perda de produção. Por isso, alguns métodos de proteção aos materiais aos ataques de corrosão são implementados, sendo os mais utilizados são as proteções catódica e anódica, os revestimentos por pintura o recobrimento por um outro metal e por inibidores de corrosão.

A proteção catódica é aplicada de forma a transformar a estrutura metálica a ser protegida em uma pilha evitando, assim, sua deterioração. É aplicada em tubulações enterradas para o transporte de água, petróleo e gás, e grandes estruturas portuárias e plataformas marítimas, tornando-as mais seguras e aumentando a vida útil destes componentes. Consiste na aplicação de corrente elétrica baseadas em meios espontâneos (proteção por anodos galvânicos) ou não-espontâneas (aplicação de uma corrente elétrica impressa)

Já a proteção anódica tem sua técnica baseada na formação de uma película protetora sobre os materiais através da passivação do metal através de uma corrente anódica externa. É empregada para os metais e ligas formadores de película protetoras, especialmente o titânio, o cromo, ligas de ferro-cromo, ligas de ferro-cromo-níquel. A proteção anódica não só propicia a formação da película protetora mas, principalmente, mantém a estabilidade desta película, aumentando a proteção do metal a processos corrosivos que tendem a quebrar a camada passiva.

Os revestimentos têm a função de representar uma barreira entre o metal e o meio corrosivo, impedindo ou minimizando a corrosão. Tintas são os revestimentos mais utilizados. Já a galvanização é a técnica de sobreposição do metal a ser protegido por um outro metal menos nobre. É uma técnica muito empregada, como no caso de parafusos de ferro galvanizados com zinco.

Já os inibidores de corrosão consistem em substâncias, orgânicas ou inorgânicas, que são adicionadas ao meio corrosivo. Estas, por fim, objetivam prevenir ou impossibilitar as reações que causam a corrosão. Podem ser aquosa, oleosa ou gasosa.

### 2.3 Corrosão de Dutos

Como citado anteriormente, a corrosão é um processo de deterioração dos materiais que gera falhas e, conforme a gravidade destas, pode significar o fim da vida útil de um equipamento. A corrosão em tubulações pode resultar falhas que representam grandes prejuízos para as companhias e para a sociedade, na forma de acidentes ambientais graves, exposição de vidas humanas ao risco de morte, prejuízos financeiros, sejam para os consumidores que dependem sua renda dos produtos transportados, seja das empresas através de danos à imagem, além de prejuízos relacionados à continuidade operacional, entre outros.

Geralmente, os materiais utilizados na fabricação de tubulações são aços ao carbono, em detrimento aos aços inoxidáveis que seriam economicamente inviáveis. Por sua vez, os aços ao carbono têm maior potencial corrosivo, como comentado no capítulo anterior. A corrosão de tubulações ocorre geralmente por contaminantes no fluido transportado, internamente, vide o fato de externamente se aplicarem alguns métodos de proteção. É difícil identificar os locais de corrosão interna de tubulações, o que torna potencial a ocorrência de falhas. A importância da corrosão interna de dutos é muitas vezes subestimada, o que é extremamente perigoso no caso dos fluidos transportados comentados.

O gás natural é um bom exemplo. Ao ser explorado possui contaminantes como água, H<sub>2</sub>S, O<sub>2</sub> ou CO<sub>2</sub>, que são corrosivos e devem ser eliminadas ou diminuídas até um nível aceitável. A susceptibilidade dos aços ao carbono utilizados nas tubulações que o transportam faz com que seja necessária a identificação destes agentes corrosivos atuantes, e se faça o monitoramento ao longo da vida útil da tubulação. Apesar deste fato, o gás natural apresenta taxas de corrosão relativamente baixas, mas devido às grandes extensões dos gasodutos e consequente grande área superficial exposta, uma grande quantidade de produtos de corrosão sólidos, chamados de pó preto (Figura 6), são transportados juntamente ao fluido, trazendo transtornos operacionais.



Figura 6 - Resíduo e condensado sobre cupom de corrosão retirado de um duto

Também, para altas velocidades de transporte do fluido, é possível haver a formação de uma névoa de umidade, que pode condensar tanto na superfície interna superior quanto inferior do duto. Em velocidades altas, o líquido pode tomar um espaço próximo à parede interna com o gás passando no meio, e a velocidades mais baixas, o líquido tende a se concentrar na parte inferior do duto. Sendo assim, a corrosão pode ocorrer em qualquer posição interna da tubulação. Assim, salienta-se que o perfil de escoamento do fluido é importante para o estudo da corrosão de tubulações, pois diferentes velocidades causam diferentes perfis de escoamento.

Existe o acompanhamento da evolução da corrosão interna através de equipamentos, e um comumente utilizado são as sondas de corrosão, que permitem o monitoramento da taxa de corrosão interna, sendo possível identificar e associar à alterações no processo de escoamento do fluido. Em gasodutos, por exemplo, utilizam-se sondas de resistência elétrica (ER), já que a quantidade de condensado pode ser muito pequena para a aplicação de técnicas eletroquímicas, como por exemplo resistência a polarização (RP) (Nóbrega et.al. 2003). Também, existem equipamentos autônomos de monitoramento de corrosão, como o “PIG”, que será abordado em capítulos futuros.

Externamente, a corrosão é mais controlável. Diversas proteções são utilizadas para minimizar este processo, e sua localização visual é muito mais fácil do que uma corrosão que ocorre internamente. Na proteção externa de tubulações enterradas, por exemplo, o principal método de proteção são os revestimentos, sendo os principais utilizados polietileno, alcatrão de hulha-epoxi (Coal Tar), FBE (Fusion bonded epóxi) e fitas plásticas (Torofitas), sendo muitas vezes empregada uma combinação destes

materiais. Este tipo de proteção não é cegamente confiável devido à ocorrência de porosidades, falhas, absorção de umidade e envelhecimento.

Também é utilizada a proteção catódica, que induz a formação de meio alcalino em torno do metal através de anodos de sacrifício, onde geralmente é utilizado Mg puro (-1,75V) ou suas ligas (-1,60V), Zn (-1,10V), e Al puro (-0,8V) ou suas ligas (-1,05V), por apresentarem potencial mais negativo na série galvânica (medidos em relação ao eletrodo saturado de Cu/CuSO<sub>4</sub>) ou corrente impressa, que se dá por fluxo de corrente elétrica contínua através do solo, dispersa através de ânodos inertes, envolvidos por um material condutor de coque metalúrgico, podendo ser de grafite, ferro, chumbo ou titânio, de acordo como tipo de solo. A corrente fornecida por uma fonte geradora que terá a potência e tensão necessárias para a proteção da estrutura metálica, em função da resistividade elétrica do solo (Rodrigues, 2006).

No caso da corrosão ser detectada, seja internamente ou externamente, é importante avaliar a capacidade de carga remanescente dos dutos corroídos, com o intuito de saber se com certo grau de corrosão da tubulação ainda é seguro transportar o material, e se é necessária alguma intervenção de manutenção para que se prolongue a utilização do mesmo. Avaliada pressão de falha do duto, sendo esta pressão (acrescida de fatores de segurança) maior do que a pressão de serviço, o duto poderá continuar normalmente seu funcionamento. Se não, faz-se necessária uma intervenção, reparando-se o dano na tubulação, e assim aumentando a capacidade de suportar a pressão interna, ou diminui-se a pressão da linha, o que acarreta baixa na produção. A escolha da intervenção utilizada se dá caso a caso, pelo procedimento que mais economicamente viável for.

Mesmo com a aplicação de diversas formas de monitoramento e reparo, nas últimas duas décadas, a quantidade de acidentes é considerada preocupante. Abaixo, na

Tabela 1, temos um resumo dos principais acidentes ocorridos no Brasil decorrentes de falhas em tubulações.

**Tabela 1 – Alguns dos principais acidentes por falhas em dutos ocorridos no Brasil de 1983 a 2010. Fonte: sítios da CETESB e AmbienteBrasil, acessados em maio/2010**

1983	O duto de interligação da Refinaria Presidente Bernardes, em Cubatão (RPBC) ao Terminal de Utinga, da PETROBRAS, em São Caetano do Sul, rompeu por corrosão, causando o vazamento de gasolina, nas proximidades da Represa Billings, contaminando este importante manancial. Em agosto de 1982, a represa também foi afetada por uma vazamento de óleo combustível, causado também por corrosão em oleoduto, mas o volume não foi estimado.
1984	Uma das linhas que interliga a Refinaria Presidente Bernardes, em Cubatão, ao Porto de Alemoa, em Santos, rompeu devido à uma corrosão associado à falha operacional, houve o vazamento de gasolina. Esta tubulação se encontrava em região alagadiça de manguezal, onde estavam assentadas várias famílias em construções de tipo palafitas. A liberação de um produto inflamável se espalhou com a movimentação das marés e houve ignição seguido de incêndio de grandes proporções, causando a morte de 38 pessoas e 53 vítimas além de cerca de quinhentos desabrigados, pânico na comunidade e da própria cidade, nas cidades vizinhas e interdição da Rodovia Anchieta, situada paralelamente à linha do duto e contaminação de extensa área de manguezal.
1987	Uma máquina de terraplanagem bateu no "vent" do oleoduto do Sistema Guararema - REVAP (Refinaria do Vale do Paraíba), da PETROBRAS, causando o rompimento do duto e o vazamento do produto para o Rio Paraíba do Sul.
1997	O rompimento de um duto que liga a refinaria de Duque de Caxias (RJ) ao terminal da Ilha D'água provoca o vazamento de 2,8 milhões de óleo combustível em manguezais na Baía de Guanabara (RJ)
1998	O oleoduto do Sistema OSVAT rompeu por corrosão, no interior das instalações da Refinaria do Vale do Paraíba (REVAP), causando um grande vazamento de óleo que atingiu áreas alagadas (wetlands) como charcos e brejos, lagoa e o córrego Lambari, gerando um grave impacto ambiental. Este acidente foi uma reincidência. Em 1994, a mesma linha gerou o vazamento de 1.200 m <sup>3</sup> do mesmo produto, também por corrosão, afetando as mesmas áreas sensíveis.
1998	Em função do vazamento em um dos gasodutos da COMGAS, houve liberação do produto, o qual se infiltrou no solo e cujos vapores passaram para o interior de uma residência, mas precisamente nas instalações do banheiro. A seguir houve uma explosão causando ferimentos e queimaduras de primeiro grau no morador.
1999	Vazamento de 3 mil litros de óleo no oleoduto da refinaria que abastece a Manaus Energia (Reman) atinge o Iguaçá do Cururu (AM) e o Rio Negro. Danos ambientais ainda não recuperados.
2000	O rompimento de um duto que liga a refinaria de Duque de Caxias (RJ) ao terminal da Ilha D'água provoca o vazamento de 1,3 milhões de óleo combustível em manguezais na Baía de Guanabara (RJ). A mancha se espalhou por 40 km <sup>2</sup> .
2000	O oleoduto do Sistema OSSP, da PETROBRAS, localizado nas encostas da Serra do Mar, próximo à Vila Anchieta, procedente da Refinaria Presidente Bernardes em Cubatão, sentido ao planalto, rompeu em função de um pequeno ponto de corrosão. Devido à forte pressão com que o produto era bombeado, o jato de óleo atingiu área significativa de vegetação da Mata Atlântica e todos os esforços de combate foram dimensionados no intuito de conter rapidamente o vazamento, evitando que mais áreas fossem atingidas, trabalho este muito dificultado pela grande inclinação do terreno.
2001	O oleoduto do Sistema OPASA, procedente da Base de Barueri, da PETROBRAS, sentido capital- interior, rompeu no interior de um condomínio de luxo, na região de Tamboré, prejudicando residências, atingindo ruas, galerias de águas pluviais e um córrego afluente do Rio Tietê. O condomínio precisou ser parcialmente interditado para as atividades de limpeza e moradores foram removidos. Uma ave, uma rolinha, morreu após ter caído em uma poça de óleo.
2001	Durante as obras de construção do complexo rodoviário Rodoanel Mário Covas, junto à Rodovia Castelo Branco, próximo ao km 20, um "bate-estacas" perfurou o gasoduto do Sistema OBATI da PETROBRAS, causando a liberação do produto em grande quantidade, o qual rapidamente se dispersou pelas imediações. Como consequência, foi necessário proceder a evacuação de duas mil pessoas, residentes nas proximidades, devido ao alto teor de explosividade presente no local.
2002	A colisão de um caminhão no sistema de válvulas aéreas do gasoduto da COMGAS, durante manobras na Av. Vital Brasil, Butantã, São Paulo, acarretou vazamento de aproximadamente 182 m <sup>3</sup> de gás natural. O Corpo de Bombeiros esteve presente no local que ficou interditado até finalização dos reparos. A CETESB realizou monitoramento da área afetada.
2003	Cerca de 460 litros de óleo vazaram de uma linha de produção em Riachuelo (32 km de Aracaju), atingindo o rio Sergipe e parte da vegetação da região. A Petrobras foi multada em R\$ 1 milhão pela Adema - Administração Estadual do Meio Ambiente.
2004	Vazamento de óleo cru poluiu o rio Guacá e a praia de mesmo nome em São Sebastião, litoral norte do estado de São Paulo. O acidente ocorreu no oleoduto que liga o Tebatá (Terminal Almirante Barroso), em São Sebastião, à refinaria Presidente Bernardes, em Cubatão. As causas do rompimento do oleoduto são desconhecidas. Ainda não se sabe a quantidade de óleo que vazou.
2008	Vazamento de óleo no município de Cajamar, proveniente do oleoduto "OPASA" operado pela Transpetro/Petrobras que interliga a refinaria de Paulínia ao terminal de Barueri. A fissura na tubulação ocorreu devido à fadiga do material. Com a ruptura, houve perda do produto denominado "óleo diluente". A ocorrência se estendeu por três dias, finalizando na tarde de 16 de fevereiro. Foram computados um inventário de resíduos gerados da ordem de 2m <sup>3</sup> de resíduo líquido (óleo + água), 500 litros de óleo cru e 1900 kg de resíduo sólido.
2010	Máquina "pá niveladora", pertencente à Prefeitura Municipal de Mogi das Cruzes, ao efetuar serviços de nivelamento na estrada José Conceição, altura do número 700 no Bairro de Jundiapeba, atingiu o duto OSVAT 22, pertencente a Petrobras Transporte S/A – Transpetro. Em razão da ruptura do duto, cerca de 180.000 litros de gasolina vazaram para o meio, atingindo solo, flora, fauna e água. Diversas famílias precisaram ser evacuadas, num total de 31 pessoas, em razão do risco de inflamabilidade e do intenso odor que se propagou pela região.

Os investimentos do setor de petróleo, gás e derivados na prevenção de acidentes vêm crescendo ultimamente, principalmente após a ocorrência de dois graves acidentes

no ano de 2000. Um deles ocorreu em 18 de janeiro daquele ano, onde um vazamento de 1,3 milhões de litros de óleo na baía de Guanabara ocorrido em um oleoduto que transportava petróleo do terminal da Ilha d'Água para a refinaria Duque de Caxias, no estado do Rio de Janeiro provocou um impacto ambiental de grandes proporções. O óleo espalhado nas águas da Baía, pelos movimentos das marés e ventos, comprometeu a cadeia alimentar dos peixes, dos crustáceos, das aves, dos répteis e dos mamíferos em seu habitat, ou seja, toda a fauna e flora dos ecossistemas presentes.

Outro acidente em 16 de julho daquele ano foi na REPAR (Refinaria Getúlio Vargas), em Araucária, PR. Um rompimento causou o vazamento de aproximadamente 4 milhões de litros de óleo, atingindo os rios Barigüi e Iguaçu. O acidente levou duas horas para ser detectado, tornando-se o maior desastre ambiental provocado pela Petrobras em 25 anos.

Apesar dos inúmeros esforços em prevenção e em desenvolvimento de novas tecnologias, o risco de acidentes vem crescendo no Brasil, muito atrelado ao fato de a malha dutoviária estar crescendo. No estado de São Paulo, por exemplo, esse aumento se verifica a partir de meados da década de 1990, mas observa-se também que a partir de 2000, o número de acidentes diminui de novo, coincidindo com o início das atividades do PEGASO (Programa de Excelência em Gestão Ambiental e Segurança Operacional, criado pela Petrobras naquele ano), o que mostra a importância da continuidade e aprimoramento de programas desse tipo.



Figura 7 - Oleoduto rompido por corrosão em Campinas, 1990. Rompimento do gasoduto (GLP) por ação de terceiros, Barueri, 2001.

A CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, realizou uma pesquisa que revela que, no período de 1980 a 2002, a maioria dos acidentes causados por falhas devido à corrosão. Nota-se que, das causas de acidentes apuradas no Estado de São Paulo, com vazamento do produto transportado, a corrosão é a principal, compondo 17% do total de 149 casos registrados.

Já dos 172 registros do CADEQ - Cadastro de Emergências Químicas da CETESB envolvendo dutos, de 1980 a 2006, foram analisados quanto às principais causas que levaram ao vazamento imediato de produtos químicos transportados seja gás natural, óleo cru e derivados do petróleo (claros e escuros) independente do volume vazado, de acordo com a descrição apresentada nos Registros de Emergências Químicas - REQs. A Tabela 2 apresenta a distribuição dessas ocorrências de maneira mais detalhada por períodos.

Tabela 2 - Distribuição das causas dos acidentes com dutos (1980 a 2006).

Fonte: CADEQ/CETESB

<b>Modo de falha</b>	<b>1980-1989</b>	<b>1990-1999</b>	<b>2000-2006</b>	<b>Total</b>
Terceiros	5	9	12	26
Natural	4	0	0	4
Operacional/manutenção	3	5	4	12
Operacional/outras	5	4	2	11
<b>Mecânica/corrosão</b>	<b>13</b>	<b>10</b>	<b>4</b>	<b>27</b>
Mecânica/outras	3	6	4	13
Não apurada	2	56	21	79
<b>TOTAL</b>	<b>35</b>	<b>90</b>	<b>47</b>	<b>172</b>

Analizando a Tabela 2 acima se observa que:

- Os registros gerados por ação de terceiros aumentaram entre 1980 e 2006, sendo que nos últimos sete anos praticamente todos os casos envolveram linhas transportando gás natural, perfuradas accidentalmente por obras de empreiteiras contratadas por empresas de telefonia, água e esgoto ou mesmo por obras viárias municipais;
- As causas naturais não têm sido registradas desde 1989, sendo que estas ocorrências envolveram basicamente o transporte de petróleo e derivados;
- As falhas mecânicas vêm diminuindo progressivamente desde 1980 e estas ocorrências envolveram principalmente dutos que transportam petróleo e derivados.

- É grande o número de registros classificados como causas não apuradas. A grande maioria desses casos está relacionada com rompimento dos dutos que transportam gás natural, com vazamentos muito pequenos, sobre os quais não havia maior disponibilidade de informações a respeito quanto do cadastro dessas ocorrências no CADEQ CETESB.

Também se têm dados internacionais que comprovam a importância da corrosão de dutos nas falhas dos mesmos: a CONCAWE é uma organização européia que reúne várias companhias de petróleo. O nome em inglês é: The oil Companies European Organization and Health Protection.

O relatório do CONCAWE envolve o transporte apenas de petróleo e derivados, abrangendo informações de vinte e um países da Europa Ocidental, excluindo sistemas submarinos. Foram registrados 379 casos neste período, com volumes vazados de no mínimo 1m<sup>3</sup>.

O número de linhas e os volumes transportados aumentaram sensivelmente nestes trinta anos. Em 1971 foram movimentados 310x106 m<sup>3</sup> praticamente só de petróleo cru e em 2000, foram 672x106 m<sup>3</sup>, sendo 444x106 m<sup>3</sup> de crus e 228x106 m<sup>3</sup> de derivados.

O número de ocorrências vem passando por várias oscilações neste período. Entre as décadas de setenta e início dos anos noventa, a média máxima de registros foi de 15 a 21 por ano e de 1992 até 2000, a redução é significativa, chegando ao número de 6 por ano.

Quanto às causas dos vazamentos, os motivados pela ação de terceiros foram predominantes e, por corrosão em segundo lugar.

Tabela 3 – Causas de vazamentos em dutos, segundo dados da CONCAWE

<b>Causas</b>	<b>Quantidade total: 379</b>	<b>Percentagem</b>
Ação de terceiros	132	35%
Corrosão	110	29%
Falha mecânica	91	24%
Falha operacional	29	8%
Ação da natureza	14	4%

Como na Europa há dutos que só transportam óleos aquecidos e outros que transportam produtos na temperatura ambiente ou frios, o estudo do CONCAWE realizou análise da tipologia dos acidentes separadamente. Assim, nos dutos "frios", a maior freqüência foi motivada pela ação de terceiros e nos dutos "quentes" foi por corrosão. A tabela abaixo ilustra a distribuição das causas de rompimento em dutos "frios".

Tabela 4 – Análise da tipologia dos acidentes europeus.

<b>Causas</b>	<b>1971-1980</b>	<b>1981-1990</b>	<b>1991-2000</b>
Ação de terceiros	41%	38%	41%
Corrosão	16%	29%	20%
Falha mecânica	7%	12%	8%
Falha operacional	31%	22%	30%
Ação da natureza	5%	3%	2%

Os maiores volumes vazados procederam de falhas mecânicas com valor máximo de, aproximadamente, 250m<sup>3</sup>, enquanto que as falhas operacionais liberaram os volumes menores, 90m<sup>3</sup>.

Quanto às consequências destes vazamentos ao meio ambiente, as áreas rurais foram as mais prejudicadas, afetadas por 70% das ocorrências e, em seguida estão as áreas industriais e comerciais (22%). Nos 379 casos analisados neste estudo, foram registradas quatorze fatalidades, sendo cinco com vítimas fatais, atingidas pelas explosões após os vazamentos. (fonte: [www.cetesb.sp.gov.br](http://www.cetesb.sp.gov.br), acessado em 10/05/2011)

#### 2.4 Ensaios Não-destrutivos

Conhecidos como END ou NDT (“Non Destructive Testing”), os ensaios não destrutivos são procedimentos realizados em componentes, através da sua superfície, em busca de falhas ou defeitos superficiais, subsuperficiais ou internos. Se caracterizam por ser não destrutivos justamente pelo fato de não afetar o normal funcionamento do componente e nem danificá-lo, podendo assim ser realizado para avaliação da matéria prima de fabricação de um componente, em etapas da produção e de montagem de conjuntos, no controle de qualidade de uma linha de produção, na manutenção de peças, monitoramento da degradação de um componente ao longo do tempo, entre outras etapas.

Em geral, representam a garantia de bom funcionamento de um componente ou um conjunto de uma instalação, referenciando a segurança física das instalações e das pessoas, bem como a segurança financeira das empresas envolvidas.

Toda peça contém anomalias em sua superfície e em seu interior, resultante das más formações das estruturas cristalinas na solidificação e nos diversos processamentos em que essa fração sólida de material sofre até sua configuração geométrica final. Existem métodos END específicos para detecção de defeitos superficiais e outros métodos que encontram defeitos subsuperficiais e interiores.

Nem todos estes defeitos, contudo, são considerados graves, sendo que alguns são buscados durante a fabricação do componente para supri-lo de alguma característica mecânica específica. Porém muitas destas falhas são indesejadas e precisam ser identificadas antes que falhas catastróficas aconteçam.

Para se comparar os defeitos danosos ao componente das anomalias que não comprometam o funcionamento da peça, uma série de critérios são estabelecidos para cada método de END, e a sensibilidade de cada um destes procedimentos reflete a maior ou menor precisão em que este pode identificar e caracterizar a anomalia como um defeito, bem como sua extensão e sua gravidade.

Como citado anteriormente, grande parte dos defeitos estão localizados na superfície do material, no entanto defeitos subsuperficiais e internos podem crescer à superfície e também devem ser observados. Dentre os defeitos mais frequentemente encontrados em componentes, podem se destacar os seguintes:

- Desgaste referentes ao atrito entre superfície com outras superfícies ou contra fluidos, de forma generalizada ou localizada, que causam diminuição de espessura e variação nas dimensões de peças;
- Fissuras ou trincas, resultantes de má fundição, soldagem e outros, ou por mecanismos de fadiga das ligas do componente;
- Degradações do material, como a corrosão, na forma de indentações localizadas, de forma generalizada, entre outros;
- Ovalizações, descentralização, desalinamentos, empenamentos, deformações por fluência e outras variações geométricas;

Os procedimentos prévios realizados variam para cada END utilizado, porém a preparação da peça para os testes pressupõem remover qualquer fator que possa alterar ou dificultar a análise, como a limpeza da superfície, por exemplo, para remover camadas de óxidos, gorduras ou óleos lubrificantes, pós, entre outros.

Os métodos mais usuais de END são: ensaio visual, líquido penetrante, partículas magnéticas, ultrassom, radiografia (Raios X e Gama), correntes parasitas, análise de vibrações, termografia, emissão acústica, estanqueidade e análise de deformações. A escolha do método mais adequado a ser utilizado implica numa flexibilidade aliada à simplicidade dos equipamentos modernos. Existem equipamentos concebidos para utilização em unidades fixas de grande produção, assim como existem outros portáteis para serem transportados e usados em campo, muitas vezes em locais de difícil acesso.

Para obter os resultados válidos e satisfatórios, os itens abaixo devem ser considerados como elementos fundamentais para os resultados destes ensaios:

- Pessoal treinado, qualificado e certificado;
- Equipamentos calibrados;
- Procedimentos de execução de ensaios qualificados com base em normas e critérios de aceitação previamente definidos e estabelecido.

Um dos aspectos mais importantes na busca de defeitos por ensaios não destrutivos provém das qualificações dos técnicos operadores e avaliadores do ensaio. O conhecimento profundo que o profissional deve ter do defeito e do método utilizado lhe permite distinguir entre as anomalias que não comprometem o componente dos que são defeitos significativos para o seu bom funcionamento, e neste caso, se carecem de manutenção ou reparo ou devem ser substituídas por novos componentes, e até se um reprojeto deve ser efetuado para evitar novas falhas. Assim os executantes de END devem ser possuidores de formação específica em cada método que são capazes de realizar e de um considerável número de horas de experiência.

O bom estado de utilização do equipamento também é fundamental, do ponto que um equipamento descalibrado fornece falsas informações que comprometem a avaliação

da peça. A escolha correta dos sensores utilizados e a calibração correta dos mesmos são fundamentais para o ensaio, juntamente com sua boa condição de funcionamento.

Por fim, os procedimentos de inspeção, para serem válidos, devem seguir uma série de procedimentos previstos em normas técnicas largamente estudadas e implementadas na indústria. Estes procedimentos vêm contribuir para que exista uma padronização em todas as etapas de ensaio e interpretação de dados à fim de que haja consistência e confiabilidade dos resultados obtidos. Estas normas vêm a contribuir para a disseminação dos END na indústria moderna, aumentando continuamente as garantias de bom funcionamento das máquinas da sociedade moderna.

Os ítems abaixo terão uma breve descrição dos métodos de ensaios não destrutivos mais utilizados, retirados do site da Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos e Inspeção (ABENDE).

#### 2.4.1 Ensaio visual

A inspeção por meio do Ensaio Visual é uma das mais antigas atividades nos setores industriais, e é o primeiro ensaio não destrutivo aplicado em qualquer tipo de peça ou componente, e está frequentemente associado a outros ensaios de materiais.

Utilizando uma avançada tecnologia, hoje a inspeção visual é um importante recurso na verificação de alterações dimensionais, padrão de acabamento superficial e na observação de descontinuidades superficiais visuais em materiais e produtos em geral, tais como trincas, corrosão, deformação, alinhamento, cavidades, porosidade, montagem de sistemas mecânicos e muitos outros.

A inspeção de peças ou componentes que não permitem o acesso direto interno para sua verificação (dentro de blocos de motores, turbinas, bombas, tubulações, etc), utilizam-se de fibras óticas conectadas a espelhos ou microcâmeras de TV com alta resolução, além de sistemas de iluminação, fazendo a imagem aparecer em oculares ou em um monitores de TV. São soluções simples e eficientes, conhecidas como técnica de inspeção visual remota.

#### 2.4.2 Líquidos Penetrantes

O ensaio por Líquidos Penetrantes é considerado um dos melhores métodos de teste para a detecção de descontinuidades superficiais de materiais isentos de porosidades

tais como: metais ferrosos e não ferrosos, alumínio, ligas metálicas, cerâmicas, vidros, certos tipos de plásticos ou materiais organo-sintéticos. Líquidos penetrantes também são utilizados para a detecção de vazamentos em tubos, tanques, soldas e componentes.

O líquido penetrante é aplicado com pincel, pistola, ou com lata de aerossol ou mesmo imersão sobre a superfície a ser ensaiada, que então age por um tempo de penetração. Efetua-se a remoção deste penetrante da superfície por meio de lavagem com água ou remoção com solventes. A aplicação de um revelador (talco) irá mostrar a localização das descontinuidades superficiais com precisão e grande simplicidade embora suas dimensões possam ser ligeiramente ampliadas.

Este método está baseado no fenômeno da capilaridade que é o poder de penetração de um líquido em áreas extremamente pequenas devido a sua baixa tensão superficial. O poder de penetração é uma característica importante uma vez que a sensibilidade do ensaio é enormemente dependente do mesmo.

Descontinuidades em materiais fundidos tais como gota fria, trinca de tensão provocados por processos de têmpera ou revenimento, descontinuidades de fabricação ou de processo tais como trincas, costuras, dupla laminação, sobreposição de material ou ainda trincas provocadas pela usinagem, ou fadiga do material ou mesmo corrosão sob tensão, podem ser facilmente detectadas pelo método de Líquido Penetrante.

#### 2.4.3 Partículas Magnéticas

O ensaio por partículas magnéticas é usado para detectar descontinuidades superficiais e sub superficiais em materiais ferromagnéticos. São detectados defeitos tais como: trincas, junta fria, inclusões, gota fria, dupla laminação, falta de penetração, dobramentos, segregações, etc.

O método de ensaio está baseado na geração de um campo magnético que percorre toda a superfície do material ferromagnético. As linhas magnéticas do fluxo induzido no material desviam-se de sua trajetória ao encontrar uma descontinuidade superficial ou sub superficial, criando assim uma região com polaridade magnética, altamente atrativa à partículas magnéticas. No momento em que se provoca esta magnetização na peça, aplica-se as partículas magnéticas por sobre a peça que serão

atraídas à localidade da superfície que conter uma descontinuidade formando assim uma clara indicação de defeito.

Alguns exemplos típicos de aplicações são fundidos de aço ferrítico, forjados, laminados, extrudados, soldas, peças que sofreram usinagem ou tratamento térmico (porcas e parafusos ), trincas por retífica e muitas outras aplicações em materiais ferrosos.

Para que as descontinuidades sejam detectadas é importante que elas estejam de tal forma que sejam "interceptadas" ou "cruzadas" pelas linhas do fluxo magnético induzido; consequentemente, a peça deverá ser magnetizada em pelo menos duas direções defasadas de 90º. Para isto utilizamos os conhecidos yokes, máquinas portáteis com contatos manuais ou equipamentos de magnetização estacionários para ensaios seriados ou padronizados.

O uso de leitores óticos representa um importante desenvolvimento na interpretação automática dos resultados.

#### **2.4.4 Radiografia, Radioscopia e Gamagrafia**

O método está baseado na mudança de atenuação da radiação eletromagnética (Raios-X ou Gama), causada pela presença de descontinuidades internas, quando a radiação passar pelo material e deixar sua imagem gravada em um filme, sensor radiográfico ou em um intensificador de imagem.

A radiografia foi o primeiro método de ensaio não destrutivo introduzido na indústria para descobrir e quantificar defeitos internos em materiais. Seu enorme campo de aplicação inclui o ensaio em soldas de chapas para tanques, navios, oleodutos, plataformas offshore; uma vasta aplicação em peças fundidas principalmente para as peças de segurança na indústria automobilística como porta-eixos, carcaças de direção, rodas de alumínio, airbags, assim como blocos de motores e de câmbio; produtos moldados, forjados, materiais compostos, plásticos, componentes para engenharia aeroespacial, entre outros, são outros exemplos.

Raio-X Industrial abrange hoje varias técnicas:

- Radiografia: é a técnica convencional via filme radiográfico, com gerador de Raio-X por ampola de metal cerâmica. Um filme mostra a imagem de uma posição de teste e suas respectivas descontinuidades internas.
- Gamagrafia: mesma técnica tendo como fonte de radiação um componente radioativo , chamado de "isótopo radioativo" que pode ser o Irídio, Cobalto ou modernamente o Selênio.
- Radioscopia: a peça é manipulada a distância dentro de uma cabine a prova de radiação, proporcionando uma imagem instantânea de toda peça em movimento, portanto tridimensional, através de um intensificador de imagem acoplado a um monitor de TV. Imagens da radioscpia agrupadas digitalmente de modo tridimensional em um software, possibilita um efeito de cortes mostrando as descontinuidades em três dimensões o que nada mais é do que uma tomografia industrial.

A radiografia também passou a ser realizada em processos dinâmicos (tempo real), como no movimento de projétil ainda dentro do canhão, fluxo metálico durante o vazamento na fundição, queima dos combustíveis dentro dos mísseis, operações de soldagem, etc.

#### 2.4.5 Correntes Parasitas

O campo magnético gerado por uma sonda ou bobina alimentada por corrente alternada produz correntes induzidas (correntes parasitas) na peça sendo ensaiada. O fluxo destas correntes depende das características do metal.

Praticamente as "bobinas" de teste têm a forma de canetas ou sensores que passadas por sobre o material detectam trincas ou descontinuidades superficiais, ou ainda, podem ter a forma de circular, oval ou quadrada por onde passa o material. Neste caso detectam-se descontinuidades ou ainda as características físico-químicas da amostra.

A presença de descontinuidades superficiais e sub-superficiais (trincas, dobras ou inclusões), assim como mudanças nas características físico-químicas ou da estrutura do material (composição química, granulação, dureza, profundidade de camada endurecida, têmpera, etc.) alteram o fluxo das correntes parasitas, possibilitando a sua detecção.

O ensaio por correntes parasitas se aplica em metais tanto ferromagnéticos como não ferromagnéticos, em produtos siderúrgicos (tubos, barras e arames), em auto-peças (parafusos, eixos, comandos, barras de direção, terminais, discos e panelas de freio), entre outros. O método se aplica também para detectar trincas de fadiga e corrosão em componentes de estruturas aeronáuticas e em tubos instalados em trocadores de calor, caldeiras e similares.

É um método limpo e rápido de ensaios não destrutivos, mas requer tecnologia e prática na realização e interpretação dos resultados. Tem baixo custo operacional e possibilita automatização a altas velocidades de inspeção.

#### 2.4.6 Análise de Vibrações

O ensaio para vibrações mecânicas, em muitas fábricas, é um método indispensável na detecção prematura de anomalias de operação em virtude de problemas, tais como falta de balanceamento das partes rotativas, desalinhamento de juntas e rolamentos, excentricidade, interferência, erosão localizada, abrasão, ressonância, folgas, etc.

Um sensor piezoelettrico é acoplado ao mancal ou chassis da máquina ou componente em questão. Este sensor, através de um aparelho indica a quantidade e direção da vibração detectada. Bom conhecimento teórico e prático do operador são essenciais ao sucesso do ensaio.

O método tem se provado particularmente útil na monitoração de operação mecânica de máquinas rotativas (ventiladores, compressores, bombas, turbinas, etc.), na detecção e reconhecimento da deterioração de rolamentos, no estudo de mau funcionamento típicos em maquinaria com regime cíclico de trabalho, laminadores, prensas, etc., e na análise de vibrações dos processos de trincamento, notadamente em turbinas e outras máquinas rotativas ou vibratórias.

Este método também permite uma grande confiabilidade na operação de instalações e na interrupção de uma máquina em tempo hábil, para substituição de peças desgastadas.

Na usinagem mecânica com ferramental sofisticado, a medição das vibrações é essencial para a melhoria da qualidade final do produto. O método é aplicado na

engenharia civil para o estudo do comportamento das estruturas sujeitas a carregamento provocados por um tráfego de alta velocidade.

Ensaio de Análise de Vibrações é um método muito valioso, pois a identificação das falhas no monitoramento de máquinas e motores é feito por medições eletrônicas das vibrações, não percebidas por nossos ouvidos, eliminando assim a subjetividade do técnico.

#### **2.4.7 Termografia**

A inspeção termográfica (Termografia) é uma técnica não destrutiva que utiliza os raios infravermelhos, para medir temperaturas ou observar padrões diferenciais de distribuição de temperatura, com o objetivo de propiciar informações relativas à condição operacional de um componente, equipamento ou processo. Em qualquer dos sistemas de manutenção considerados, a termografia se apresenta como uma técnica de inspeção extremamente útil, uma vez que permite: realizar medições sem contato físico com a instalação (segurança); verificar equipamentos em pleno funcionamento (sem interferência na produção); e inspecionar grandes superfícies em pouco tempo (alto rendimento).

Os aplicativos desenvolvidos para a posterior análise das informações termográficas obtidas, como a classificação de componentes elétricos defeituosos, avaliação da espessura de revestimentos e o cálculo de trocas térmicas, permitem que esses dados sejam empregados em análises preditivas.

**Aplicações de termografia:** Manutenção preditiva dos sistemas elétricos de empresas geradoras, distribuidoras e transmissoras de energia elétrica; Monitoramento de sistemas mecânicos como rolamentos e mancais; Vazamentos de vapor em plantas industriais; Análise de isolamentos térmicos e refratários; Monitoramentos de processos produtivos do vidro e de papel; Acompanhamento de performance de placas e circuitos eletrônicos; Pesquisas científicas de trocas térmicas, entre outras possibilidades.

Na indústria automobilística é utilizada no desenvolvimento e estudo do comportamento de pneumáticos, desembaçador do pára-brisa traseiro, no turbo, nos freios, no sistema de refrigeração, etc. Na siderurgia tem aplicação no levantamento do perfil térmico dos fundidos durante a solidificação, na inspeção de revestimentos

refratários dos fornos. A indústria química emprega a termografia para a otimização do processo e no controle dos reatores e torres de refrigeração, a engenharia civil inclui a avaliação do isolamento térmico de edifícios e determina detalhes construtivos das construções como, vazamentos, etc.

#### 2.4.8 Emissão Acústica

O princípio do método é baseado na detecção de ondas acústicas emitidas por um material em função de uma força ou deformação aplicada nele. Caso este material tenha uma trinca, descontinuidade ou defeito, a sua propagação irá provocar ondas acústicas detectadas pelo sistema.

Os resultados do ensaio por emissão acústica não são convencionais. Na realidade este método não deve ser utilizado para determinar o tipo ou tamanho das descontinuidades em uma estrutura, mas sim, para se registrar a evolução das descontinuidades durante a aplicação de tensões para as quais a estrutura estará sujeita, desde que as cargas sejam suficientes para gerar deformações localizadas, crescimento do defeito, destacamento de escória, fricção, ou outros fenômenos físicos.

Aplicamos a emissão acústica quando queremos analisar ou estudar o comportamento dinâmico de defeitos em peças ou em estruturas metálicas complexas, assim como registrar sua localização. O ensaio por emissão acústica permite a localização da falha, captados por sensores instalados na estrutura ou no equipamento a ser monitorado.

É o caso da monitoração de cilindros contendo gás sob pressão para abastecimento, do teste hidrostático e pneumático em vasos de pressão, teste de fadiga, controle de processos de soldagem, e ainda da caracterização de materiais.

#### 2.5 Ultrassom

Detecta descontinuidades internas em materiais, baseando-se no fenômeno de reflexão de ondas mecânicas quando encontram obstáculos à sua propagação, dentro do material.

Um pulso ultra sônico é gerado e transmitido através de um transdutor especial, encostado ou acoplado ao material. Os pulsos ultra sônicos refletidos por uma descontinuidade, ou pela superfície oposta da peça, são captados pelo transdutor,

convertidos em sinais eletrônicos e mostrados na tela LCD ou em um tubo de raios catódicos (TRC) do aparelho.

Os ultra-sons são ondas acústicas com frequências acima do limite audível. Normalmente, as frequências ultrassônicas situam-se na faixa de 0,5 a 25 MHz.

Geralmente, as dimensões reais de um defeito interno podem ser estimadas com uma razoável precisão, fornecendo meios para que a peça ou componente em questão possa ser aceito, ou rejeitado, baseando-se em critérios de aceitação da norma aplicável. Utiliza-se ultrassom também para medir espessura e determinar corrosão com extrema facilidade e precisão.

As aplicações deste ensaio são inúmeras: soldas, laminados, forjados, fundidos, ferrosos e não ferrosos, ligas metálicas, vidro, borracha, materiais compostos. Indústria de base (usinas siderúrgicas) e de transformação (mecânicas pesadas), indústria automobilística, transporte marítimo, ferroviário, rodoviário, aéreo e aeroespacial: todos utilizam ultrassom.

Modernamente o ultrassom é utilizado na manutenção industrial, na detecção preventiva de vazamentos de líquidos ou gases, falhas operacionais em sistemas elétricos (efeito corona), vibrações em mancais e rolamentos, etc.

O ensaio ultra-sônico é sem sombra de dúvidas, o método não destrutivo mais utilizado e o que apresenta o maior crescimento, para a detecção de descontinuidades internas nos materiais.

### 2.5.1 Ultrassom – Medição de Espessura

Por uma definição geral, ondas sonoras são ondas mecânicas que se propagam através de meios materiais, que tem massa e elasticidade – gases, líquidos ou sólidos. Uma onda sonora viajando ao longo de um tubo cheio de ar, exemplificando, consiste em uma configuração periódica de expansão e compressão do ar em movimento. Pode haver dois tipos de ondas propagadas ao longo de um meio: ondas transversais, onde as oscilações são perpendiculares à direção de propagação da onda, e longitudinais, onde esta oscilação é paralela à direção de propagação, conforme esquematicamente representado na Figura 8.

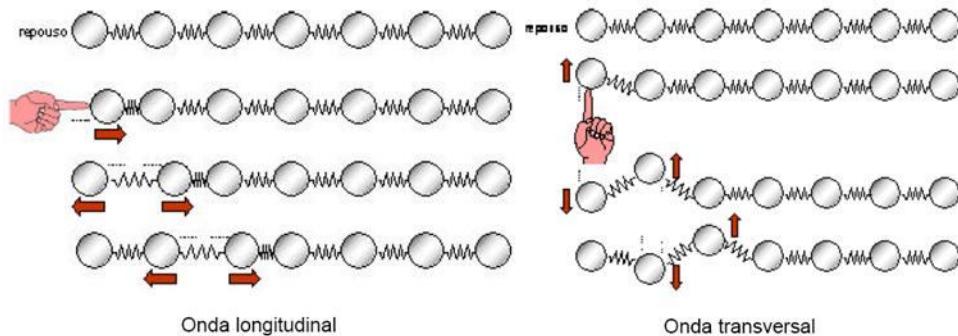


Figura 8 – Forma de propagação das ondas (Andreucci, 2008)

Simplificadamente, um som monotônico é representado por uma senóide pura, possuindo uma frequência medida em hertz (Hz) e uma energia medida em decibéis (dB). Por característica do sistema auditivo humano, nosso ouvido pode identificar sons de frequência entre 20 Hz e 20 kHz. Os limiares abaixo e acima destas frequências são conhecidos como infra-som e ultrassom, respectivamente.

O som é de grande importância na indústria moderna. Equipes de prospecção sísmica usam a tecnologia das ondas para a procura de petróleo, navios e submarinos utilizam o som para detectar obstáculos e se locomover sob a água, por exemplo. A medicina utiliza largamente as vantagens da tecnologia sonora, como as ultra-sonografias do corpo humano.

Sons, quando produzidos em um meio tridimensional qualquer, podem se refletir e se reverberar nos anteparos ou nas extremidades deste ambiente. Esta característica é o que permite a utilização do som na indústria, e constituem os fundamentos dos testes por ultrassom. Utilizando-se de aparelhos, pode-se assim detectar as reflexões internas de uma peça, quando incidida de uma onda de ultrassom, referentes a defeitos ou a parede oposta do material. Também, podem ser utilizadas para medição de espessura, onde se conhecendo a velocidade de propagação da onda no material, mede-se o seu tempo de reflexão, e assim obtém-se a espessura de uma parede de material contínuo. Velocidades de propagação de ondas longitudinais e transversais em diferentes meios se encontram na Tabela 5.

Tabela 5 – Velocidade de propagação de ondas em diferentes meios.

**Velocidades de Propagação das Ondas Longitudinais    Velocidades de Propagação das Ondas Transversais**

Material	Velocidade m/s	Material	Velocidade m/s
Ar	330	Ar	-
Alumínio	6300	Alumínio	3100
Cobre	4700	Cobre	2300
Ouro	3200	Acrílico	1100
Aço	5900	Alumínio	3100
Aço Inoxidável	5800	Ouro	1200
Nylon	2600	Aço	3200
Óleo(SAE30)	1700	Aço Inoxidável	3100
Água	1480	Aço Fundido	2400
Prata	3600	Nylon	1100
Titânio	6100	Óleo(SAE30)	-
Níquel	5600	Água	-
Tungsténio	5200	Prata	1600
Magnésio	5.800	Titânio	3100
Acrílico	2.700	Níquel	3000
Aço Inoxidável	5.800	Magnésio	3000
Aço Fundido	4.800	Fonte: Ultrasonic Testing, Krautkramer	

Um feixe sônico, quando introduzido num meio contínuo com uma descontinuidade ou uma interface numa direção favorável à sua propagação, será refletido por esta e mostrada na tela do aparelho de ultrassom como um pico (eco). Para o ensaio de uma peça, basicamente, é necessário um operador treinado e qualificado, utilizando técnicas referenciadas em normas técnicas, manuais e procedimentos, um aparelho e transdutores adequados à função estabelecida juntamente com blocos calibradores e de referência, e líquidos acoplantes.

Os END por ultrassom consistem num dos métodos mais aplicados atualmente. Entre suas vantagens em comparação com outros métodos, pode-se destacar a alta sensibilidade na detecção de pequenas descontinuidades internas, facilidade e agilidade de interpretação dos dados do aparelho (sendo um procedimento instantâneo, não necessitando de processos intermediários), a localização e avaliação dos tamanhos de defeitos são intrínsecos ao procedimento de ensaio, ou a facilidade de aplicação em ambientes diversos (não necessitando planos de segurança especiais em ambientes classificados). Como limitações à sua aplicação, porém, têm-se o conhecimento teórico e experiência necessária do técnico para aplicação do método, sendo que as licenças para inspetor são de longo e difícil treinamento, a dificuldade de testes em chapas muito finas, e o fato de certo preparo da superfície ser necessário em alguns casos.

No Brasil, o método de ultrassom teve grande evolução a partir da década de 1970, através das construções de plataformas marítimas para a Bacia de Campos pela Petrobras. A partir de 1980, o Centro de Pesquisas da Petrobras (CENPES) Iniciou um

movimento para a automatização dos métodos END, entre eles o ultrassom têm especial importância. Como resultado desta evolução, hoje em dia o ultrassom automatizado é largamente utilizado para inspeção de tubulações e vasos de pressão, por exemplo.

### 2.5.2 Características de uma onda sônica

Abaixo, algumas características físicas de uma onda sonora.

- Comprimento de onda ( $\lambda$ ): distância entre dois picos ou dois vales consecutivos ou duas zonas de compressão e diluição.  $\lambda = V/F$ .
- Período (T): menor intervalo de tempo de repetição do fenômeno periódico. Pode ser definido também, como o tempo que uma onda completa gasta para percorrer a distância "  $\lambda$  ";
- Frequência (F): número de períodos por segundo; é, portanto, o inverso do período:  $F = 1/T$ . A unidade de freqüência é o Hertz (Hz) que significa "um ciclo por segundo".
- Amplitude (A): elongação máxima, isto é, um ponto de máximo no eixo "Y".
- Interferência de Ondas: Fenômeno de superposição de duas ou mais ondas, onde, num mesmo meio, duas ou mais ondas propagando-se no mesmo sentido ou em sentidos diferentes, quando se superpõem provocam o fenômeno. A interferência de duas ou mais ondas poderá resultar numa terceira onda (resultante) cuja amplitude poderá ser maior ou menor que a das ondas componentes;
- Ressonância: fenômeno pelo qual um corpo vibra ao ser atingido por vibrações produzidas por um outro corpo, quando o período das vibrações do primeiro coincide com o período natural de vibrações do segundo, ou com o período de um dos seus harmônicos, ou seja, quando a frequência de vibração induzida (externa) no corpo coincide com sua frequência natural.
- Velocidade de propagação: Cada material apresenta um comportamento em relação à propagação de um feixe sônico de tipos de ondas diferentes. Existindo vários tipos de ondas, teremos também alguns diferentes valores de velocidade.

Também, algumas características e variáveis do feixe sônico são importantes de serem citadas. Uma delas é o campo próximo (Zona de Fresnel), que é uma região de grande pressão sônica e grande variação na intensidade do feixe sônico, gerando grande turbulência e distúrbios. Já o Campo Distante inicia-se quando termina o campo próximo, e é nesta região do feixe sônico onde o ensaio é considerado confiável. Verifica-se que é a partir do início do campo distante que começa a divergência do feixe sônico.

No campo próximo o feixe não apresenta divergência, porém a partir do início do campo distante e a intensidade do feixe sônico decresce com o aumento da distância. Além da distância, a divergência é outro fator para levar em consideração durante o ensaio, pois dependendo da localização do transdutor em relação à descontinuidade, o sinal correspondente a esta descontinuidade poderá aparecer na tela com amplitude diminuída.

Uma das causas da diminuição da pressão sônica é essa a divergência do feixe. A outra é a atenuação acústica. Atenuação acústica não é causada pela geometria do campo sônico, é uma característica dos materiais. A pressão sônica decresce como resultado da atenuação, que é medida em dB/mm. Dispersão e absorção são as responsáveis pela atenuação acústica.

A dispersão do feixe sônico ocorre devido ao desvio de partes do feixe por pequenos refletores existentes no interior dos materiais (descontinuidades tais como contornos de grãos, vazios, inclusões etc.), fazendo com que as ondas percam um pouco de energia e se propaguem em todas as direções. Na absorção, uma parte da energia ultra-sônica é perdida por atrito, transformando-se em calor. Esse "atrito interno" aumenta com a frequência.

### 2.5.3 Geração da onda ultra-sônica

Para introduzir a onda ultra-sônica no material, é preciso de um elemento emissor, conhecido como transdutor ou cabeçote, com características conhecidas de dimensões e frequências, podendo ser de forma circular ou retangular.

O transdutor de emissão utiliza-se do efeito piezelétrico. A teoria diz que esse efeito é a capacidade de um cristal gerar tensão elétrica quando recebe uma pressão mecânica, e deformação do mesmo. O efeito inverso também existe: ao utilizarmos

eletrodos em faces opostas de uma placa de cristal piezelétrico, de forma que se possam carregar as faces eletricamente, o cristal piezelétrico pode transformar a tensão elétrica alternada da ordem de centenas de Volts em oscilação mecânica, de maneira que o mesmo se contrai e estende ciclicamente com o efeito. Ao colocar-se este em contato com a superfície do componente a ser inspecionado, emite-se uma onda, cuja forma depende da frequência de excitação e das dimensões do cristal.

Materiais piezelétricos são: o quartzo, o sulfato de lítio, o titanato de bário, o metaniobato de chumbo e o zirconato-titanato de chumbo (PTZ). Titanato de Bário e zirconato-titanato de chumbo são materiais cerâmicos que recebem o efeito piezelétrico através de polarização. Esses dois cristais são os melhores emissores, produzindo impulsos ou ondas de grande energia. Para a inspeção ultra-sônica, interessa não só a potência de emissão, mas também a sensibilidade da recepção (resolução). A frequência ultra-sônica gerada pelo cristal dependerá da sua espessura, cerca de 1 mm para 4 MHz e 2 mm para 2 MHz. (Andreucci, 2008).

Os cabeçotes de ultrassom são constituídos, além do material piezelétrico, de uma base de suporte, também conhecido como bloco amortecedor, eletrodos e carcaça. Três tipos de cabeçotes são usualmente utilizados: normais ou retos, angulares e de duplo cristal. Um quarto tipo de sensor surgiu nos últimos anos, o phased array.

#### 2.5.4 Tipos de transdutores de ultrassom.

Os transdutores normais ou retos (Figura 9) são assim conhecidos por gerarem uma onda longitudinal normal à superfície de acoplamento, e são compostos de um monocristal piezelétrico preso em uma de suas extremidades a um bloco rígido amortecedor, e sua outra extremidade protegida por uma membrana elastomérica ou de resina especial com função de protegê-lo de desgastes mecânicos.

O impulso gerado por esse transdutor quando colocado com um acoplante sobre um material contínuo, atravessa o meio e reflete nas interfaces, produzindo o que se conhece por ecos. Estes ecos, ao refletirem e retornarem ao transdutor gera pelo mesmo princípio um sinal elétrico correspondente. Em geral, estes transdutores são encontrados numa gama de 5 a 24mm de diâmetro, trabalhando em frequências de 0,5 ; 1 ; 2 ; 2,5 ; 5 e 6 MHz. A maior aplicação deste tipo de sensor é para inspeção de peças com superfícies

paralelas, como medição de espessura ou a busca de descontinuidades na direção perpendicular a propagação da onda.



Figura 9 - Transdutor normal ou reto (fonte: [www.inter-metro.com.br](http://www.inter-metro.com.br), acessado em 17/10/2011)

Os transdutores angulares (Figura 10), em comparação ao transdutor reto, se diferem somente por formar um ângulo em relação à superfície inspecionada, obtido da geometria da carcaça do transdutor. O princípio de sua utilização é mais complexa do que o transdutor normal, pois sendo a propagação da onda longitudinal não perpendicular às superfícies, não existirá o eco de fundo. Enquanto não houver uma interface do meio que reflita o feixe, este percorrerá o material até sua atenuação. Por este motivo, este tipo de sensor é muito utilizado na inspeção de soldas e para a detecção de defeitos ou descontinuidades orientadas longitudinalmente na espessura do material.



Figura 10 - Transdutores angulares (fonte: [www.multiflux.com.br](http://www.multiflux.com.br), acessado em 17/10/2011)

Contudo, para a inspeção de peças de pouca espessura, bem como para a detecção de defeitos sub-superficiais, nenhum dos sensores acima descritos é apto: a conhecida “zona morta” que existe na tela do aparelho (referente a região logo abaixo do transdutor, que tem uma profundidade que varia de 1 a 3 mm, dependendo da frequência utilizada.) dificulta a visualização dos ecos do material. Para estes casos, utiliza-se os transdutores de duplo cristal (Figura 11).

Ao emitir a onda, o cristal piezelétrico recebe a resposta do eco do material ou da descontinuidade num curto espaço de tempo, num instante em que a vibração do sensor ainda não foi totalmente amortecida. O transdutor de duplo cristal serve para separar as funções de emissão de sinal e recepção da resposta, utilizando dois cristais piezelétricos na mesma carcaça, separados por um material acústico isolante, levemente inclinados em relação à superfície de contato. Sua característica geométrica permite não somente a inspeção de pequenas espessuras, mas também para maiores espessuras de material, sendo o mais utilizado na indústria para esta função. Porém têm uma faixa de inspeção ótima e devem ser utilizadas nesta faixa para a confiabilidade da medição. Para sua utilização, é necessário um aparelho adaptado para a leitura dos dois cristais. Em certos casos, utiliza-se este sensor para focalizar uma determinada região do material em que se deseja uma sensibilidade maior.



Figura 11 – Transdutores de duplo-cristal (fonte: [www.multiflux.com.br](http://www.multiflux.com.br), acessado em 17/10/2011)

Os transdutores “phased array” (Figura 12) são transdutores que foram desenvolvidos à partir da década de 1990, utilizando-se dos avanços da tecnologia dos computadores e a evolução de materiais piezocompostos. Num mesmo transdutor,

operam dezenas de pequenos cristais (entre 10 e 256), cada um ligado à circuitos eletrônicos independentes capazes de controlar o tempo de excitação de cada cristal, modificando o comportamento do feixe sônico emitido pelo conjunto de cristais.

Operando estes múltiplos cristais em fase (excitando-os ao mesmo tempo), têm-se uma onda perpendicular ao plano da superfície, enquanto excitado de forma defasada, a frente de onda resultante é angular à superfície. Devido a esta característica, estes sensores podem realizar uma varredura em vários ângulos de refração diferentes de uma só vez, controlando a onda eletronicamente, resultando numa maior velocidade de inspeção em elementos complexos, como em soldas.



Figura 12 – Transdutor “*Phased Array*”. (fonte: [www.gs-press.com.au](http://www.gs-press.com.au), acessado em 17/10/2011)

#### 2.5.5 Interface Transdutor-Meio: Acoplantes.

Para que as vibrações do sensor piezelétrico passem ao material e transmitam/recebam os sinais, é necessário que um meio, conhecido como acoplante, seja utilizado. Isso se dá porque, se não utilizado o acoplante, uma camada de ar se forma na interface sensor/superfície que impedem a propagação das vibrações mecânicas.

A característica que compara diferentes acoplantes é conhecida como Impedância acústica ( $Z$ ), que é definida como sendo o produto da densidade do meio ( $\rho$ ) pela velocidade de propagação neste mesmo meio (  $V$  ):  $Z = \rho \times V$ . Fisicamente, representa a quantidade de energia acústica que se reflete e transmite para o meio. Como exemplo,

cita-se a interface água/aço, que transmite 12% e reflete 88% da energia ultra-sônica incidida.

A ideal escolha do líquido acoplante é dada pela relação que diminua essa diferença, dependendo de vários fatores, como acabamento superficial da peça, condições técnicas e tipo de peça. A água, como visto, não tem a melhor característica para ser utilizada como acoplante, mas muitas vezes é utilizada por sua facilidade de obtenção e custo, e é largamente usada nos testes por ultrassom automatizados.

Tabela 6 - Acoplantes mais utilizados para ensaios por ultrassom.

Acoplante	Densidade ( g/cm <sup>3</sup> )	Velocidade da onda long. (m/s)	Impedância Acústica ( g/cm <sup>2</sup> .s )
Óleo ( SAE 30 )	0,9	1700	$1,5 \times 10^5$
Água	1,0	1480	$1,48 \times 10^5$
Glicerina	1,26	1920	$2,4 \times 10^5$
Carbox Metil Celulose (15g/l)	1,20	2300	$2,76 \times 10^5$
Aço	7,8	5.900	$46 \times 10^5$
Ar ou gas	0,0013	330	$0,00043 \times 10^5$
Aço inoxidável	7,8	5.800	$45,4 \times 10^5$
Alumínio	2,7	6.300	$17,1 \times 10^5$
Acrílico	1,18	2.700	$3,1 \times 10^5$
Cobre	8,9	4.700	$41,6 \times 10^5$

Fonte: SONIC Instruments – catálogo de fórmulas e dados

### 2.5.6 Aparelhos de ultrassom

Existe uma diversificada gama de aparelhos de ultrassom no mercado, de marcas, tipos, características e preços variados. O desenvolvimento da eletrônica e informática vem continuamente evoluindo os sistemas de inspeção, desde a maior precisão de leitura de um sensor até uma taxa de aquisição de dados mais veloz de diversos sensores ao mesmo tempo, podendo ser acoplados a multiplexores, computadores e impressoras, permitindo o armazenamento de dados e a emissão de relatórios técnicos mais precisos, fatores que facilitam sua automação e permitem o desenvolvimento de sistemas mais complexos de inspeção de equipamentos. Aparelhos de ultrassom e multiplex comercial podem ser vistos na Figura 13.



Figura 13 - Aparelhos de ultrassom comerciais e *multiplexer* para diversos canais simultâneos

É sempre recomendada a completa análise dos manuais de usuário de cada fabricante de aparelhos e sensores. Para seu uso, porém, alguns fatores são básicos e precisam ser conhecidos para sua correta aplicação. Os controles e ajustes principais são listados a seguir.

- Escolha do sensor, entre sensores pulso-eco normais ou angulares ou duplo cristal, e deve ser escolhido segundo a resposta a ser obtida na inspeção e a geometria da peça, basicamente.
- Ajuste de ganho (dB), com a função de regular o sinal da reflexão. Para se entender, quanto maior o ganho, maior será a altura dos ecos visualizados na tela do aparelho de leitura (no eixo vertical do visor), o que determinará suas amplitudes e permitirá quantificá-las e diferenciá-las.
- O ajuste de escala possibilita o posicionamento da reflexão de uma determinada espessura ou percurso sônico, no eixo horizontal do aparelho.
- Ajuste do ponto zero é o ajuste que movimenta o gráfico da esquerda para direita, e vice-versa, posiciona o eco inicial no ponto zero do visor.
- Ajuste de frequência seta no aparelho a frequência de excitação do transdutor utilizado. Alguns aparelhos modernos têm este ajuste de forma automática.
- Velocidade de propagação da onda permite comparar velocidades de propagação de vários materiais;
- Supressor ou filtro de ruídos, eliminam da tela do aparelho os ecos e reflexões decorrentes de pequenos problemas de acoplamento e de granulação grosseria do material;

- Blocos de calibração, para que se verifique a correta leitura dos transdutores utilizados e os corretos ajustes do aparelho realizados anteriormente ao ensaio. Devem ser fabricados de material semelhante ou igual ao inspecionado para que não se decorram erros de interpretação.
- Blocos de referência são utilizados para comparar as reflexões das descontinuidades detectadas ou alguma outra característica específica observada durante o ensaio, como estruturas internas do material, atenuação, espessura, entre outros. O melhor bloco de referência é feito com uma peça igual à peça a ser ensaiada e se possível contendo descontinuidades de referência. Sua utilização é necessária porque é preciso comparar os resultados obtidos na inspeção com uma referência calibrada para a correta interpretação do sinal do defeito.

Além das observações citadas acima, existem outras características, muitas vezes da própria marca do aparelho e dos sensores, que devem ser observadas, como as propriedades dos transdutores utilizados, curvas de referência, correções devido a diferenças entre padrões e peças inspecionadas, temperaturas, entre outros. Por fim, as condições de trabalho das peças, como as condições superficiais e a geometria (superfícies côncavas e convexas devem ser observadas), observações do material e a preparação da face de contato com o transdutor, e também as variáveis da descontinuidade, como tamanho, forma, localização e orientação, caso sejam conhecidas e queiram ser dimensionadas.

## 2.6 Inspecção de Dutos

Um dos processos mais críticos para se prever e evitar acidentes com dutos é a sua inspeção periódica. São inspeções necessárias e obrigatórias, de alto custo financeiro devido à sua complexidade e que na maioria das vezes são realizadas manualmente, em procedimentos com tempo relativamente longo, pouco confiável e insalubre devido aos riscos em que o trabalhador pode ser exposto.

Tradicionalmente, as medições dos defeitos nos dutos são realizadas manualmente por um técnico especializado utilizando um sensor não destrutivo. Assim, o técnico realiza a medição posicionando o sensor em diferentes lugares da superfície, os quais são escolhidos aleatoriamente, após identificação visual das zonas mais comprometidas

(Figura 14). A medição consiste na leitura do instrumento após colocar o sensor na superfície e interpretar um valor ou gráfico retornado pelo instrumento, e este procedimento requer que o técnico realize a inspeção na zona de atuação do duto. Tendo em vista que o local das medições é escolhido aleatoriamente, há maior probabilidade de não serem detectadas as falhas nos dutos.



Figura 14 - Coleta de ecogramas de ultrassom com varredura manual.

Devido às grandes quilometragens de dutos a serem inspecionados, porém, poderosos scanners se fazem necessários para avaliar o grau de defeitos em menor tempo. Existem basicamente equipamentos automatizados para a inspeção de tubulações que trabalham internamente e outros que trabalham externamente à tubulação. Destaca-se aqui o “pig”, responsável atualmente pela esmagadora maioria das análises realizadas.

Os “pigs” são equipamentos modulares inseridos dentro da tubulação e movimentados pelo próprio produto que flui no duto, viajando por toda a sua extensão. Pode se mover a uma velocidade de 1 a 2km/h por uma extensão de até 200km, segundo dados da empresa Pipeway, localizada no Rio de Janeiro e responsável pela grande parte das inspeções por este método no Brasil. Para cada diâmetro de duto, é necessário desenvolver um “pig” específico. Recomenda-se a avaliação regular de uma tubulação utilizando-se dos “pigs” a cada quatro anos.

Existem “pigs” que realizam a limpeza (conhecidos como “Utility pigs”), e os que fornecem informações das condições da tubulação (conhecidos como “In-line Inspection tools, “pigs” instrumentados, “intelligent pigs” ou “smart pigs”). Estes equipamentos são ferramentas indispensáveis, e atualmente já são considerados como procedimentos obrigatórios na instalação e operação de tubulações ao redor do mundo.

Há diversos “pigs” utilizados hoje para as diferentes necessidades. Quando se necessita, por exemplo, verificar a continuidade de diâmetros ao longo da linha, utilizam-se “pigs” para uma operação chamada de calibração, com a utilização de um “pig” de copos com placa calibradora, sendo possível verificar a existência de obstruções ou amassamentos. Essa verificação é utilizada como um pré-requisito para a operação de outros “pigs” instrumentados. Para se determinar a localização e avaliar estes defeitos, aplica-se um “pig” geométrico instrumentado que registra e identifica o trecho no qual o defeito se encontra. Também, há “pigs” utilizados para levantar a configuração espacial da tubulação, como para conhecer os raios de curvatura do percurso. Alguns destes são ilustrados na Figura 15.



Figura 15 – À esquerda, o “pig” de calibração. À direita, o “pig” geométrico.

Existem “pigs” mais sofisticados (magnéticos ou ultra-sônicos) que são equipados para verificação de perda de espessura de parede do duto, sendo capazes de identificar e localizar até pequenos defeitos como pites e trincas, sendo este equipamento utilizado para a inspeção de corrosão. O princípio deste tipo de medição consiste num sinal ultra-sônico emitido por um transdutor partindo do “pig”, viajando a uma velocidade conhecida dentro do duto. Ao chocar-se com a parede, essa frente de onda reflete e retorna ao transdutor, e pela medição de tempos de reflexão é possível calcular o raio interno da tubulação. Tendo-se destes dados de raio interno, compara-se com o raio interno original de projeto, e a diferença entre as duas medições mostra a profundidade de defeitos. A Figura 16 mostra um “pig” ultra-sônico composto de diversos módulos articulados.



Figura 16 – “pig” ultra-sônico.

As desvantagens deste processo, em oposição a sua simplicidade, são o fato de a velocidade do som ser constante somente para meios homogêneos e contínuos, e quando do fluido corrente contiver descontinuidades como bolhas ou partículas sólidas, o resultado é mascarado. Também, a necessidade da perpendicularidade do sensor que

emite o sinal em relação à superfície é uma fonte de erros, principalmente quando da medição de uma curva da tubulação. Por estes motivos, a inspeção através de “pigs” é considerada essencial, mas não determinante para as conclusões, apresentando as localizações dos defeitos e a classificação deles de forma qualitativa, sendo sempre necessária uma inspeção mais precisa nos locais apresentados pelo “pig” como críticos.

A região localizada pela inspeção interna contendo defeitos, em alguns casos, está enterrada ou localizada em regiões de difícil acesso. Então parte-se para o procedimento de exposição da seção para inspeção fina, desenterrada quando subterrânea ou acessada através de andaimes quando aéreas. Alguns casos têm tubulações em zonas classificadas, com risco de explosão e periculosidade, sendo necessárias diversos procedimentos para o contato com a tubulação. Algumas, também, são submarinas e necessitam deslocar mergulhadores treinados para o procedimento. Atualmente, a maioria das inspeções finas realizadas é manual, mas recentemente uma série de equipamentos automatizados tem surgido para facilitar, acelerar e dar mais precisão as medidas.

Atualmente, empresas têm desenvolvido e disponibilizado no mercado sistemas semi-automáticos e automáticos para a inspeção de determinadas zonas do duto. Um bom exemplo é um equipamento da Figura 17, que consiste em um mecanismo do tipo correia que é preso no duto envolvendo parte do mesmo de forma radial utilizando imãs. Esta correia, que serve como base do equipamento ao mesmo tempo serve de guia de um cabeçote onde se encontra o sensor de inspeção de espessura baseado em ultrassom ou correntes parasitas (Eddy Current).

Este cabeçote pode percorrer o duto radialmente sobre esta correia. O sensor de inspeção se encontra fixado numa haste que forma parte do cabeçote e se encontra paralelo ao duto. Nos modelos existentes, esta haste pode se deslocar na direção do eixo do duto até 500 mm. Com este equipamento, se poderia coletar de forma automática e contínua informação da espessura do duto numa zona de até 500 mm de comprimento no duto.

Para maiores superfícies a serem inspecionadas, o equipamento deverá ser alocado pelo operador. No modo automático, todos os movimentos são controlados por motores de corrente contínua e sensores de deslocamento angular do tipo encoders

ópticos. Os dados do sensor de ultrassom e da posição são registrados em um computador.



Figura 17 - Sistema da Quality Network Inc.

Outro modelo, apresentado na Figura 18, tem como variante o mecanismo para fixar o sistema de inspeção nos joelhos de dutos. Neste caso, o mecanismo é um pouco mais complexo, com duas correias e um trilho que une as correias. Sobre este trilho é deslocado o cabeçote de inspeção. Encontra-se também em desenvolvimento no mercado sistemas de inspeção similares, do tipo automático, apresentado na Figura 19 utilizando sensores de ultrassom. Um último sistema citado é o da Figura 20, responsável por inspeções realizadas recentemente pela Petrobras.



Figura 18 - Modelo para inspeção de joelhos de dutos



Figura 19 - Modelo automático com sensores ultrassom para inspeção de soldas



Figura 20 - Modelo da PASA, com representante no Brasil.

Uma última ferramenta citada é o GIP. É um sistema que detecta e quantifica corrosão através do método de fuga de campo magnético específicos para cada espessura de parede, adaptável para dutos de 4” a 46” de diâmetro, numa velocidade de 0,4 m/s. Ainda pode ser adaptado com ferramentas de ultrassom B-scan para avaliar perda de espessura. Detalhe do sistema GIP na Figura 21. Existem outros sistemas de inspeção externa que não foram citadas no presente trabalho por se assemelharem muito com os aqui apresentados.



Figura 21 – Sistema de inspeção externa de tubulações GIP.

### 3 DESENVOLVIMENTO

#### 3.1 Robô de Inspeção de Dutos – Histórico de desenvolvimento

A pesquisa teve início dentro das dependências do Laboratório de Metalurgia Física – LAMEF, que tem um histórico de prestação de serviços e desenvolvimento de equipamentos e testes para a PETROBRAS.

Uma das áreas fomentadas é a de realização de ensaios em dutos flexíveis (chamados Risers), utilizados na extração do petróleo do fundo do oceano. Havia a possibilidade de acompanhamento de ensaios de tração de Risers em tempo real. Porém, este tipo de ensaio proporciona um elevado grau de risco, visto os grandes carregamentos a eles impostos.

Com o objetivo de minimizar estes riscos, foi idealizado um equipamento especial para inspeção destes “Risers” durante os testes em laboratório, que consistia em um anel metálico que envolvia o Riser, com rodas responsáveis pela movimentação ao longo dele e um cabeçote que rotacionava seu perímetro.

Este projeto chamou a atenção pelo fato de representar uma solução simples para outro problema, a inspeção de dutos rígidos. Uma pesquisa geral em equipamentos comerciais detectou que nenhum equipamento disponível no mercado proporcionava a praticidade e flexibilidade observada no equipamento desenvolvido.

Dada a observação da demanda do mercado, partiu-se para a etapa de projeto. O desenvolvimento do sistema de inspeção de dutos seguiu as seguintes etapas em sua concepção:

- Projeto de Pesquisa: Sendo a primeira etapa do desenvolvimento do projeto, ela compreendeu a pesquisa do estado da arte, onde foi coletada e processada toda a informação possível sobre os procedimentos de inspeção de dutos, e alinhada com os objetivos do projeto. Incluiu a pesquisa dos parâmetros mecânicos, de controle e seleção de materiais para construção e simulação do projeto virtual.
- Projeto e Fabricação de Protótipo: A próxima etapa realizada foi a de projeto mecânico, elétrico e de controle do protótipo, seguindo da fabricação e montagem do conjunto. Com base na pesquisa dos principais parâmetros e o

desenho conceitual selecionado, foram realizados os desenhos em CAD e simulação com ferramenta computacional baseada no método de elementos finitos, a fim de analisar peças críticas submetidas a esforços.

- Ensaios e Testes para Qualificação em Laboratório: Esta etapa procurou a validação e garantia do funcionamento do protótipo quanto aos processos de inspeção. Para isto, o conjunto fabricado foi montado em um duto onde se fez os testes de movimentação do equipamento, e paralelamente com um sensor de ultrassom, fez-se os testes de inspeção na medição de espessura.
- Projeto e fabricação do Sistema de Inspeção de Dutos: Esta etapa foi a de maior duração no projeto, e baseou-se na otimização o protótipo, baseado nas informações obtidas nos testes em laboratório. Dos testes e rotinas observadas na etapa anterior, uma listagem de observações críticas foi a ferramenta principal de trabalho. Redesenhos de peças mecânicas e placas de circuito impresso comporão as atividades. As razões do funcionamento não satisfatório de certas partes foram avaliados criticamente para a evolução do projeto.
- Testes em campo: A etapa final do projeto, que procurou a validação e garantia do funcionamento quanto aos processos de inspeção, onde se pôde avaliar o sistema em condições reais de trabalho, testando a montagem/desmontagem no duto e a movimentação do sistema em situação de trabalho. Para isto, o conjunto foi montado em um duto de uma refinaria, onde se fez os testes de movimentação do equipamento, do funcionamento da régua com o arranjo de sensores de ultrassom e do mapeamento C-scan realizado pelo robô.

### 3.1.1 Protótipo conceitual

O projeto do sistema de inspeção de dutos iniciou-se através de um protótipo simplificado, que objetivou testar o conceito de montagem, movimentação e automação. Este protótipo, desenvolvido por um período de aproximadamente quatro meses, e cumpriu a função de avaliar o projeto conceitual e comprovar a viabilidade técnica e econômica de um robô Inspetor de Dutos (ID).

O protótipo consistiu em um anel envolvente à tubulação. Este anel, construído de aço, foi bipartido com o intuito de se facilitar a montagem em torno da tubulação, unido

através de blocos aparafusados em sua superfície interna, como pode ser visto na Figura 22. Sobre a superfície externa, uma camada de borracha foi colada para a movimentação de um cabeçote em seu entorno.

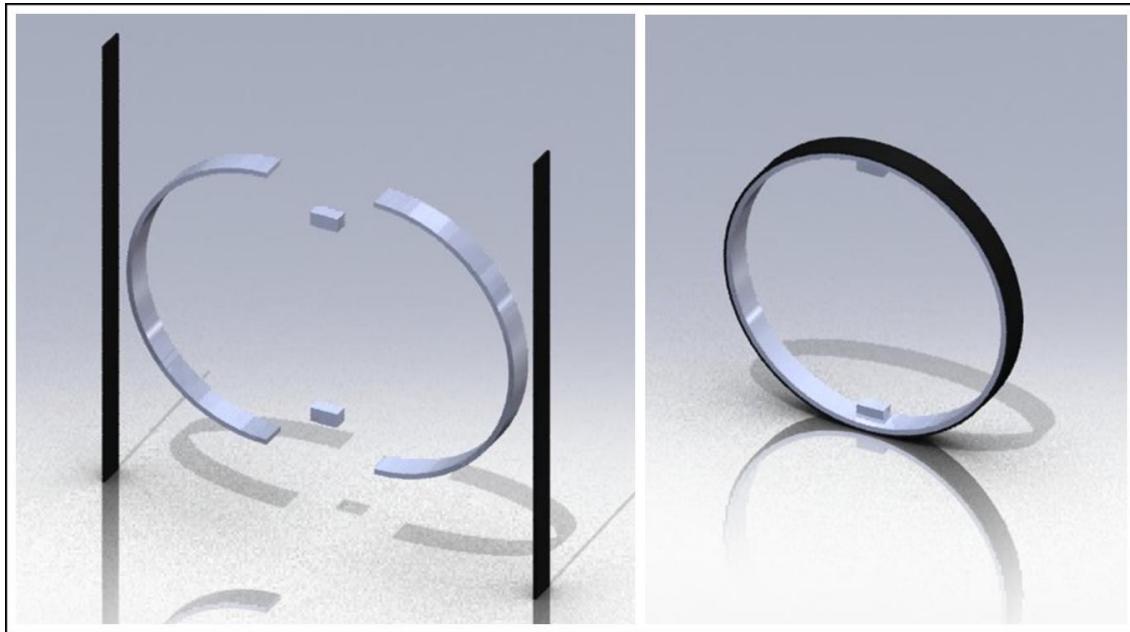


Figura 22 - à esquerda, vista explodida do anel bipartido, e a direita, a montagem do conjunto.

Para fazer o contato entre o anel e a superfície do duto, um conjunto de quatro módulos de rodas de movimentação longitudinal foi montado, conceitualmente ilustrada na Figura 23. Cada um destes quatro módulos é composto de duas rodas, sendo uma delas tracionada por um moto-redutor preso à estrutura. Ao centro destas duas rodas, um bloco faz a união entre o módulo das rodas e o anel, sendo esta união rígida para os dois módulos que trabalham ao topo da tubulação e dois módulos presos por molas e guias na fração inferior da tubulação. Esta montagem foi realizada desta forma para compensar a ação da gravidade que tende a descentralizar o anel, permitindo, porém que o conjunto ultrapasse pequenas descontinuidades na tubulação quando movimentado, como por exemplo, cordões de solda, sujeiras ou ovalizações do duto.

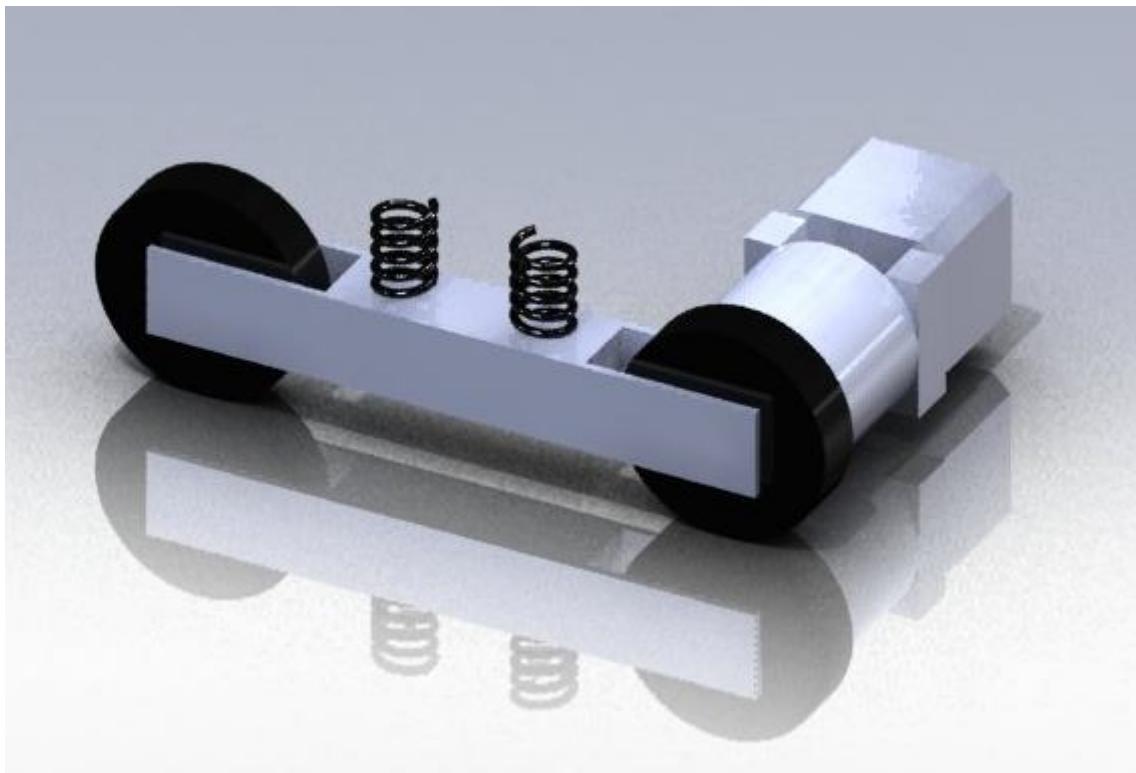


Figura 23 - Esquemático das rodas longitudinais do protótipo

Por fim, um cabeçote rotaciona o duto pela superfície externa do anel, rodando através de uma roda movimentada por um jogo de engrenagens helicoidais por cima da camada de borracha presa ao anel. Este cabeçote, devido à configuração de montagem do anel, pode rotacionar em 360 graus a tubulação sem obstáculos mecânicos ao movimento. Na parte frontal do cabeçote, um sistema quatro-barras movimentado por um jogo de engrenagens aproxima ou afasta da superfície do duto uma plataforma onde se prendeu um sensor de ultrassom, que com uma película de vaselina previamente aplicada, faz a medição da espessura. Detalhes do projeto em CAD e do protótipo desenvolvido na Figura 24.



Figura 24 - Desenho em CAD à esquerda e protótipo fabricado à direita.

Os testes do protótipo foram positivos, mostrando a viabilidade técnica do projeto, apesar de apresentar algumas limitações do sistema. Após uma avaliação de viabilidade econômica, o projeto se mostrou viável, e o projeto detalhado foi iniciado.

### 3.1.2 Equipamento final

O sistema buscou manter e maximizar os pontos positivos observados e corrigir os pontos negativos do protótipo. Conceitualmente, o projeto é uma cópia do protótipo, porém, as novas peças foram projetadas com ferramentas CAD e CAE para maximizar seu desempenho.

O projeto foi dividido modularmente em três partes básicas: Módulo de anéis bipartidos, módulo das rodas longitudinais e módulo rotacional de cabeçotes de ultrassom. Para inspecionar uma tubulação, monta-se ao anel referente ao diâmetro da tubulação a quantidade de rodas longitudinais necessárias e módulos rotacionais desejados previamente. É possível a montagem de até quatro módulos rotacionais simultaneamente, que resulta em uma rotação de apenas um quadrante (90 graus) para a inspeção do total perímetro do duto, o que acelera e facilita a dinâmica de inspeção.

As características construtivas permitem ao manipulador robótico movimentar-se ao longo do duto e curvas em todo o comprimento, mesmo com pequenas variações de diâmetro ou irregularidades da superfície externa, sem importar a posição do mesmo podendo-se movimentar até em dutos verticais. Detalhes construtivos do sistema estão ilustrados na Figura 25.

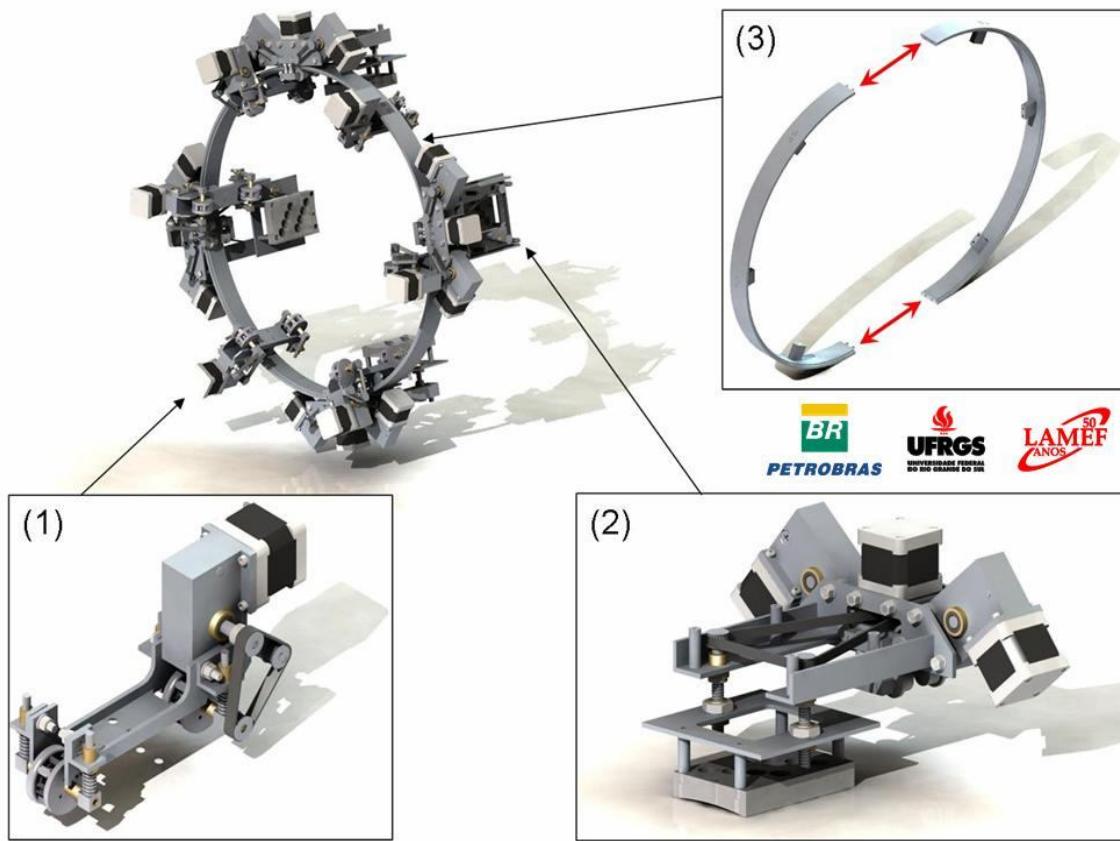


Figura 25 - O robô modular: O sistema de locomoção longitudinal (1) possui rodas com imãs para uma maior aderência sobre superfícies ferromagnéticas. O cabeçote (2) possui braços frontais onde é montada a régua de sensores. O anel (3) possui engates que permitem uma instalação rápida e simples do manipulador robótico sobre o duto. O sistema dispõe de vários anéis, um para cada diâmetro de duto.

### 3.1.2.1 Módulo de anéis bipartidos

**Módulo dos anéis bipartidos:** Foram usinados um conjunto de oito anéis bipartidos em alumínio com diferentes diâmetros para oito diferentes diâmetros de dutos mais utilizados na indústria. Sobre a superfície externa de cada anel, correntes presas por abas foram montadas para a tração dos cabeçotes.

### 3.1.2.2 Módulo de rodas longitudinais

Oito conjuntos de rodas longitudinais foram fabricadas, com estrutura de alumínio e tracionadas por uma caixa de redução fechada de engrenagens sem-fim/coroa auto-travantes. Esta condição de travamento foi optada para, quando montado sobre um duto

vertical, o robô permanecer parado sem que uma corrente elétrica seja aplicada aos motores. O eixo de saída deste jogo de engrenagens é ligado por correntes à rodas magnetizadas por ímas permanentes de Neodímio (para evitar o escorregamento) através de um braço móvel articulado no próprio eixo do redutor e preso à estrutura através de molas que dão uma maior flexibilidade de movimentação quando passar por variações do duto.

### 3.1.2.3 Módulo rotacional de cabeçotes de ultrassom

Foram fabricados quatro cabeçotes, cada um com dois conjuntos de caixa de engrenagens fechadas sem-fim/coroa que tracionam engrenagens de corrente sobre a corrente presa ao anel, e se mantém presas ao anel através de pequenas rodas guia que abraçam o anel pela sua superfície interna. Cada cabeçote tem quatro barras frontais onde se prendem as réguas de sensores.

### 3.1.2.4 Réguas de Sensores

A maior evolução do protótipo para o novo sistema foi a régua de sensores. Ao invés de somente um sensor, foi desenvolvido um arranjo de oito sensores em cada régua, distanciados de uma medida padrão que, quando movimentado rotacionalmente na tubulação, inspecionem uma área (C-scan), ao contrário do protótipo, que inspecionava uma linha (B-scan).

Esta régua, que pode ser observada na Figura 26, é usinada para cada diâmetro de duto de forma a manter os sensores sempre perpendiculares à superfície, e tem em sua área de contato com a tubulação uma espécie de piscina d'água com bordas de borracha flexível placas de redução de atrito no contato da régua com a superfície do duto.

A água faz a interface de medição entre sensor e superfície, que anteriormente era feita com vaselina e com contato direto do sensor com o duto. Esta piscina d'água é alimentada por uma bomba e mangueiras e é reciclada por outra mangueira de volta ao reservatório d'água. Ambas as mangueiras d'água chegam até o robô juntamente com o umbilical de energia e controle, e este sistema em condições de laboratório teve uma reciclagem de aproximadamente 90% da água, o que em trabalho de campo significa um grande ganho no que se trata de infraestrutura que é necessária para o acompanhamento da equipe de inspeção.

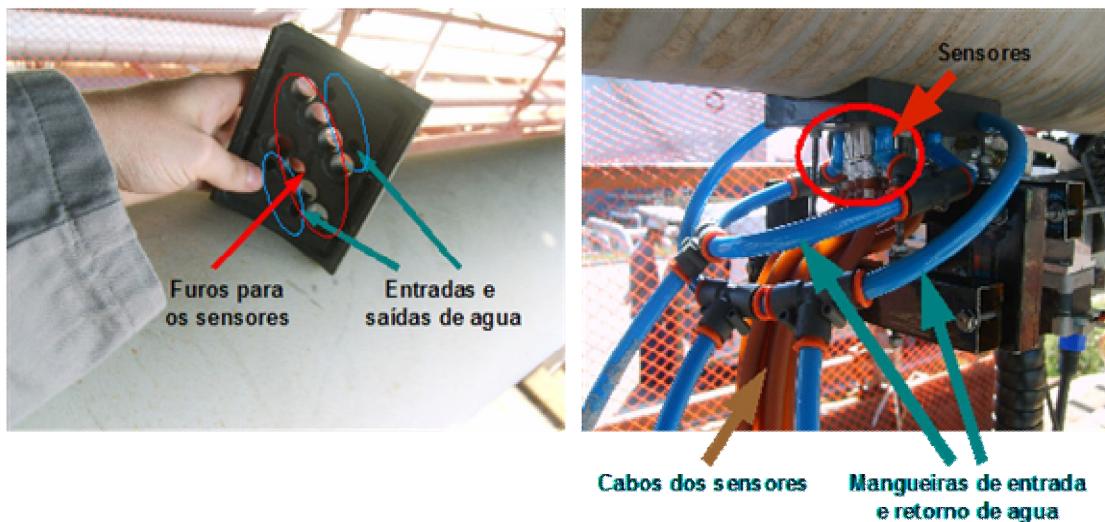


Figura 26 - Na esquerda observa-se a régua com a disposição de sensores. A direita a régua, sensores e acessórios montados num duto em testes de campo.

### 3.1.2.5 Eletrônica de controle

Sobre um dos módulos de cabeçotes rotacionais do robô, uma caixa de eletrônica está posicionada. Esta caixa é onde estão instaladas todas as placas de controle do equipamento que trabalham on-board, desde acionamento dos motores até leitura dos sensores de posição instalados no equipamento.

Os graus de liberdade do robô são acionados por motores de passo para maior precisão de posicionamento. Cada uma das rodas longitudinais contém um motor de passo instalado juntamente com uma caixa redutora de engrenagens sem-fim coroa de redução 1:10. Já cada módulo de cabeçotes rotacionais é equipado com dois motores de passo que tracionam o módulo sobre o anel através de redutores semelhantes aos das rodas longitudinais.

O posicionamento do robô em relação ao duto é medido de duas formas: Nas rodas longitudinais, um encoder é posicionado numa das rodas, que é responsável pela medição do deslocamento do ID ao longo do duto. Já sobre os módulos de cabeçotes rotacionais, um par de inclinômetros é responsável pela medição angular de 360 graus no duto. Optou-se por inclinômetros ao invés de encoders no módulo rotacional devido à possibilidade de o robô percorrer um caminho helicoidal ao andar no duto por longas distâncias, o que traria uma imprecisão na medição.

Até a caixa de eletrônica montada sobre o robô, cabos umbilicais chegam provenientes de outra caixa de eletrônica ligada a um computador, na base de comando do equipamento. Do software do computador, são enviadas as orientações de posicionamento do equipamento e são recebidos os sinais dos sensores de ultrassom provenientes do equipamento de leitura dos sensores. Na Figura 27, segue ilustrada a janela do software de controle do equipamento.

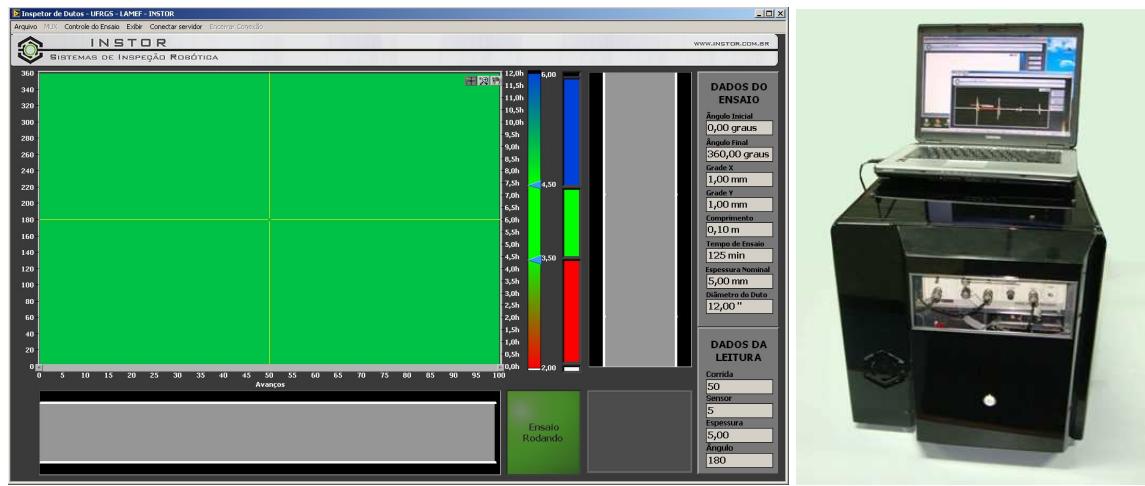


Figura 27 - Software de controle e hardware de comando do equipamento.

O sistema de medição do equipamento funciona pelo princípio de ultrassom, onde um aparelho mede o sinal de pulso eco recebido pelos sensores instalados no robô, e calcula o valor da espessura, o qual é enviado ao computador para ser registrado. O computador salva cada valor de espessura com seu correspondente valor de posição X-Y no plano inspecionado, conforme as leituras do encoder e dos inclinômetros instalados no robô e a geometria da régua previamente configurada no programa. O multiplexor permite ao aparelho de ultrassom ler todos os sensores instalados nas réguas do robô.

O software do computador que controla o robô ilustra o desenho do duto planificado, e o operador marca a trajetória ou zona de inspeção. O programa adquire os dados de espessura relacionados com os canais lidos, que são enviados pelo aparelho ultrassom através da porta COM do microcomputador, e também adquire os valores de posição longitudinal e angular do sistema autônomo para então fazer a sincronização dessas informações e apresentar os dados obtidos em um gráfico 2D, com um sistema de

cores representando as espessuras em função das distâncias lidas. As leituras de espessura são representadas em escala de cores num gráfico que representaria a zona inspecionada, no formato de C-scan.

Uma imagem de C-scan mostra um panorama da espessura sobre uma superfície do duto percorrida pelo sistema de aquisição. As espessuras são discriminadas pelo seu valor absoluto e apresentadas por uma escala de cores, onde vermelho é a menor espessura e azul a maior. Os pontos são dispostos de maneira que o eixo horizontal representa a distância longitudinal da leitura com relação ao inicio do ensaio e o eixo vertical representa a distância transversal no instante da leitura.

### 3.1.2.6 Modos de funcionamento

O manipulador robótico recebe comandos e configurações do operador e envia ao mesmo a posição atual e o valor da espessura em tempo real, porém, é possível fazer o mapeamento de toda a área externa do duto enquanto não houver suportes ou entradas/saídas. Na Figura 28, o equipamento montado em tubulação de testes em laboratório.

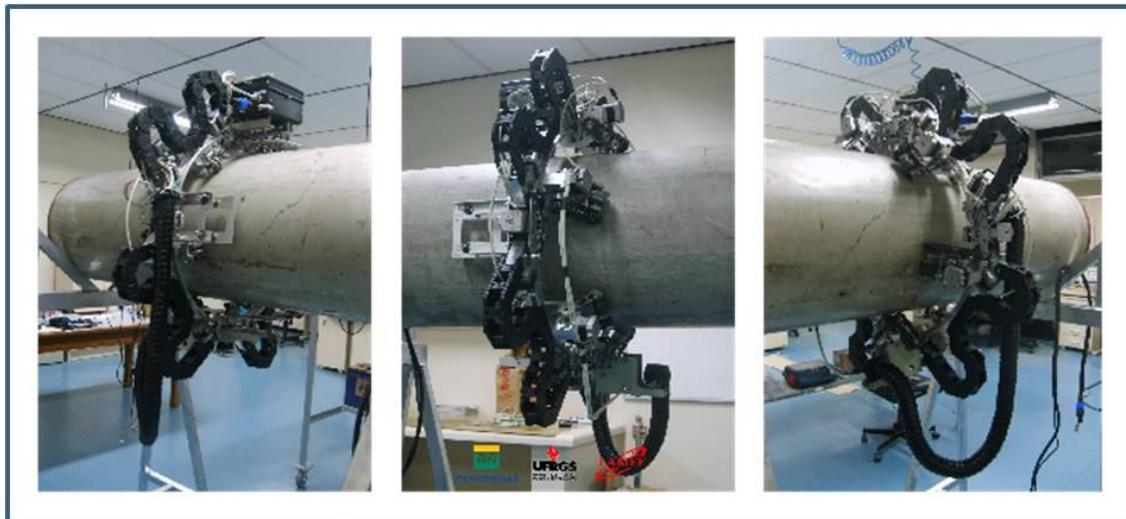


Figura 28 - Diferentes vistas do equipamento montado em laboratório sobre um duto de 16"

Foram projetados três modos básicos de inspeção utilizando este sistema de inspeção: semi-automático, automático com monitoramento à distância e autônomo.

- Semi-automático: O operador comanda o manipulador robótico utilizando um joystick e observa a espessura apresentada na tela do instrumento de medição.
- Automático, monitorado a distância: O operador configura a trajetória do manipulador robótico no computador e logo pode acompanhar o mapeamento do manipulador robótico na tela do computador.
- Modo autônomo: O operador configura a trajetória do manipulador robótico no computador e logo o manipulador robótico realiza automaticamente o mapeamento salvando na memória interna do microcomputador. Esta inspeção pode ser configurada para ser realizada periodicamente por tempo indefinido. Na memória do microcomputador obteríamos sempre as últimas medições realizadas que podem ser recolhidas pelo operador ligando o computador no manipulador robótico.

### 3.2 Testes

Testes em laboratório foram realizados para avaliação do funcionamento do sistema. Para tal, o sistema foi montado inicialmente em tubulação de 16”, onde testes de movimentação foram feitos. Num destes testes, o sistema de ultrassom foi substituído por um sistema de apalpadores, onde foi possível analisar a geometria externa na tubulação. Na sequência, o mesmo equipamento foi montado sobre uma tubulação de 10” de diâmetro e espessura nominal de 9mm, onde uma perda de material foi simulada na face interna inferior do duto. Após, um teste em campo foi realizado nas instalações da REFAP, Refinaria da PETROBRAS localizada em Canoas, RS. O sistema foi montado no local de testes sobre uma linha 10” com uma espessura nominal de 7mm. Por fim, o sistema foi montado em um duto de acrílico com usinagens internas para simular perda de material.

#### 3.2.1 Testes em laboratório

##### 3.2.1.1 Testes de movimentação

Os primeiros testes feitos no sistema após a sua montagem foram os testes iniciais de movimentação. Nestes, a dinâmica de funcionamento de todos os graus de liberdade foram avaliados. O objetivo é avaliar criticamente o funcionamento dos acionadores dos

graus de liberdade do conjunto, verificando se atenderam os objetivos do projeto. Os graus de liberdade avaliados foram a movimentação longitudinal, a rotação dos módulos de cabeçotes em torno do anel e o sistema de aproximação e afastamento da régua de sensores da superfície do duto.

### 3.2.1.2 Teste de medição geométrica externa

O teste seguinte do equipamento foi realizado utilizando um sistema de medição de distância montado sobre um dos cabeçotes rotacionais do robô. Este sensor, quando montado sobre o cabeçote e com sua ponteira – ou apalpador - apoiada sobre a superfície do duto, tem a capacidade de medir variações dimensionais do duto, como ovalizações, amassamentos, perda de material por corrosão, entre outras variações.

Um primeiro procedimento de testes foi realizado rotacionando o cabeçote com o apalpador em 360° em torno do duto, simplesmente com a superfície sem danos. O objetivo deste procedimento é de medir a não-concentricidade do robô em relação ao duto, causada pela força de gravidade.

Na sequência, um anteparo foi colado na superfície do duto, representando um aumento dimensional no raio do duto. Este procedimento foi realizado para testar a sensibilidade de medição do equipamento com apalpador para medição dimensional. Uma imagem da montagem do apalpador encontra-se detalhados na Figura 29.

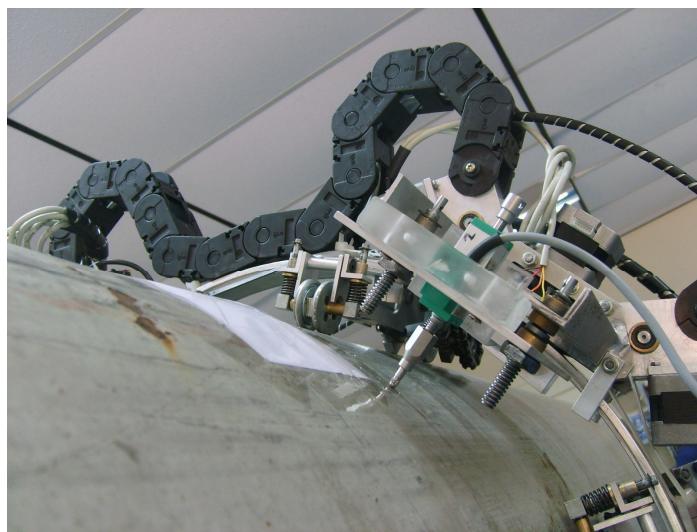


Figura 29 – Foto mostrando o apalpador montado sobre um módulo rotacional com ponteira encostada na superfície do duto. Em branco colado no duto, uma série de papéis dobrados e colados com fita adesiva representam uma pequena variação no raio do duto.

### 3.2.1.3 Teste com sistema de ultrassom embarcado

Como operação prévia aos testes em campo, testes do sistema de ultrassom para medição de espessuras foi montado em laboratório. O equipamento foi montado sobre um duto de 10" de diâmetro, com um arranjo de ultrassom contendo 8 cabeçotes de medição posicionados numa defasagem de 8 mm de distância.

O sistema de bombeamento elaborado contém uma bomba d'água montada submersa em um reservatório. A saída da bomba tem uma tubulação com duas saídas, uma das saídas retorna a água para o mesmo reservatório de onde a água foi captada, e esta contém uma válvula de esfera para variar a sua vazão de passagem. A outra saída da tubulação da bomba é conectada às mangueiras que levam direto à régua de sensores de ultrassom. A vazão d'água mandada para as réguas de sensores é controlada através da abertura ou fechamento da válvula que devolve o fluxo da bomba para o reservatório.

A régua de ultrassom recebe a água por orifícios na sua parte superior, inundando uma região que envolve as faces de medição do sensor de ultrassom e a superfície do duto, formando uma espécie de piscina por baixo dos sensores. Às bordas da régua, um canal usinado e contornado por uma aba de borracha tem a função de acumular o excesso de água enviado para a régua. A este canal, mangueiras são montadas com a função de recolher o excesso de água e retorná-lo ao reservatório, podendo, assim, reaproveitá-la.

O objetivo destes testes prévios aos testes de campo foram de testar este sistema de bombeamento de água para acoplamento dos sensores, os sistemas de recolhimento de água para realimentação do sistema de bombeamento, verificação do posicionamento dos sensores em relação à superfície do duto a ser medido, e a aquisição de dados de c-scan para o computador.

### 3.2.2 Testes em campo

A primeira inspeção de corrosão em dutos utilizando o equipamento foi realizada no dia 28/04/2009 nas instalações da REFAP, Refinaria da PETROBRAS localizada em Canoas, RS. O ID foi montado no local de teste, a linha com TAG 10"-470-BD-2005-Bb, uma linha de alívio para tocha da UDS (Unidade de solventes).

O sistema de medição montado no ID funciona pelo princípio de ultrassom e consiste em um equipamento MX25 PLUS, 8 sensores de ultrassom por imersão, um

multiplexor de 8 canais, sensores de posição e um computador utilizado para registrar os dados.

O aparelho MX25 PLUS mede o sinal de pulso-eco recebido pelos sensores e calcula o valor da espessura, o qual é enviado ao computador para ser registrado. O computador salva cada valor de espessura com seu correspondente valor de posição X Y no plano inspecionado. O multiplexor permite ao MX25 ler os 8 sensores distribuídos na régua do ID. Os sensores de ultrassom utilizam uma coluna de água como acoplamento permitindo a propagação do sinal de ultrassom.

O aparelho de ultrassom é apresentado na Figura 30, onde se pode visualizar o sinal de pulso-eco lido em um dos sensores do ID. O duto de 10" inspecionado na refinaria possui uma espessura nominal de 7 mm que pode ser observada no aparelho de ultrassom apresentado nesta figura.



Figura 30 - Aparelho de ultrassom utilizado

### 3.2.3 Testes em duto de demonstração

Um duto de demonstração foi construído com o intuito de melhor visualizar o funcionamento do sistema. Para isto, foi usinada numa fresa computadorizada em uma

chapa de acrílico de 6mm de espessura as palavras “UFRGS”, “LAMEF” e ‘PETROBRAS’, nas profundidades de 2 mm, 2,5mm e 3mm. Logo após, esta chapa foi calandrada na forma de um duto de 10” de diâmetro externo, de forma a deixar as letras usinadas pela face interna do duto.

O inspetor de dutos foi montado sobre esta tubulação com uma modificação: a régua de sensores anteriormente utilizada foi substituída por uma sapata contendo um sensor de ultrassom, na qual a água entra pela lateral e flui sobre um perfil cônico, saindo por um furo de menor diâmetro no contato com o duto. Um sensor de 20MHz foi utilizado neste arranjo. Uma foto do duto de demonstração com o robô inspetor de dutos montado está na Figura 31. Já na Figura 32, tem-se um esquemático de funcionamento desta nova concepção de medição por ultrassom.



Figura 31 – Duto de demonstração em acrílico com o robô de Inspeção de Dutos montado. Repare nas palavras “UFRGS” no topo, “LAMEF” no centro e “PETROBRAS” na parte inferior da imagem: estas palavras estão usinadas na face interna do duto em diferentes profundidades.

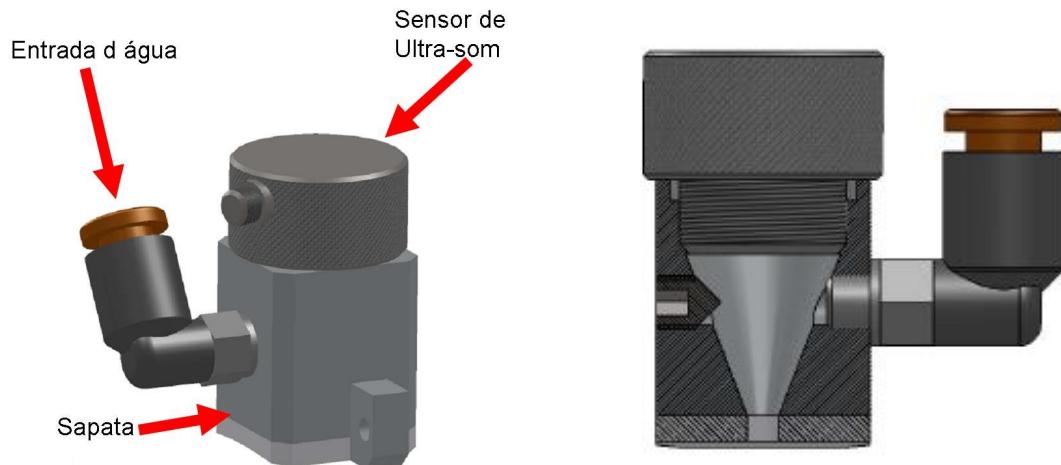


Figura 32 – À esquerda, uma imagem externa esquemática da montagem dos sensores de ultrassom. À direita, uma vista em corte da mesma montagem demonstrando o perfil interno côncico.

O sistema, por ter um sensor de ultrassom somente montado, é mais lento do que a concepção de oito sensores. Porém com este formato, uma melhor resolução é possível, de forma a podermos desenhar no C-scan as letras usinadas de forma mais precisa.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Testes

Nos tópicos a seguir, serão apresentados os resultados de cada teste realizado durante o desenvolvimento do projeto, de forma a citar os pontos positivos e negativos observados em cada teste e subsequentemente as propostas de melhorias de curto prazo aplicadas para os próximos testes planejados. Desta forma, tenta-se demonstrar o histórico de evolução da pesquisa do robô de inspeção de dutos, desde suas concepções iniciais até o formato final.

#### 4.1.1 Testes em laboratório

##### 4.1.1.1 Testes de movimentação

Três alterações foram executadas com a avaliação nos testes de movimentação do sistema. A primeira delas foi nas rodas longitudinais, onde inicialmente foi utilizado um sistema de correias sincronizadoras para a transmissão de tração dos redutores para as rodas. Este sistema se mostrou pouco eficiente, onde eventualmente apresentava escorregamento da correia sobre a polia, que causava perda de precisão na movimentação do robô. Este sistema foi substituído por um sistema de correntes e engrenagens articuladas e tracionadas por molas em posições alternativas à utilizada anteriormente. Na Figura 33, ilustra-se as diferenças entre o sistema antigo e o novo sistema desenvolvido.

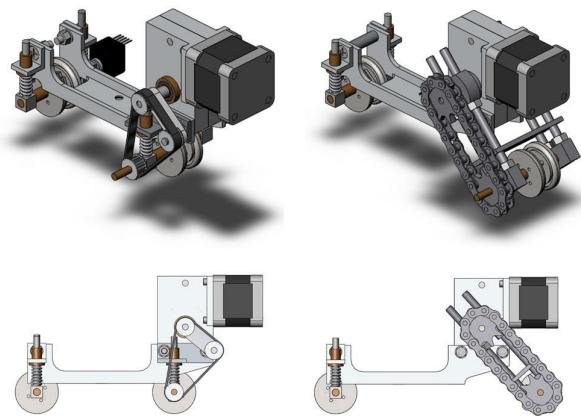


Figura 33 – À esquerda, sistema com correias sincronizadoras, substituído pelo sistema por correntes e engrenagens, à direita

A segunda alteração tem relação com a forma de movimentação do cabeçote rotacional sobre o anel. Inicialmente o sistema se tracionava através de duas rodas com cobertura de borracha sobre a superfície externa do anel, mas o conceito apresentou escorregamento em certas posições. Este sistema foi então substituído por sistemas de engrenagens e correntes que eliminou o problema observado. A comparação entre os dois sistemas está ilustrada na Figura 34.

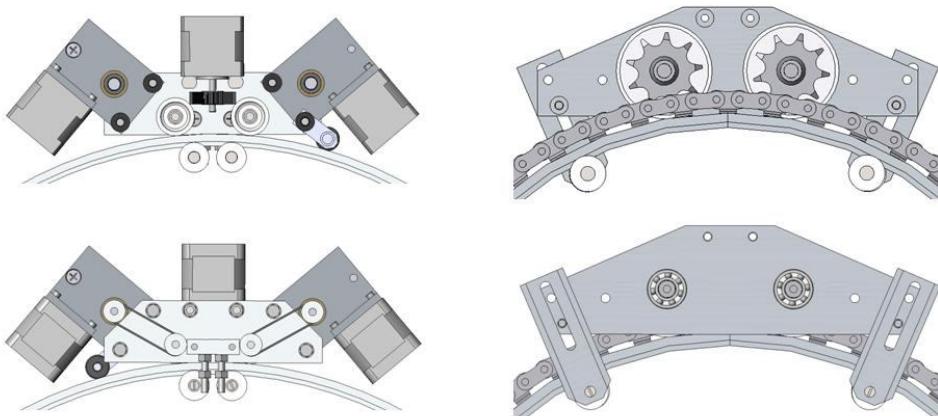


Figura 34 – À esquerda, o sistema tracionado por atrito. À direita, o sistema tracionado por corrente e engrenagens substituto.

Por fim, a terceira alteração tem a ver com a eliminação de um grau de liberdade controlado nos cabeçotes rotacionais que fazem a movimentação de aproximação e afastamento da régua da superfície do duto. Devido à força da gravidade, a distância entre o anel e a superfície do duto na posição superior do duto é menor do que a distância do anel e a superfície inferior do duto, como ilustrado na Figura 37. Isto obrigava a se monitorar e movimentar constantemente este grau de liberdade para manter o contato das réguas de sensores com a superfície do duto. Este sistema foi substituído por um jogo de molas que mantém a régua de sensores pressionada contra o duto. Desta forma, o funcionamento do equipamento foi simplificado. A comparação entre os sistemas está ilustrada na Figura 35.

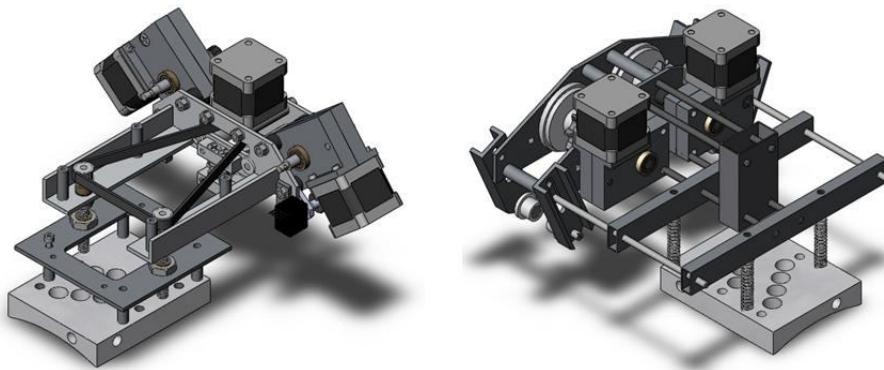


Figura 35 – À esquerda, a régua de sensores de ultrassom controlado por motor. À direita, a régua de sensores pressionada por molas.

Os testes feitos nesta etapa foram os testes onde observou-se a dinâmica de funcionamento de todos os graus de liberdade do equipamento. O objetivo foi avaliar o funcionamento dos acionadores dos graus de liberdade do conjunto, verificando se atenderam os objetivos do projeto. Os graus de liberdade avaliados foram a movimentação longitudinal, a rotação dos módulos de cabeçotes em torno do anel e o sistema de aproximação e afastamento da régua de sensores da superfície do duto.

As alterações aplicadas nesta fase de testes mostraram a evolução do funcionamento do robô, deixando seus movimentos mais seguros quanto a posicionamento preciso. A avaliação destes testes preliminares foram extremamente positivas, pois mostraram algumas deficiências de projeto à tempo de correções, viabilizando-se assim a realização das próximas etapas de testes.

#### 4.1.1.2 Teste de medição geométrica externa

Para o segundo teste realizado com o equipamento, montando-se o sensor apalpador para medição da geometria externa do duto, o primeiro procedimento de teste foi realizado rotacionando-se o cabeçote com o apalpador em  $360^\circ$  em torno do duto, simplesmente com a superfície sem danos. Na Figura 36, ilustra-se o gráfico c-scan gerado no procedimento de testes com sensor apalpador.

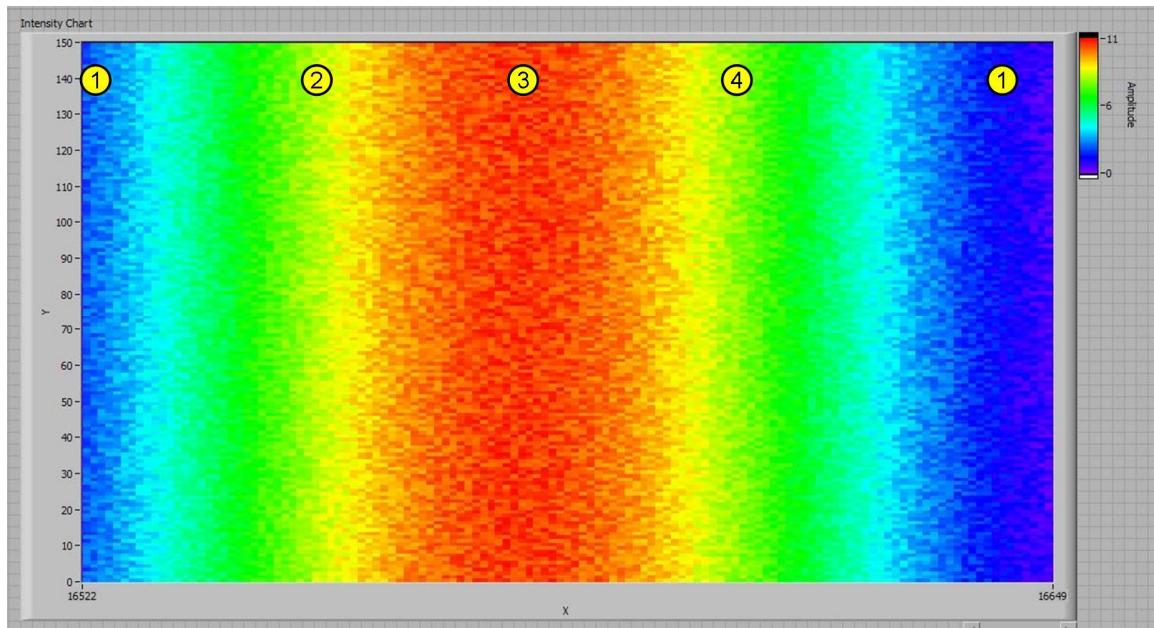


Figura 36 – Gráfico C-scan da inspeção da geometria externa do duto com sensor apalpador.

Na imagem da Figura 36, o eixo vertical representa a distância longitudinal do duto, e o eixo horizontal representa o perímetro do duto. A escala de medidas da legenda à superior direita da imagem é em milímetros.

Observa-se claramente o padrão de cores que variam de azul a vermelho, e novamente a azul, da esquerda para direita. Os pontos ilustrados em círculos amarelos de 1 a 4 correspondem aos pontos de 1 a 4 da Figura 37. As duas regiões das extremidades direita e esquerda representam o ponto mais superior do duto, onde o sistema do apalpador foi montado e configurado como ponto inicial da inspeção. Ao rotacionar o módulo de cabeçote, o gráfico chega ao padrão de cor vermelha, que representa o ponto inferior do duto. Neste ponto, observa-se na escala que o sensor apalpador mede uma distância de aproximadamente 11mm. Este valor representa a distância de desconcentricidade do anel do robô em relação ao centro do duto, que é causado pela ação da força da gravidade, conforme demonstrado esquematicamente na Figura 37.

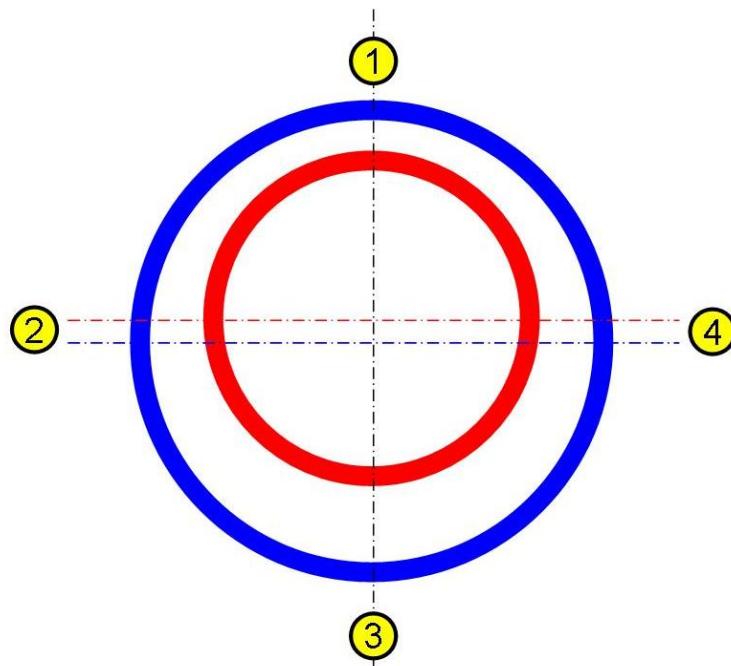


Figura 37 – Esquematicamente se ilustra a excentricidade medida entre o anel – em azul – e o duto – em vermelho – com o sistema de apalpador. Os pontos 1, 2, 3 e 4 correspondem aos mesmos números da Figura 36.

Para diminuir esta excentricidade, um aumento no coeficiente de rigidez das molas montadas nas rodas longitudinais superiores foi proposto. A excentricidade não foi considerada tão prejudicial ao sistema desde que mantida em uma faixa de, no máximo, 10mm. Esta distância será compensada com molas na régua de sensores, exploradas em resultados posteriores.

Na sequência, um anteparo foi colado na superfície do duto, representando um aumento dimensional no raio do duto, conforme foi apresentado na Figura 29. Este procedimento foi realizado para testar a sensibilidade de medição do equipamento com apalpador para medição dimensional.

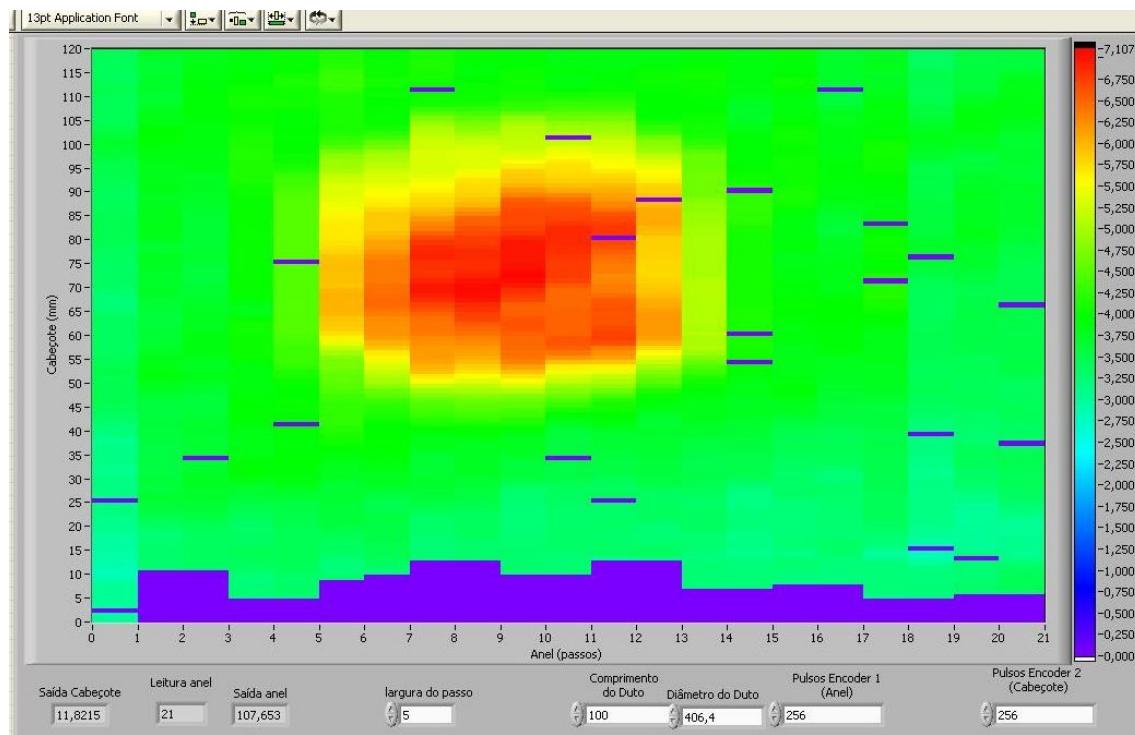


Figura 38 – Resultado do C-scan da inspeção geométrica externa do duto com anteparo de papel colado na superfície externa.

Na Figura 38, o eixo vertical representa a distância longitudinal no duto e o eixo horizontal representa o perímetro do duto. A escala à direita está em milímetros. Observa-se em vermelho no centro da imagem colorida a região referente ao papel colado na superfície do duto, de aproximadamente 2,5mm de altura, destacando-se sobre um fundo verde representando a superfície do duto sem sobressaltos. Os pontos falso em roxo na imagem são falhas pontuais na aquisição de dados do sistema. O sistema com apalpadores montados foi considerado muito satisfatório, retornando com facilidade de aquisição e de interpretação dos dados.

Os testes realizados nesta etapa mostraram que a sensibilidade do sensor de medição da geometria externa do duto foi considerado satisfatório, detectando diferenças numa faixa de zero à 2,5mm de variação no raio do duto. Concluiu-se, por fim, que a aplicação de um sistema de medição de variações de raio no duto se mostrou uma ferramenta simples e eficiente, com flexibilidade e precisão e de fácil interpretação dos dados obtidos.

#### 4.1.1.3 Teste com sistema de ultrassom embarcado

O teste subsequente realizado foram procedimentos com o sistema de ultrassom para medição de espessuras, montado em laboratório. O equipamento foi montado sobre um duto de 10" de diâmetro, com um arranjo de ultrassom de 8 cabeçotes de medição posicionados numa defasagem de 8 mm de distância. Como dito anteriormente, o objetivo destes testes foram de testar os sistemas de bombeamento de água para acoplamento dos sensores, os sistemas de recolhimento de água para realimentação do sistema de bombeamento, verificação do posicionamento dos sensores em relação à superfície do duto a ser medido, e a aquisição de dados de C-scan para o computador.

O robô foi movimentado de duas formas: primeiramente na sua porção inferior, por um percurso de 120° na geratriz inferior, e posteriormente por 120° na geratriz superior. A geratriz inferior foi testada pois através de pesquisa prévia se constatou ser a região onde o maior percentual de corrosão ocorre em tubulações em tubulações reais. A geratriz superior, por sua vez, foi testada por representar a região de maior dificuldade em reproduzir o acoplamento por água na régua de sensores. Neste teste, variou-se a posição dos sensores, o fluxo d'água e o fluxo de sucção do sistema de recolhimento d'água para realimentação do sistema de bombeamento.

O sistema de bombeamento se mostrou eficiente quanto ao seu controle de fluxo mandado aos sensores. A água chegou aos sensores numa quantidade adequada à necessidade de se inundar a piscina por baixo dos sensores de ultrassom. O sistema de recolhimento d'água mostrou-se eficiente para evitar a perda da água por frestas entre a borracha de vedação e a superfície do duto. Nos testes de laboratório, mais de 80% da água pôde ser recuperada e reaproveitada pelo sistema.

O sistema de recolhimento teve um revés no seu desempenho pelo excesso de recolhimento d'água que causava a entrada de bolhas de ar na piscina por baixo dos sensores. Estas bolhas de ar ocasionavam perda de sinal de ultrassom, comprometendo o desempenho do sistema. O problema foi reduzido abrindo-se furos nas mangueiras de recolhimento d'água em pontos superiores à régua, causando um alívio de pressão negativa nas mangueiras que sugavam a água.

Com a alteração, houve aumento de desempenho em praticamente todas as situações da régua, exceto quando esta estiver trabalhando nos quadrantes superiores do

duto. Nestas situações, as bolhas de ar que entram na mangueira ou por frestas da borda de borracha da régua, por força de empuxo, ficam aprisionadas entre a superfície do duto e a face de medição do sensor, não conseguindo ser recolhida pelas mangueiras de recolhimento devido ao perfil côncavo da régua.

Para esta situação, a melhor forma de otimizar o desempenho do conjunto é o aumento do fluxo d'água para dentro da piscina da régua. Desta forma as bolhas não conseguem crescer devido ao fluxo turbulento do líquido, mas a perda de água pela borda da régua é aumentada devido ao aumento de pressão dinâmica da água.

Para estabilizar o sinal de ultrassom, foi variada a altura de cada sensor em relação à superfície do duto. Este procedimento ocorreu de forma manual, acompanhando-se o sinal de ultrassom de cada sensor individualmente com a variação de altura deste. As distâncias relativas entre a face de medição do sensor e a superfície ficaram em aproximadamente 10mm.

Estes testes foram realizados com o objetivo de testar este sistema de bombeamento de água para acoplamento dos sensores, os sistemas de recolhimento de água para realimentação do sistema de bombeamento, a verificação do posicionamento dos sensores em relação à superfície do duto a ser medido, e a aquisição de dados de c-scan para o computador.

O sistema de bombeamento foi avaliado positivamente. Já o sistema de recolhimento d'água foi positivo quanto ao seu desempenho geral, resultando em mais de 80% da água recuperada e reaproveitada pelo sistema, mas teve um revés pelo excesso de recolhimento d'água em certos pontos da inspeção, ocasionando a entrada de bolhas de ar na piscina por baixo dos sensores. O problema foi reduzido abrindo-se furos nas mangueiras de recolhimento d'água em pontos superiores à régua, causando um alívio de pressão negativa nas mangueiras que sugavam a água, aumentando-se assim o desempenho em praticamente todas as situações da régua. Para posições específicas dos módulos rotacionais, a solução encontrada foi o aumento do fluxo d'água para dentro da piscina da régua, reduzindo as bolhas na piscina da régua, mas aumentando a perda de água pela borda da régua.

O sistema testado foi avaliado como bom, tendo como desempenho geral avaliado como positivo, mas com algumas dificuldades de aplicação prática do sistema de régua

de ultrassom. Mais de 90% dos sinais de ultrassom foram captados no teste em laboratório, porém algumas regiões críticas elucidaram que ainda alguma melhoria poderá ser aplicada.

#### 4.1.2 Testes em campo

O teste de inspeção foi realizado com o duto em operação, pois este sistema automático de inspeção se desloca por fora da tubulação, não sendo necessário interromper a operação normal do duto. O equipamento foi montado sobre o duto numa operação que levou aproximadamente 5 minutos de montagem e 10 minutos para escanear um percurso de 1.66m. Parte desta tubulação pode ser observada na Figura 39.



Figura 39 - ID montado no duto da REFAP

Experimentaram-se dificuldades com o fornecimento de água necessária para criar a coluna d'água para o acoplamento entre os sensores de ultrassom e a superfície do duto. Vazões maiores que as experimentadas em laboratório foram necessárias devido às

perdas excessivas da água que fazia o acoplamento. Isto aconteceu pelo fato do diâmetro externo do duto ser um pouco diferente do diâmetro para o qual a régua foi projetada.

Os resultados obtidos em campo são apresentados no formato de C-scan utilizando um gráfico de cores cuja escala é ajustada para limites máximos e mínimos para aumentar a resolução.

Nas Figura 40 e Figura 41, podem-se observar os resultados da medição de espessura por ultrassom correspondentes à seção inferior do duto. Na primeira figura, apresenta-se um gráfico de cores situado entre 8mm e 5mm. Esta mesma figura é observada na figura seguinte, mas com uma escala de cores diferente já que são visualizados somente os pontos com espessuras próximas a 6 mm em cor azul. Nestas figuras observam-se uma matriz de 24x208 pontos que representam o quadrante inferior do duto em uma longitude de 1.66 m e foram obtidos em um tempo de 10 minutos. A velocidade do equipamento foi limitada pela taxa de aquisição do sistema de medição utilizado.

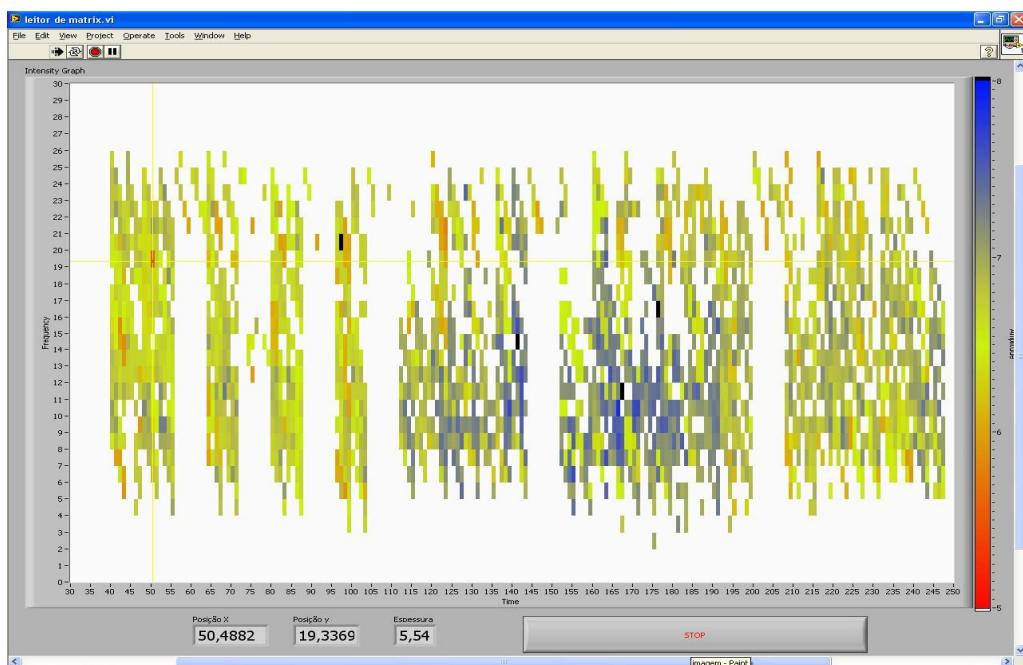


Figura 40 - Medição de espessura por ultrassom na seção inferior do duto

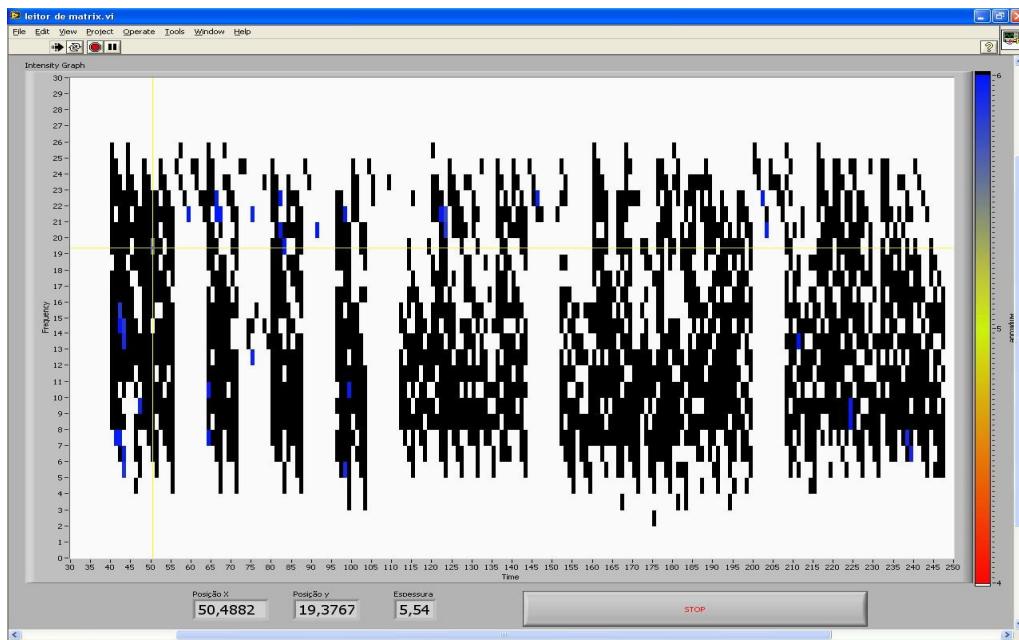


Figura 41 - Medição de espessura por ultrassom na seção inferior do duto

Nestes gráficos, o eixo vertical representa o perímetro do duto e o eixo horizontal representa o comprimento do duto. São visualizadas linhas de pontos perdidas devido a problemas de alinhamento entre a régua e o duto bem como problemas ocorridos com o cabo de comunicação entre o aparelho de ultrassom e o multiplexor. Devido a estes problemas, o gráfico C-scan obtido e apresentado nas duas figuras é pouco conclusivo. Uma inspeção manual na mesma tubulação logo após o procedimento com o ID realizada pela equipe da refinaria observou o bom estado da tubulação.

Os problemas observados no teste em campo foram solucionados tomando algumas medidas observadas pela equipe de trabalho. Para comprovação da validade das medidas tomadas, um novo teste em laboratório foi realizado. Para este teste com a função de avaliar o C-scan elaborado pelo equipamento até aqui descrito, foi esmerilhado na face interior de um duto de 10" uma perda de material, simulando uma região de corrosão generalizada. Na Figura 42, mostra-se a região descrita.

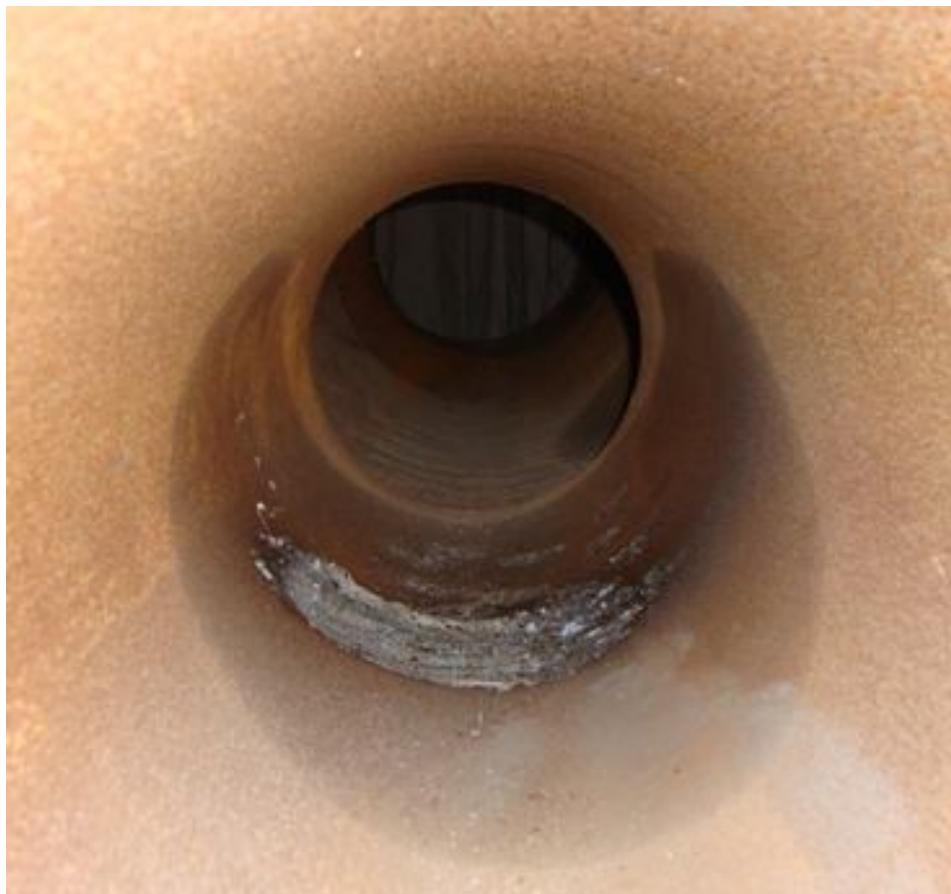


Figura 42 – Defeito em forma de corrosão generalizada simulado na região interna do duto.

O robô inspetor de dutos escaneou o duto ao longo da geratriz inferior do duto acima ilustrado em busca de localizar a imperfeição simulada. Os resultados do scanner estão na Figura 43.

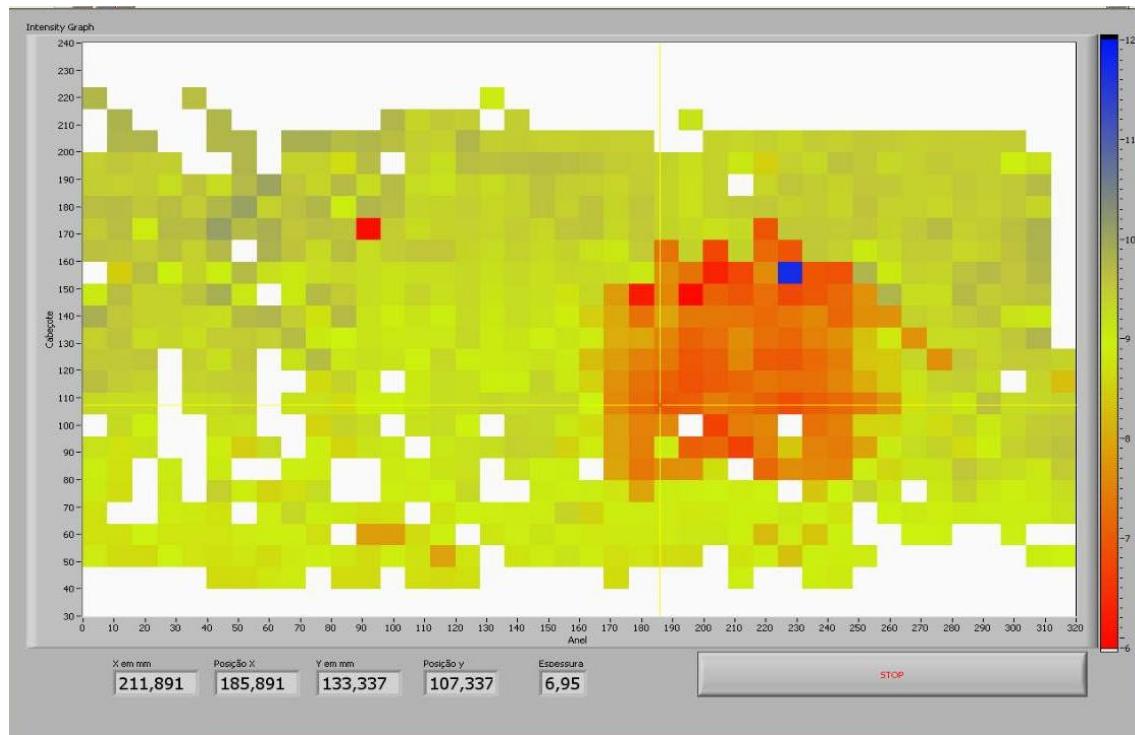


Figura 43 – C-scan do duto com perda de espessura interna simulada em laboratório.

Na figura acima, o eixo vertical representa o perímetro do duto, e o eixo horizontal representa o comprimento do duto. A escala à direita representa a espessura medida pelos sensores de ultrassom em milímetros, e a resolução de pontos captados é de 64mm<sup>2</sup> (um ponto a cada 8 mm).

Na figura, observa-se claramente um padrão vermelho no centro à direita da imagem colorida. Esta região e as espessuras representadas pela escala coincidem com o defeito simulado. Observa-se, também, diversos pontos em branco, que correspondem a pontos de ultrassom não captados devido a perdas de sinal dos cabeçotes. Estes pontos, pela observação do aparelho de ultrassom durante o teste, correspondem à perda de sinal devido a bolhas de ar entre a superfície do duto e os cabeçotes de ultrassom. Alguns outros pontos no gráfico C-scan diferem drasticamente da matriz de fundo, como o ponto vermelho isolado no centro à esquerda ou o ponto azul dentro da região vermelha correspondente à corrosão simulada. Foi concluído que estes pontos correspondem também a perdas de sinal de ultrassom pela observação do equipamento de aquisição durante o funcionamento do equipamento.

Em geral, a avaliação dos testes em campo foi positiva, pelo fato de o sistema se mostrar apto mecanicamente a desempenhar o papel para o qual foi concebido. A montagem e a desmontagem, bem como a dinâmica de funcionamento se mostraram satisfatoriamente boas. A avaliação do teste não foi considerada ótima devido às dificuldades com a aquisição de dados de ultrassom no local do teste.

Após a solução dos problemas de comunicação solucionados, um teste adicional foi realizado simulando um defeito por corrosão generalizada dentro de uma tubulação de teste. Durante o teste em laboratório, procurou-se reproduzir as situações encontradas no campo para avaliar mais realisticamente os resultados visualizados.

Os resultados obtidos nestes testes foram avaliados como muito bons. O tempo de montagem e desmontagem do sistema, bem como o tempo de inspeção foram os mesmos dos observados em campo. Os vazamentos de água foram um pouco menores, mas não o suficiente para conclusões diferentes das já tomadas anteriormente. O sistema de aquisição de dados, por sua vez, mostrou-se muito superior após as alterações realizadas.

#### 4.1.3 Testes em duto de demonstração

Um duto de demonstração construído em acrílico, com as palavras “UFRGS”, “LAMEF” e “PETROBRAS” usinadas na face interna nas profundidades de 2mm, 2,5mm e 3mm, respectivamente, foi escaneado com o Inspetor de Dutos no intuito de se testar o sistema quanto a sua sensibilidade e precisão. Na Figura 44, mostra-se o sistema do ID montado sobre este duto comentado.



Figura 44 – Robô Inspetor em duto de acrílico.

Uma mudança crucial em comparação com os testes anteriores foi aplicada: ao invés de uma régua de 8 sensores, foi utilizada uma sapata com somente um sensor, e

com um perfil cônico de fluxo d'água para acoplamento, conforme anteriormente detalhado na Figura 32. Como dito, o sistema, por ter apenas um sensor de ultrassom, é mais lento em seu escaneamento que a concepção de oito sensores, mas com este formato, uma melhor resolução é possível, de forma a podermos desenhar no C-scan as letras usinadas de forma mais precisa.

O sistema com a concepção de sensor com sapata cônica mostrou-se superior ao sensor utilizado anteriormente principalmente pela grande estabilidade do sinal de ultrassom, grande parte por concentrar o foco do sinal de ultrassom, além de provocar menor borbulhamento de ar no perfil de coluna d'água. Outra grande vantagem que o sistema demonstrou foi o menor consumo d'água necessária para se obter a coluna d'água, devido à menor área de saída. Uma desvantagem, porém, é que o sistema de recolhimento e reaproveitamento d'água anteriormente utilizado não foi possível de ser adaptado a esta concepção.

Na Figura 45 e na Figura 46, ilustra-se o C-scan da inspeção do duto de acrílico acima descrito de duas formas: na Figura 45, em formato de C-scan tradicional, com a superfície do duto planificada; já na Figura 46, o C-scan planificado foi projetado em um duto em 3D configurado no ensaio, onde se pode observar mais intuitivamente o resultado da inspeção.



Figura 45 – C-scan da inspeção do duto de acrílico de demonstração.

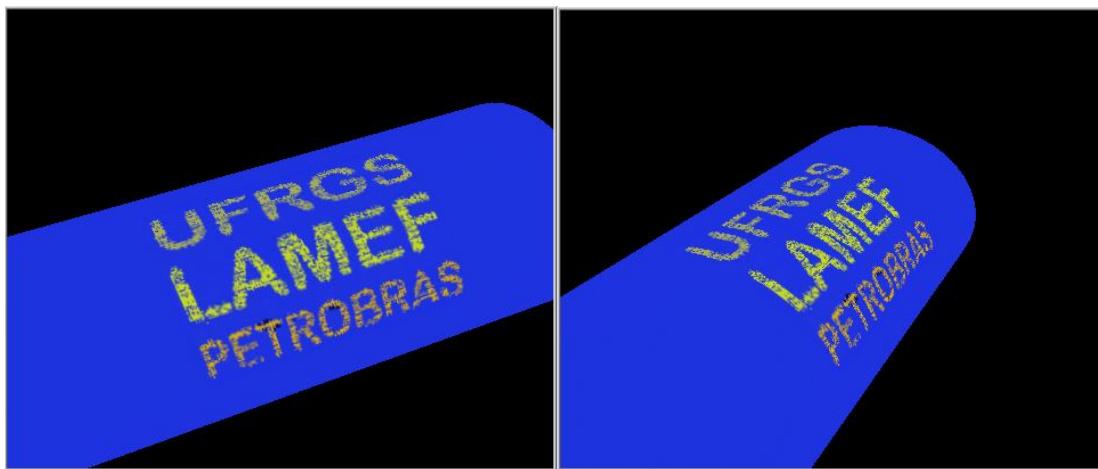


Figura 46 – C-scan do duto de acrílico projetado num perfil em 3D para visualização mais intuitiva da inspeção

Na Figura 45, o eixo vertical corresponde ao perímetro do duto, e o eixo horizontal corresponde ao comprimento do duto. A escala de cores à direita se refere à espessura de parede do acrílico, em milímetros. Observa-se, principalmente, a ótima definição da imagem obtida com a inspeção, que durou aproximadamente 45 min. Os pontos pretos, vistos nos contornos da letra “T” e na letra “O” da palavra “PETROBRAS” são os pontos perdidos pelo sistema de captação de sinal, o que foi concluído ser influência da aresta da usinagem da letra. A resolução desta inspeção é de um ponto a cada  $1\text{mm}^2$ , por este motivo do grande tempo de inspeção e da grande resolução da imagem captada.

A avaliação do sistema para este teste foi considerada ótima para os objetivos propostos. Os resultados obtidos com este sistema foram muito bons, apresentando uma ótima precisão quanto ao posicionamento das medidas tomadas do ultrassom. A sensibilidade também foi considerada ótima, constatando o ótimo desempenho do sistema para esta aplicação. A velocidade do sistema foi um ponto a ser discutido, pois pelo fato de ter um só sensor montado e pela resolução configurada no sistema, a inspeção teve um a longa duração de tempo.

## 5 CONCLUSÕES

Reafirmando-se os objetivos do presente trabalho, de testar diversas aplicações e situações do sistema de inspeção de dutos desenvolvido, citam-se os pontos que foram abordados ao longo do desenvolvimento:

- A praticidade e facilidade de montagem e desmontagem do equipamento sobre uma tubulação;
- A agilidade dos graus de liberdade propostos para o sistema;
- A flexibilidade do equipamento para utilização de diferentes métodos de inspeção;
- A rapidez e confiabilidade dos resultados de inspeção por ultrassom para varredura de espessuras em busca de corrosão generalizada interna de uma tubulação;
- A capacidade de precisão e resolução desta inspeção por ultrassom.

Para alcançar os objetivos propostos, uma série de testes foi praticada, em laboratório e em campo, com o intuito de abordar todos os pontos de funcionamento e avaliar criticamente os pontos positivos e negativos do sistema. Como objetivo geral, salienta-se determinar a viabilidade técnica da aplicação de métodos de END (ensaio não-destrutivos) automatizados em tubulações.

As conclusões gerais do trabalho estão listadas nos tópicos abaixo:

- O sistema desenvolvido se mostrou uma ferramenta de grande potencial para as situações de testes propostas e realizadas;
- A montagem e a desmontagem do sistema nas tubulações se mostraram muito simples e rápidas, podendo em campo ser realizada em aproximadamente 5 minutos;
- Os graus de liberdade do sistema – a movimentação longitudinal e a rotação em torno do duto em 360 graus – mostraram-se ágeis e suficientes para as aplicações propostas;

- Durante os testes, diferentes tipos de ENDs foram aplicadas e diferentes tipos de sensores foram instalados e desinstalados, provando a flexibilidade do sistema quanto a diferentes métodos de inspeção.
- As varreduras de C-scan são obtidas em tempo real durante a inspeção com o robô, sendo que o operador tem a facilidade de interpretação dos dados durante a passagem do equipamento no local;
- Há a possibilidade de que, durante a inspeção, o operador possa parar o sistema e retorná-lo a um local específico caso tenha havido alguma dúvida quanto aos resultados apresentados pelos sensores;
- As inspeções realizadas pelo método END de ultrassom mostraram que a resolução pode chegar a até  $1\text{mm}^2$ , e a precisão é limitada somente pela precisão do método aplicado, visto que os cabeçotes utilizados são comerciais;
- O arranjo de oito sensores de ultrassom com o sistema de bombeamento de água formou um conjunto bastante promissor quanto à aceleração da inspeção e sua respectiva automação;
- A velocidade do sistema é limitada à resolução desejada e ao número de sensores aplicados. A velocidade do sistema, assim como a precisão, pode ser melhorada conforme a evolução de multiplexores com maior capacidade de aquisição de dados, que permitam também a montagem de maior quantidade de cabeçotes ao mesmo tempo;
- Os testes realizados com os sensores de apalpadores foram promissores e mostraram uma ferramenta simples para inspeção geométrica externa do duto;
- Os testes de campo tiveram resultados dúbios, e apesar dos testes realizados no laboratório após as melhorias aplicadas, se torna necessária mais uma seção de testes em campo para conclusões efetivas.
- Para uma grade de  $64\text{mm}^2$  ( $8\text{mm} \times 8\text{mm}$ ) em uma longitude de 1,66m utilizando-se oito sensores simultaneamente, o tempo aproximado de inspeção foi de dez minutos;
- O fato de o teste de campo ter sido realizado em um duto em operação mostra uma das principais vantagens do sistema, que é a possibilidade de realização da inspeção sem a necessidade da parada da operação do duto;

## 6 PROPOSTAS DE MELHORIAS

Propõe-se para trabalhos futuros melhorias que poderiam aumentar o desempenho do conjunto desenvolvido:

- Redimensionamento do sistema e reprogramação das formas de funcionamento para aplicação do robô em inspeção de dutos em curva;
- Reprojeto da régua de sensores, utilizando a solução aplicada na inspeção do duto de acrílico em um conjunto que leve oito sensores simultaneamente, com um formato flexível para diferentes diâmetros e adaptável a variações na superfície do duto;
- Aplicação do robô desenvolvido com diferentes métodos de END's, como a inspeção de soldas por phased array, por exemplo;
- Fazer experimentos e validar estatisticamente em comparação a outros métodos, como ultrassom manual e raios-x, por exemplo;
- Realizar a validação do procedimento do ensaio por ultrassom através de órgãos competentes;
- Outras melhorias importantes podem ser a aquisição e implementação de sistemas de medição por ultrassom mais rápidos e complexos, capazes de fornecer maior informação, como a forma do eco de ultrassom, o qual pode ser de grande importância na análise de resultados.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alvino, A. E. I., (2003), "Aplicação da Lógica Nebulosa ao Modelo Muhlbauer Para Análise de Risco em Dutos", Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio, Rio de Janeiro
- Andreucci, R., (2008), "Ensaio por Ultrassom", Ed. Abende
- Antunes, R. C., et. al., (2009), "The Mfl Technology Applied in the Field Correlations of Internal or External Corrosion In Pipelines", Rio Pipeline Conference and Exposition, Rio de Janeiro
- Araujo, A. A., Guimarães, F. S., Miranda, I. V. J., Magalhães, J. A. P., Sabino, J. M., Silva, J. A. P. (2009) "Comparative study of Palito Inspection and MFL Inspection", Rio Pipeline Conference and Exposition, Rio de Janeiro
- Araujo, M. D., Silva, A. R., Oliveira, J. F., (2003) "Aplicações E Limitações Da Técnica De Ultrassom B-Scan – Uma Experiência Prática" III Pan-American Conference for Nondestructive Testing – PANNDT, Rio de Janeiro
- Beller, M., Barbian, A., (2006), "Combined In-Line Inspection of Pipelines for Metal Loss and Cracks", ECNDT 2006 - Mo.2.5.4
- Bento, M. P., et. al., (2009), "Automatic Identification of Corrosion Damage Using Image Processing Techniques", Rio Pipeline Conference and Exposition, Rio de Janeiro
- Berto Júnior, C. A., Lourenço, S. R., (2006) "Sistema de monitoramento da corrosão interna de gasodutos por meio de processamento digital de sinais" Exata, v. 4, n. 2, p. 391-400, São Paulo
- Camerini, D. A., (2004), "Desenvolvimento de Pigs Instrumentados para Detecção e Localização de Pequenos Vazamentos em Dutos", Programa de Pós-Graduação em Mecânica, Rio de Janeiro
- Carneval, R. O., Ramos, J. G., Henriques, J. R. F., Gallo, F. (2002) "Método Rápido Para Detecção De Processo Corrosivo Por Ultrassom (Medium Range Ultrasonics)" XXI Congresso Nacional de Ensaios Não Destruítivos, Salvador
- Carneval, R. O., Soares, S. D., et. al. (2000) "Avaliation of Magnetics Pigs with the Automatized Ultrasound Technique" Bol. Téc. PETROBRAS, Rio de Janeiro
- Carneval, R. O. (2007) "Evolução das Técnicas de Mapeamento de Corrosão de Dutos" 9ª. COTEQ – Conferência Internacional sobre Tecnologia de Equipamentos, Salvador.
- Castro, P. S. H., Godwin Neto, W. W. (2002) "Avaliação de Corrosão em Trocador de Calor , Tipo Duplo Tubo, Através da Técnica da Radiografia Computadorizada" XXI Congresso Nacional de Ensaios Não Destruítivos, Salvador
- Côrtes, R., (2008), "Testes Experimentais para Verificação da Precisão de "Pigs"" , 2º Endutos, Rio de Janeiro
- Costa Veiga, J. L. B., Carvalho, A. A., Silva, I. C., Rebello, J. M. A., (2003), "Automação Da Análise Do Ensaio Ultra-Sônico Pulso-Eco Utilizando

- Redes Neurais Artificiais”, III Pan-American Conference for Nondestructive Testing – PANNDT, Rio de Janeiro
- Emanuel Estrada, et. al., (2009), “Pipebot – A Mobile System for Duct Inspection”, Rio Pipeline Conference and Exposition, Rio de Janeiro
- Filho, S. S., (2004), “Método Para Cálculo da Taxa de Falha de Dutos Flexíveis Submarinos”, Bol. téc. Petrobras, 47 (2/4): 233 - 254, Rio de Janeiro.
- Fujiyama, R. T., Sousa, A. N., Bastian, F. L. (2003), “Uso De Materiais Compósitos em Reparos de Dutos de Aço”, 2o Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo & Gás, Rio de Janeiro
- Geremia, G. (2007), “Desenvolvimento de braço com acionamento pneumático para robôs de inspeção de navios petrolíferos”, Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre
- Ginten, M., Brockhaus, S., Bouaoua, N., Klein, S., Bruening, F., (2009), “Inline Inspection Of Multi-Diameter And High-Pressure Pipelines In Brazil Using Combined Technologies – Magnetic Flux Leakage And Ultrasonic Testing”, Rio Pipeline Conference and Exposition, Rio de Janeiro
- Guimarães, A. C. B., (2005), “Avaliação Simplificada da Capacidade de Carga de Dutos Corroídos”, Programa de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia – Mecânica Computacional, Setores de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná., Curitiba
- Guimarães, F. S., (2006) “Um Sistema Multi-Agentes para Monitoramento e Aquisição em Tempo Real”, Programa de Pós-Graduação em Informática do Departamento de Informática da PUC-Rio, Rio de Janeiro
- Henriques, P. C. F., Soares, S. D., (2002), “Evolução do Uso de Sistemas Ultra-Sônicos Automáticos No Brasil”, XXI Congresso Nacional de Ensaios Não Destrutivos, Salvador
- Kitada, T. (1975), “Pulse Reflection Type Ultrasonic Thickness Meter”, United States Patent 3,918, 296
- Manfred Ronald Richter, M. R., Humberto Silva Campinho, H. S., (2003) “Aplicação Prática de Ultrassom Computadorizado da Inspeção de Vasos de Pressão, Baseado No "Code Case" 2235.”, III Pan-American Conference for Nondestructive Testing – PANNDT, Rio de Janeiro
- Martinez, P., Prins, T., (2009), “Instrumented Ultrasonic Pig Using Freeswimming And Online Umbilical Fiber Glass Cable Technologies.”, Rio Pipeline Conference and Exposition, Rio de Janeiro
- Mello Silva, J, Villela, T., Cavalcanti, E., Cobucci, J. C. S., Pimenta, G., Ferreira, P. A. (2002) “Avaliação da Corrosão Interna de um Duto de Gás Natural” 6º COTEQ – conferência sobre Tecnologia de Equipamentos - 22º CONBRASCORR – Congresso Brasileiro de Corrosão. Salvador.
- Merçon, F., Guimarães, P. I. C., Mainier, F. B., (2004) “Corrosão: Um exemplo Usual de Fenômeno Químico”, Química Nova Escola, nº 19
- Mousatov, A., Nakamura, E., Shevni, V., Delgado, O., Flores, A, (2009), “Surface Electromagnetic Technology for the External Inspection of Oil and Gas Pipelines”, Rio Pipeline Conference and Exposition, Rio de Janeiro

- Narushima, et. al., (1983), Method and Apparatus for Measurement of Thickness Utilizing Ultrasonic Pulses", United States Patent 4,388,830
- Nóbrega, A. C. V., Barbosa, A. F. F., da Silva, D. R., Pimenta, G.S., Peixoto, D.G. (2003) "Estudo De Caso - Corrosão Interna em Dutos Transportadores de Gás Natural" Laboratório de Corrosão – Departamento de Química – UFRN, Campus Universitário Lagoa Nova, PETROBRAS/CENPES/PDEP/TMEC, PETROBRAS/UN-RNCE
- Pezzi Filho, M., (2003) "Aplicação de IBR, Inspeção Baseada em Risco a Oleodutos segundo o API 581 BRD Verificação de Consistência com as Práticas Usuais da Indústria para Avaliação de Risco", Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio, Rio de Janeiro
- Pittaro, R. J., (1984), "Ultrasonic Thickness Measuring Instrument", United States Patent 4,437,332
- Plácido, M. E. B., (2005), "Sistemas Robotizados de Inspeção Interna de Dutos", Programas de Pós-Graduação de Engenharia da Universidade Federal Do Rio De Janeiro, Rio de Janeiro
- Rodrigues, L. M. (2006) "Estudo da Corrosão do Aço para Dutos API 5L X56 em solos do RS" Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGEM. Porto Alegre, UFRGS.
- Santos, C. M. F., Gama, A. A., Rocha, J. S., Malandrino Filho, J. R., Tadeu, E. A., Tadeu, H. S., (2002), "Inspeção de Vasos de Pressão Utilizando Ensaio de Ultrasom Computadorizado e a Norma API RP 579" 6º Conferência Sobre Tecnologia de Equipamentos, Salvador
- Scott, B., (2009), "Factors To Consider when Planning a Pipeline Inspection – Making an Informed Best Choice", Rio Pipeline Conference and Exposition, Rio de Janeiro
- Silva, L. C., Petraglia, A., Petraglia, M. R., (1998), "Sistema de Visão Estéreo para Inspeção Submarina de Tubulações e Equipamentos de Petróleo em Águas Profundas", Seminário de Instrumentação e Automação, Rio de Janeiro,
- Souza, R. D. (2003) "Avaliação Estrutural de Dutos com Defeitos de Corrosão Reais" Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio, Rio de Janeiro.
- Thurler, L. M., Neves, D. L. C., Moreira, A. B., Carneval, R. O., (2003) "Avaliação Da Técnica De Ultrassom À Distância Aplicada a uma Tubulação de Petróleo da Reduc", III Pan-American Conference for Nondestructive Testing – PANNDT, Rio de Janeiro
- Walker, J. R., Kern, M., (2009), "Solving an Unpiggable Pipeline Challenge", Rio Pipeline Conference and Exposition, Rio de Janeiro
- White, D. A., (1983), "Ultrasonic Thickness Measuring Apparatus and Method", United States Patent 4,398,421