



Ivan Ramalho Tonial

Susceptibilidade de diferentes ensaios não destrutivos para indicação de trincas de fadiga

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção de grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia de Materiais e Processos Químicos e Metalúrgicos da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Marcos Venicius Soares Pereira

Rio de Janeiro
Maio de 2017



Ivan Ramalho Tonial

Susceptibilidade de diferentes ensaios não destrutivos para indicação de trincas de fadiga

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais e Processos Químicos e Metalúrgicos, da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Área de concentração: Desempenho e Integridade Estrutural.

Prof. Marcos Venicius Soares Pereira

Orientador

Departamento de Engenharia Química e de Materiais – PUC Rio

Profa. Ana Rosa Fonseca de Aguiar Martins

Departamento de Engenharia Química e de Materiais – PUC Rio

Prof. Fathi Ibrahim Darwish

Universidade Federal Fluminense – UFF

Prof. Ricardo Pondé Weber

Instituto Militar de Engenharia – IME

Prof. Márcio da Silveira Carvalho

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 17 de maio de 2017.

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

Ivan Ramalho Tonial

Graduou-se em Engenharia Mecânica na PUC-Rio (Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro) em 2013.

Ficha Catalográfica

Tonial, Ivan Ramalho

Susceptibilidade de diferentes ensaios não destrutivos para indicação de trincas de fadiga / Ivan Ramalho Tonial ; orientador: Marcos Venicius Soares Pereira. – 2017.

121 f. : il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Química e de Materiais, 2017.

Inclui bibliografia

1. Engenharia de Materiais – Teses. 2. Engenharia Química – Teses. 3. Ultrassom convencional. 4. Ultrassom Phased Array. 5. Radiografia digital. 6. Indicação de trincas. 7. Medição de trincas. I. Pereira, Marcos Venicius Soares. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Química e de Materiais. III. Título.

CDD: 620.11

A minha família, por me apoiar nestes anos, ao meu pai, por me ajudar a passar pelos momentos difíceis no caminho e pelos conselhos e aos meus amigos, pelas mensagens de apoio.

Agradecimentos

Ao meu orientador, Prof. Marcos Venicius Soares Pereira por toda a ajuda e demonstração de força de vontade, pela excelente orientação, apontando os melhores caminhos, dando estímulos para o desenvolvimento deste trabalho e pela amizade demonstrada nesses anos.

Aos professores, pelos ensinamentos, dentro e fora da sala de aula, durante a época da graduação e agora do mestrado

Aos meus colegas de mestrado, pelo companheirismo e pelo inegável apoio quando necessário.

A PUC-Rio, porque sem ela não poderia ter realizado este sonho de conquista.

A todos aqueles, que embora não citados nominalmente, contribuíram direta e indiretamente para a execução deste trabalho.

A ARCtest pelo auxílio com os experimentos de ultrassom e radiografia.

À CAPES pelo apoio financeiro.

Resumo

Tonial, Ivan Ramalho; Pereira, Marcos Venicius Soares. **Susceptibilidade de diferentes ensaios não destrutivos para indicação de trincas de fadiga.** Rio de Janeiro, 2017. 120p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Química e de Materiais, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Ensaio não-destrutivo são técnicas utilizadas na inspeção de materiais e equipamentos sem danificá-los, sendo executados nas etapas de fabricação, construção, montagem e manutenção. Constituem uma das principais ferramentas do controle e garantia da qualidade de materiais e produtos, sendo largamente utilizados nos setores petróleo/petroquímico, químico, aeronáutico, aeroespacial, siderúrgico, naval, eletromecânico, papel e celulose, entre outros. Representam métodos capazes de proporcionar informações sobre defeitos, características tecnológicas do material, ou ainda, monitoração da degradação em serviço de componentes, equipamentos e estruturas, o que permite o uso de ações de extensão de suas vidas úteis. O objetivo desta pesquisa foi comparar a adequação de diferentes técnicas não destrutivas na detecção e estimativa da dimensão de trincas de fadiga, nucleadas e propagadas intencionalmente, em material estrutural. Para tal, corpos de prova cilíndricos do aço 42CrMo4 com um entalhe em V sofreram carregamentos cíclicos até diferentes números de ciclos, o que proporcionou diferentes tamanhos de trinca. O comprimento das trincas passantes foi monitorado por meio de lupa posicionada na lateral do corpo de prova. Após a etapa de nucleação e propagação das trincas de fadiga, todos os corpos de prova foram inspecionados com emprego das técnicas de Ultrassom Convencional, Ultrassom *Phased Array* e Radiografia Digital, para permitir a indicação das trincas de fadiga e o estabelecimento de suas dimensões. Terminada as inspeções, os corpos de prova foram resfriados em nitrogênio líquido e fraturados com aplicação de uma carga de flexão, o que permitiu a visualização das superfícies das trincas. Em seguida, as trincas foram medidas visualmente com o auxílio de uma lupa, o que permitiu

comparar as indicações (virtual) de defeitos nos corpos de prova com a existência (real) dos mesmos e, ainda correlacionar as dimensões indicadas nas inspeções com aquelas medidas nas superfícies das trincas. Neste contexto, todas as técnicas se mostraram adequadas para a indicação de defeitos. Além disso, para trincas curtas, o Ultrassom *Phased Array* foi a técnica que apresentou a melhor suscetibilidade para o dimensionamento de descontinuidades, enquanto que a Radiografia Digital se mostrou mais eficiente para trincas mais longas.

Palavras-chave

Ultrassom Convencional; Ultrassom *Phased Array*; Radiografia Digital; indicação de trincas; medição de trincas.

Abstract

Tonial, Ivan Ramalho; Pereira, Marcos Venicius Soares (Advisor). **Susceptibility of different non-destructive tests for indication of fatigue cracks.** Rio de Janeiro, 2017. 120p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Química e de Materiais, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Non-destructive tests are techniques used in material and equipment inspection without permanent damage, applied in the stages of manufacture, construction, assembly and maintenance. They are one of the main tools to control and insure the quality of materials and products, with widely applications in oil / petrochemical, chemical, aeronautical, aerospace, steel industry, naval, electromechanical industries. They represent with capacity of providing information about defects, technological characteristics of the material, or monitoring the degradation in service of components, equipment and structures, which allows the use of useful live extensions in service. The objective of this research was to compare the application of different non-destructive techniques in the detection and size estimation of fatigue cracks, nucleated and propagated intentionally, in structural material. For this purpose, cylindrical specimens of 42CrMo4 steel with a V-notch were subjected to cyclic loading with different cycle numbers, which provided different crack sizes. The length of the cracks was monitored by a magnifying glass positioned on the specimen surface. After the crack nucleation and propagation, all specimens were subjected to non-destructive tests making use of Conventional Ultrasound, *Phased Array* Ultrasound and Digital Radiography, in order to provide crack indications and crack dimensions. After the inspections, the specimens were cooled down in nitrogen and fractured in three point bending to promote opened crack surfaces. In the sequence, the cracks were measured using a magnifying glass, which allowed a comparison between the indicated and measured defects. In this context, all techniques were adequate for crack indications. On the other hands, for short cracks, the *Phased Array* Ultrasound

was the technique that presented the best susceptibility for estimate the discontinuity dimensions, while Digital Radiography proved to be more efficient for longer cracks.

Keywords

Conventional Ultrasound; *Phased Array* Ultrasound; Digital Radiography; crack indication; crack measurement.

Sumário

1 . Introdução	19
1.1. Motivação	20
1.2. Objetivos do Trabalho	20
2 . Revisão Bibliográfica	21
2.1. Ensaio Não Destrutivos	21
2.2. Ensaio por Ultrassom	22
2.2.1. Princípio Físico	23
2.2.2. Ondas Sonoras	24
2.2.3. Modo de Propagação das Ondas	25
2.2.4. Ondas Longitudinais	25
2.2.5. Ondas Transversais	26
2.2.6. Ondas Superficiais	27
2.2.7. Ondas de Lamb	27
2.2.8. Atenuação Sonora	28
2.2.9. Impedância Acústica	28
2.2.10. Geração de Ondas de Ultrassom (Feixe Sonoro)	30
2.2.11. Comportamento do Feixe Sonoro	30
2.2.12. Transdutores	34
2.3. Ultrassom Phased Array	35
2.3.1. Princípios Básicos	36
2.3.2. Composição do Sistema de Inspeção	38
2.3.3. Leis de Atrasos e Leis Focais	38
2.3.4. Tipos de Representação Gráficas	42
2.4. Técnicas de Inspeção por Ultrassom	46
2.4.1. Técnica de Pulso-eco	46
2.4.2. Técnica de Transparência	47
2.4.3. Técnica de Imersão	47
2.5. Técnicas de Inspeção com Phased Array	48
2.5.1. Pulso-Eco	49

2.5.2. TANDEM	50
2.5.3. Time of Flight Diffraction	50
2.6. Técnicas de Dimensionamento de Descontinuidades	52
2.6.1. Técnica da Queda dos 6dB	53
2.6.2. Técnica da Queda de 20dB	54
2.6.3. Aplicações	56
2.6.4. Vantagens e Limitações do Método	56
2.7. Radiologia Industrial	57
2.7.1. Princípios Físicos	58
2.7.2. Radiação Eletromagnética	61
2.7.3. Fontes de Radiação	62
2.7.4. Raio Gama	62
2.7.5. Raio-X	63
2.7.6. Classificação dos Filmes Industriais	64
2.7.7. Análise por Radiografia	65
2.8. Radiografia Digital	66
2.8.1. Formação da Imagem Digital	69
2.8.2. Processos de Digitalização da Imagem Radiográfica	69
2.8.3. Técnicas de Exposição Radiográfica	74
2.8.4. Interpretação de Resultados	78
3 . Procedimento Experimental	87
3.1. Material	87
3.2. Corpos de Prova	88
3.3. Nucleação e Propagação de Trincas	90
3.3.1. Flexão Rotativa	90
3.3.2. Tração-Tração	91
3.4. Técnicas de Testes Não Destrutivos	94
3.4.1. Ultrassom Convencional	94
3.4.2. Ultrassom Phased Array	95
3.4.3. Radiografia Digital	97
3.4.4. Análise Visual das Superfícies Fraturadas	98
4 . Resultados e Discussão	100

4.1. Medição Visual	100
4.2. Ultrassom Convencional	102
4.3. Ultrassom Phased-Array	103
4.4. Radiografia Digital	106
5 . Conclusões	109
6 . Sugestão para Trabalhos Futuros	111
7 . Referências bibliográficas	112

Lista de figuras

Figura 1 - Ensaio de ultrassom A-scan.....	24
Figura 2 - Espectro sonoro.	25
Figura 3 - Diferentes tipos de estrutura atômica.....	25
Figura 4 - Ilustração das ondas longitudinais.	26
Figura 5 - Ilustração das ondas transversais.	26
Figura 6 - Propagação da onda superficial de Creeping.....	27
Figura 7 - Possibilidade de geração de ondas a partir de uma incidência oblíqua de uma onda longitudinal na interface entre dois meios.	29
Figura 8 - Comportamento do feixe sonoro.....	31
Figura 9 - Amplitude do feixe sonoro nas regiões do campo próximo ao campo distante.....	32
Figura 10 - Ampliação de vários picos para diferentes locais das discontinuidades no feixe sonoro.....	33
Figura 11 - Tipos de transdutores: a) Transdutor reto ou normal, b) Transdutor angular, c) Transdutor de duplo cristal (TR).	35
Figura 12 - Típicos transdutores Phased Array.	37
Figura 13 - Aparelhos Phased Array.	38
Figura 14 - Componentes de um sistema de inspeção por ultrassom Phased Array.....	38
Figura 15 - Valores de atraso para um cabeçote linear com 32 elementos com profundidade focal em 15, 30 e 60 mm para ondas longitudinais	39
Figura 16 - Relação de atraso de tempo com o passo de um transdutor linear com 16 elementos para uma mesma profundidade focal.....	40
Figura 17 - Dependência do ângulo de refração e posição do elemento para um cabeçote Phased Array posicionado em uma cunha de Plexiglas® com 37°	41
Figura 18 - Apresentação em A-scan dos dados de uma inspeção de uma junta soldada com um pico de reflexão com amplitude de 56% através de software Tomoviewer.....	43

Figura 19 - Representação gráfica de um sistema de inspeção por imersão com visualização dos dados de inspeção em B-scan.....	44
Figura 20 - Resultado da inspeção com Phased Array de uma junta soldada com a visualização dos dados em C-scan através do Software Tomoviewer.....	45
Figura 21 - Resultados da inspeção com Phased Array com varredura setorial e visualização dos resultados em S-scan através do Software Tomoviewer.....	46
Figura 22 - a) Técnica de impulso - eco, b) Técnica de transmissão total e c) Técnica de imersão.	48
Figura 23 - Visualização em S-scan de uma configuração pulso-eco, empregando um transdutor Phased Array por meio de uma varredura setorial no bloco padrão.	49
Figura 24 - Visualização em D-scan de uma inspeção de junta soldada com TOFD: (A) onda lateral, (B) sinais da descontinuidade e (C) Eco de fundo da onda longitudinal.	51
Figura 25 - Representação esquemática do dimensionamento de descontinuidades utilizando a técnica da queda dos 6dB numa junta soldada.....	53
Figura 26 - Representação esquemática da verificação do comprimento do feixe sônico com a utilização de um cabeçote angular convencional num bloco IOW.	54
Figura 27 - Representação esquemática do dimensionamento da altura de defeitos utilizando a representação em A-scan pela técnica da queda de 20dB....	55
Figura 28 - Técnica geral de ensaio radiográfico na indústria.	58
Figura 29 - Princípios do ensaio radiográfico. a) Radiação produzida por um gerador e b) formação da imagem radiográfica.	60
Figura 30 - Espectro eletromagnético.....	61
Figura 31 - a) Fonte de radiação; b) direcionamento da radiação emitida.	63
Figura 32 - Tubo de Raios-X com alvo rotativo, de forma a melhorar o arrefecimento do alvo.	64
Figura 33 - À esquerda encontra-se o fator de ampliação. À direita a medição automática das espessuras reais do duto através da análise das tonalidades do cinza.....	66
Figura 34 - Imagens “pixeladas”.	67
Figura 35 - Imagem com resolução de 6 p.p.m.	67

Figura 36 - Exemplo de graus de resolução diferentes para uma mesma imagem.	68
Figura 37 - Processos de digitalização de imagens da radiografia digital.	70
Figura 38 - Estrutura da placa de imagem CR e Scanner portátil.	71
Figura 39 - Imagem de radiografia digital (CR) de uma solda de um tubo.	71
Figura 40 - a) Radiografia original digitalizada e b) Radiografia processada digitalmente.	72
Figura 41 - Esquema do detector para captura da imagem digital no sistema direto.	72
Figura 42 - Diferença entre a imagem original (foto superior) não processada digitalmente e a processada pelo sistema digital (foto inferior).	73
Figura 43 - Técnica de exposição de parede simples - vista simples.	74
Figura 44 - Técnica Radiográfica Panorâmica em uma solda.	75
Figura 45 - Técnica de exposição parede dupla e vista simples (A) e parede dupla e vista dupla (B).	76
Figura 46 - Técnica de parede dupla vista dupla.	77
Figura 47 - Quantidades de filmes por junta circunferencial totalmente radiografada (100%) em vista simples.	78
Figura 48 - Solda com porosidade.	80
Figura 49 - Aparência radiográfica de soldas contendo inclusões de escória.	81
Figura 50 - Solda com falta de penetração na raiz.	82
Figura 51 - Seção de uma solda contendo poro e uma trinca longitudinal no cordão.	82
Figura 52 - Seção de uma solda contendo uma falta de fusão junto ao chanfro. ..	83
Figura 53 - Inclusão de Areia.	84
Figura 54 - Porosidade.	84
Figura 55 - Trincas.	85
Figura 56 - Inclusão.	86
Figura 57 - Eixo virabrequim de termoelétrica.	87
Figura 58 - Trinca aparente em uma das seções do eixo.	88
Figura 59 - Geometria inicial dos corpos de prova.	89
Figura 60 - Geometria modificada dos corpos de prova.	89
Figura 61 - Equipamento para ensaio de flexão rotativa.	90
Figura 62 - Equipamento utilizado para os testes de tração-tração.	91

Figura 63 - Ilustração das áreas usadas para os cálculos.....	92
Figura 64 - Calibração do US convencional utilizando padrões tipo FFP.	94
Figura 65 – Esquema do posicionamento da sonda para inspeção por Ultrassom convencional.	95
Figura 66 - Inspeção por US convencional.	95
Figura 67 – Ilustração da inspeção pelo Phased Array.....	96
Figura 68 - Inspeção por ultrassom phased array.	96
Figura 69 - Radiografia do corpo de prova 1 trincado.	97
Figura 70 - Corpos de prova após a fratura.	98
Figura 71 - Superfície de fratura do CP 1.....	98
Figura 72 – Posições de medição da profundidade da trinca.	99
Figura 73 – Comprimento total da descontinuidade em função do CP.....	102
Figura 74 - Gráfico comparativo entre os diferentes comprimentos de trinca. ...	105
Figura 75 - Ilustração do encaixe da sapata com o corpo de prova.....	106
Figura 76 - Gráfico comparativo dos valores da média lateral e do valor real....	108
Figura 77 - Gráfico comparativo entre a média lateral e o valor indicado por Radiografia Digital.	108
Figura 78 - Geometria de um Corpo de prova retangular.....	111

Lista de tabelas

Tabela 1 - Valores de atenuação de sinal para diferentes processos de fabricação.....	28
Tabela 2 - Princípios básicos do ensaio radiográfico.	59
Tabela 3 - Cargas utilizadas nos ensaios tração-tração nos corpos cilíndricos e tamanho lateral da trinca (TLT).....	93
Tabela 4 – Valores de trinca nas superfícies de fratura.	100
Tabela 5 - Valores calculados de comprimento de trinca.....	100
Tabela 6 - Tamanho de trinca em função dos parâmetros de carregamento de fadiga.	101
Tabela 7 - Tabela comparativa entre os valores de entalhe.	101
Tabela 8 - Resultados do US convencional.	102
Tabela 9 - Resultados do ensaio de Phased Array.	104
Tabela 10 -Comprimentos de trinca medidos pelo Phased Array e calculados...	104
Tabela 11 - Resultados do RX Digital.	106
Tabela 12 - Características de diferentes materiais piezoelétricos.	113

Lista de abreviaturas e siglas

NDT – Non-destructive testing

END – Ensaio não destrutivo

US – Ultrassom

PA – *Phased Array*

RD – Radiografia digital

CP – Corpo de Prova

PSVS – Parede simples vista simples

PDVS – Parede dupla vista simples

PDVD – Parede dupla vista dupla

1. Introdução

Equipamentos industriais estão sujeitos a carregamentos cíclicos durante suas vidas em serviço, sendo que os carregamentos podem atuar com amplitude constante ou variável. Em função disto, componentes industriais estão sujeitos a falhas por fadiga após nucleação e propagação de trincas sobe ação de tais carregamentos.

No Brasil, no setor de energia, falhas por fadiga são recorrentes, provocando custos associados com perdas materiais, lucros cessantes, paradas de equipamentos, manutenção extemporâneas, além principalmente de perdas de vidas humanas e danos ao ecossistema. Na indústria termoelétrica especificamente, falhas por fadiga em eixos virabrequim estão associadas com a nucleação e propagação de trincas por fadiga, não correspondendo aos critérios de projeto à que deveriam se basear em vida infinita para tais elementos estruturais.

Essas trincas são nucleadas e crescem devido a fadiga, que ocorre pela repetição de esforços. Porém, existem métodos para detecção dessas discontinuidades, mesmo que aparentemente não visíveis, sem a necessidade de causar um dano irreparável ao equipamento. Esses métodos são conhecidos como Ensaio não destrutivo (END).

Ensaio não destrutivo (END) é formado por um amplo grupo de técnicas de análise utilizadas na indústria com base na ciência e tecnologia para avaliar as propriedades de um material, componente ou sistema sem causar danos. Os termos teste não destrutivo, avaliação não destrutiva e inspeção não destrutiva também são comumente usados para descrever esta tecnologia. Como o END não altera permanentemente o equipamento que está sendo inspecionado, é uma técnica altamente valiosa que pode minimizar custos e tempo na avaliação do produto, na solução de problemas e na pesquisa. Os métodos comuns de END incluem ultrassom, radiografia, partículas magnéticas, líquido penetrante, inspeção visual remota (RVI), entre outros. O END é comumente usado em engenharia mecânica, engenharia de petróleo, engenharia elétrica, engenharia civil, engenharia de materiais, engenharia aeronáutica, medicina entre outras.

O emprego de ensaios não destrutivos ou destrutivos é normal na indústria moderna. Buscando sempre a preservação da qualidade dos produtos e a confiabilidade no uso. Com o desenvolvimento dos métodos de END, existe a tendência da complementação ou até a substituição dos ensaios destrutivos por não destrutivos. Isto é motivado por duas ordens de razões:

- ✓ Econômica – Devido ao alto custo da matéria-prima e fabricação dos equipamentos, é mais vantajosa a utilização de END.
- ✓ Confiabilidade – Com o desenvolvimento dos END e aumento da sensibilidade de detecção de descontinuidades.

1.1. Motivação

Os END têm sido amplamente utilizado na indústria de forma a se detectar descontinuidades em equipamentos que ainda dispõem de vida útil de operação. Dessa forma, quando é encontrada alguma descontinuidade, com a utilização destes equipamentos, geralmente é possível se realizar algum reparo ou acompanhamento da evolução desse defeito até um determinado patamar considerado seguro. Desse modo, pode-se estender ou determinar a vida residual do equipamento em questão. Muitos trabalhos de pesquisa são realizados para desenvolvimento desses métodos, sendo que a motivação destes trabalhos tem caráter científico ou tecnológico, com o objetivo de buscar aperfeiçoamento na precisão e sensibilidade de detecção de pequenos defeitos.

1.2. Objetivos do Trabalho

Este trabalho buscou fazer uma avaliação experimental de trincas passantes induzidas em corpos de prova cilíndricos, com um entalhe passante, através das técnicas de Ultrassom (US), *Phased Array* (PA) e Radiografia Digital (RD) e posteriormente comparar os resultados obtidos pelos métodos mencionados acima com o valor real do defeito.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Ensaios Não Destrutivos

A troca da avaliação de produtos e equipamentos por técnicas não destrutivas ao invés de técnicas destrutivas é um fato incontestável, como mencionado anteriormente, nos dias atuais, atendendo aos custos cada vez mais elevados de matérias-primas. Alguns dos avanços tecnológicos mais importantes na engenharia podem ser atribuídos aos ensaios não destrutivos.

Os END são a aplicação de metodologias e técnicas de ensaio que têm como objetivo analisar a integridade de vários tipos de materiais, componentes mecânicos ou estruturais como equipamentos forjados, laminados, soldados, fundidos, entre outros. Assim é possível identificar defeitos e falta de homogeneidade pelos princípios físicos definidos, sendo que END não provocam qualquer alteração nos mesmos.

Estes ensaios são uns dos principais meios de controle de qualidade de produtos. De certo modo pode-se dizer que a aplicação de maneira correta dos END na produção, comprova a integridade e confiabilidade de um produto. Os END também possibilitam um melhor controle do processo de fabricação, reduzindo custos no processo de produção e conservando o nível de qualidade uniforme. Deste modo os END influenciam e apoiam análises de confiabilidade e, portanto, todas as questões referentes à vida de um produto.

Entretanto os END são dependentes das competências adicionais por parte dos operadores, ou seja, depende de uma boa formação, conhecimento e experiência, uma vez que a função de empregar as metodologias e interpretar os resultados são responsabilidades do operador, embora possam e devam ser supervisionados.

A certificação da competência de pessoal que realiza, concebe ou supervisiona END está normalizada em várias normas sendo o referencial normativo descrito na norma EN ISO 9712 “Non-destructive testing - Qualification

and certification of NDT personnel – General principles” uma das mais usadas atualmente [VIEIRA, 2013].

O número de métodos de END que podem ser usados para inspecionar diversos tipos de equipamentos, materiais ou até mesmo para efetuar medições é grande e não para de crescer, pois pesquisadores continuam a descobrir novas formas de aplicação das teorias físicas e outras disciplinas científicas para desenvolver sofisticados métodos de END [ANDREUCCI, 2014].

2.2. Ensaio por Ultrassom

Na metade do século passado só era capaz determinar irregularidades internas através de ensaios radiográficos (Raios-X ou Gama). A Firestone, em 1942, utilizou o princípio da eco-sonda ou eco-batímetro para análise de materiais. Em pouco tempo o processo passou para a escala industrial, uma vez que, já em 1945 o US passou a ser utilizado pela indústria. A evolução dos métodos que utilizam as ondas sonoras como meio de interação com o material é contínua, e a cada dia aparecem novas tecnologias, exemplo disso são as novas técnicas de *Phased Array* e *Time of Flight Diffraction* (TOFD) [HELIER, 2003].

A análise por ultrassom é caracterizada por um método não destrutivo e de grande uso na indústria para controle de qualidade e verificação de integridade de equipamentos e materiais, tanto de forma interna como superficial. Com esse princípio é possível dimensionar espessuras de diversas peças diferentes, como por exemplo tubos metálicos. Este método é de grande importância na avaliação da degradação uma vez que permite avaliar a evolução de processos como os de desgaste e corrosão.

A técnica consiste na indução de um feixe sonoro de alta frequência através de um aparato eletrônico, no equipamento em análise, com o propósito de detectar discontinuidades e determinar o seu tamanho, orientação e localização. O feixe sonoro sofre reflexões em interfaces da peça, uma vez que diferentes tipos de material, trincas, poros, inclusões diversas e falta de fusão agem como interfaces ao feixe sonoro. Assim, pode-se realizar a detecção de um defeito e determinar espessuras de material pela simples comparação de tempo entre as reflexões sonoras

que ocorrem. Método esse que também pode ser utilizado para determinar diferenças de propriedades físicas e na estrutura do material.

2.2.1. Princípio Físico

O princípio básico dos ultrassons é baseado no fato de materiais sólidos serem bons condutores de ondas sonoras. A propagação das ondas sonoras na matéria segue princípios físicos simples, a velocidade de propagação de cada tipo de onda é constante para cada material, embora haja uma variação para cada material distinto. A indução de frequências variáveis permite que seja selecionado o comprimento de onda adequado para a sensibilidade de detecção desejada. Quando temos um comprimento de onda menor a sensibilidade na detecção de pequenas descontinuidades é maior.

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad [2.1]$$

onde: f = frequência (MHz); c = velocidade do som no material (km/s);

λ = comprimento de onda (mm)

A escolha da frequência também permite adaptar o ensaio aos diferentes tipos de materiais e sua estrutura. Para se inspecionar materiais não metálicos são usadas frequências entre 50 kHz a 100 kHz, ao passo que, para materiais metálicos é utilizada, na inspeção, frequências entre 0,5 MHz a 10 MHz.

No ensaio, o feixe sonoro é transmitido ao equipamento em análise através da produção de ondas sonoras por um cristal (piezoelétrico) excitado em um campo elétrico que provoca uma oscilação de volume no cristal, isto é, ondas mecânicas (sonoras) são produzidas com a frequência que se deseja. Ao ocorrer o retorno das ondas sonoras ao cristal, é gerado o efeito inverso, ou seja, a onda sonora gera uma distribuição de cargas elétricas no cristal, criando um campo elétrico que é transmitido para o osciloscópio (equipamento que permite a leitura do caminho percorrido pelas ondas sonoras). O processo de inspeção é realizado de forma que o som produzido pelo transdutor é transmitido para o interior da peça a ser inspecionado através de um acoplante que é colocado entre a sonda e a superfície do material. O feixe sonoro percorre o material com uma velocidade constante, que é característica de cada material e do tipo de onda que é gerada.

Os feixes sonoros utilizados durante as inspeções são normalmente refletidos pela superfície oposta da peça analisada, essas reflexões são conhecidas como ecos de fundo. Também ocorrem reflexões em defeitos ou discontinuidades (interfaces) presentes no material inspecionado. A reflexão do eixe sonoro é captado pelo transdutor e devido a diferença de sinais visualizados no osciloscópio é possível determinar que a peça se encontra com defeito. Esses feixes sonoros após transformados em impulsos elétricos são apresentados em um aparelho específico (osciloscópio). A Figura 1 ilustra a técnica de contato pulso-eco, onde no visor existe o pulso inicial (face de contato do transdutor com a peça), o defeito e o eco de fundo [BERKE; MIX, 2005].

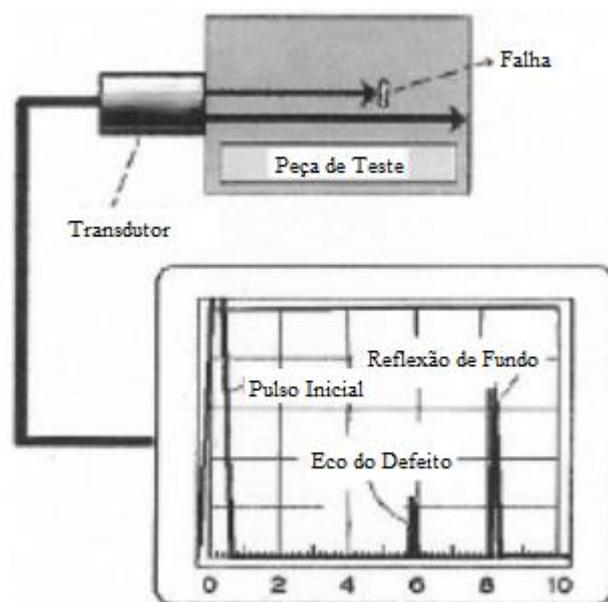


Figura 1 - Ensaio de ultrassom A-scan [MIX, 2005].

2.2.2. Ondas Sonoras

Os sons que são criados mecanicamente, ou seja, através de uma energia mecânica, conseguem se propagar independente do meio que se encontram, isto é, se propagam em sólidos, líquidos ou gases. Características do material, como seu módulo de elasticidade, a sua densidade assim como a frequência da onda sonora, podem influenciar positivamente ou negativamente nessa propagação. O sistema auditivo humano consegue detectar ondas sonoras nas frequências entre 20 Hz e 20.000 Hz. As ondas sonoras com frequências acima de 20.000 Hz são

denominadas por ultrassom, como pode ser visto pela Figura 2. As ondas sonoras seguem diversas das regras físicas como reflexão, difração e refração.

Nos sólidos, é possível se ter diversos modos de propagação (tipos de onda) devido à possibilidade de se utilizar vários tipos de vibrações. Fundamentalmente o som pode se propagar através de três diferentes tipos de ondas: Ondas longitudinais, transversais e ondas Rayleigh (superficiais) [LIMA, 2010 e BERKE].



Figura 2 - Espectro sonoro [VIEIRA, 2013].

2.2.3. Modo de Propagação das Ondas

A densidade dos materiais sólidos é muito maior se compararmos com a densidade de líquidos ou gases, isso é, a distância interatômica é muito pequena. Além disso, os átomos se encontram organizados em uma rede cristalina e as forças de ligação entre elas são muito fortes, como se pode observar na Figura 3. Em razão destes dois fatores, o som consegue se propagar de formas variadas nos materiais sólidos, cada um com suas características específicas e principalmente com uma velocidade própria e impedâncias acústicas diferentes, como pode ser observado no Anexo 1 [VIEIRA, 2013].



Figura 3 - Diferentes tipos de estrutura atômica [VIEIRA, 2013].

2.2.4. Ondas Longitudinais

As ondas longitudinais, também conhecidas como ondas tensionais, são semelhantes as ondas audíveis. A oscilação das partículas ocorre na mesma direção

de propagação das ondas, ou seja, os átomos se deslocam no mesmo sentido da onda longitudinal. Assim são criadas zonas de diferentes tamanhos entre as partículas, zonas de grande distância e de pequena distância (Figura 4), e por esse motivo são conhecidas como ondas de compressão longitudinais. Esta espécie de onda possibilita uma maior penetração nos materiais como gases, líquidos e sólidos. A velocidade de propagação, para cada material, é fixa e conhecida (Anexo1) [VIEIRA, 2013; LIMA, 2010].

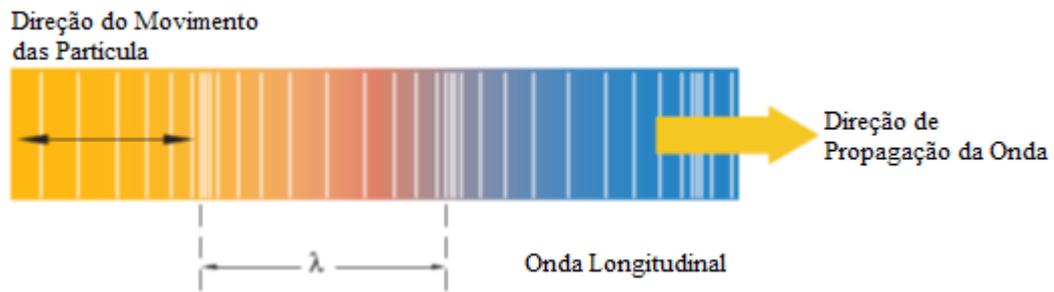


Figura 4 - Ilustração das ondas longitudinais [OLYMPUS, 2011].

2.2.5. Ondas Transversais

As ondas transversais são aquelas que a direção de vibração das partículas é perpendicular à direção de propagação da onda (Figura 5), também são conhecidas como ondas de corte ou de cisalhamento. Estas ondas não se propagam em gases ou líquidos e sua velocidade de propagação é de aproximadamente metade das ondas longitudinais. Geralmente é o tipo de onda indicada para a inspeção de soldas [VIEIRA, 2013, LIMA, 2010].



Figura 5 - Ilustração das ondas transversais [OLYMPUS, 2011].

2.2.6. Ondas Superficiais

Esse tipo de onda tem como característica a propagação entre diferentes impedâncias de choque da interface de um corpo sólido e um gás (ar). Pequenas trincas e descontinuidades conseguem ser detectadas na superfície da peça inspecionada. Esse tipo de onda tem a profundidade equivalente ao seu comprimento de onda. Consegue ser utilizada na inspeção de equipamentos com geometria complexa, contanto que seja avaliada as condições de reflexão nas extremidades, pois podem ser gerados sinais que atrapalhem na análise de resultados. Há dois tipos de ondas superficiais: As ondas de Rayleigh são formadas por ondas transversais que se propagam na superfície e as ondas de Creeping são formadas por ondas longitudinais próximas à superfície [METALS HANDBOOK VOL 17]. É possível observar, na ilustração (Figura 6), a propagação de uma onda superficial Creeping.

Segundo MASSAREY (2007) as ondas de Rayleigh podem ser usadas para avaliar a profundidade das trincas superficiais pelo controle de tempo e frequência para uma dada relação entre a profundidade da trinca e o comprimento de onda.

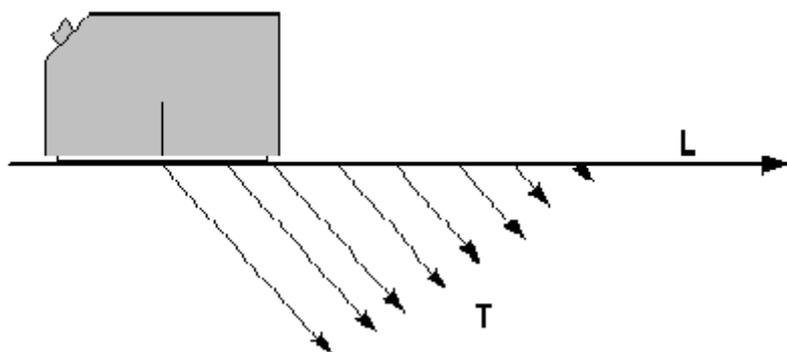


Figura 6 - Propagação da onda superficial de Creeping [SANTIN, 2003].

2.2.7. Ondas de Lamb

Estas ondas consistem na vibração complexa das partículas ao longo da espessura do material avaliado. Os seguintes parâmetros definem as características de propagação da onda, no material inspecionado: densidade, espessura, estrutura e propriedades elásticas [METALS HANDBOOK VOL 17].

Utilizadas no controle de qualidade na fabricação de chapas, estas ondas são classificadas como simétricas e assimétricas.

2.2.8. Atenuação Sonora

Baseia-se na diminuição da amplitude de oscilação em função do tempo. À proporção que o feixe sonoro se propaga através do material, sua intensidade diminui, de modo que a intensidade do feixe sonoro que volta ao transdutor é de menor intensidade do que o feixe original. Esta redução é ocasionada pelos efeitos de dispersão (devido as interfaces internas no material conhecidas como contornos de grãos) e absorção (dissipação por calor) do feixe que propaga no material.

A atenuação sonora ocorre, normalmente, devido a dispersão, ou seja, ao tamanho de grão que alguns metais apresentam (Tabela 1), como em soldas de aço inoxidável austenítico e peças fundidas em aços inoxidáveis austeníticos. Em alguns casos pode tornar o ensaio inviável, quando a atenuação sonora é muito elevada.

Tabela 1 - Valores de atenuação de sinal para diferentes processos de fabricação [RD TECH, 2004].

Material - Aço Cr-Ni	Atenuação sonora (dB/mm)
Forjados	0.009 a 0.010
Laminados	0.018
Fundidos	0.040 a 0.080

2.2.9. Impedância Acústica

A impedância acústica (Z , $\text{kg/m}^2\text{s}$) de um material pode ser definida como o produto da velocidade de propagação (v , m/s) do som pela massa específica (ρ , kg/m^3), o que determina características importantes sobre a quantidade de energia refletida e transmitida na inspeção entre dois meios.

$$Z = \rho \cdot v \quad [2.2]$$

Quando uma onda sonora se propaga em uma peça em que existe uma descontinuidade de material, isto é, existe uma interface entre dois materiais naquele equipamento, parte da energia sonora é refletida nesse ponto, enquanto a outra parte continua sua trajetória. A quantidade de energia sonora que será

transmitida e refletida nas interfaces é dependente da impedância acústica dos dois materiais. No caso de similaridades nas impedâncias acústicas não ocorre reflexão (a impedância de alguns materiais pode ser encontrada no Anexo 1). Quanto maior for a diferença de impedância entre os dois materiais, maior será a reflexão na interface [VIEIRA, 2013].

Os índices de reflexão (R) e transmissão (T) para uma incidência normal podem ser calculados pelas Equações 2.3 e 2.4, respectivamente.

$$R = \frac{I_r}{I_i} = \left[\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right]^2 \quad [2.3]$$

$$T = \frac{I_t}{I_i} = \frac{4Z_2Z_1}{(Z_2 + Z_1)^2} \quad [2.4]$$

onde:

Z_1 é a impedância acústica do meio 1, Z_2 a impedância acústica do meio 2.

Na incidência oblíqua de uma onda ultrassônica, devem ser considerados os fenômenos de conversão e de refração da onda incidente [SANTIN 2003]. Pode-se observar na Figura 7 as possibilidades de geração de ondas em uma interface a partir de uma onda longitudinal numa incidência oblíqua.

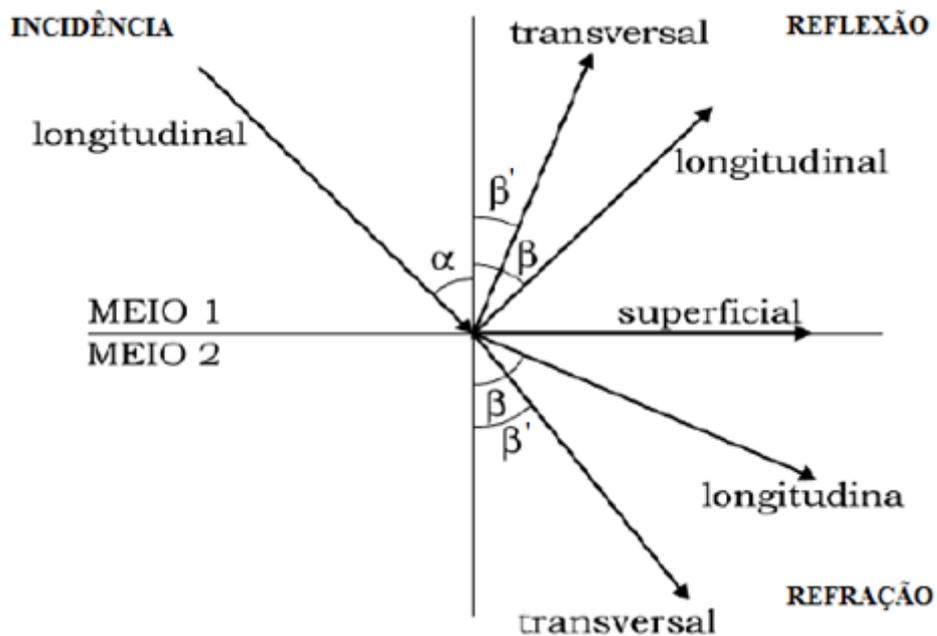


Figura 7 - Possibilidade de geração de ondas a partir de uma incidência oblíqua de uma onda longitudinal na interface entre dois meios [SANTIN, 2003].

Analisando a lei de Snell (Equação 2.5), que descreve o comportamento físico das ondas nesse tipo de incidência entre dois meios e depende da velocidade do som nos materiais, dos meios 1 e 2, onde as ondas se propagam e dos ângulos de incidência, reflexão ou refração. Esta avaliação é comumente utilizada no projeto de transdutores ultrassônicos.

$$\frac{\text{sen}_\alpha}{\text{sen}_\beta} = \frac{V_1}{V_2} \quad [2.5]$$

onde:

V_1 é a velocidade do som no meio 1, V_2 é a velocidade do som no meio 2, α é o ângulo de incidência e β o ângulo de refração ou reflexão.

2.2.10. Geração de Ondas de Ultrassom (Feixe Sonoro)

Geralmente as ondas de ultrassom são geradas por cristais piezoelétricos que produzem uma tensão mecânica como resposta a uma tensão elétrica que é característica de alguns cristais, como quartzo, sulfato de lítio, titânio de bário, vide Anexo 2. Quando submetidos a uma diferença de potencial (tensão de alta frequência), estes cristais se deformam mecanicamente. Quando ocorre esse retorno da onda de tensão (deformação mecânica) produz no cristal cargas elétricas que são transmitidas para o leitor do aparelho [LIMA, 2010].

Um mesmo transdutor pode ser apropriado para a recepção e transmissão de ondas sonoras, porém, alguns cristais têm melhores propriedades para receber o feixe enquanto outros para transmitir (Tabela 8 no Anexo 2). No mercado é encontrado diversas opções de transdutor com as seguintes características:

- ❖ Emissão/recepção em cristais distintos (em sondas distintas ou não);
- ❖ Emissão/recepção num só cristal.

2.2.11. Comportamento do Feixe Sonoro

Na utilização de um material sólido isotrópico, as principais características de propagação do feixe sonoro estão relacionadas com a frequência e o comprimento de onda. Quanto maior for a frequência empregada, maior será a capacidade de detecção de pequenas discontinuidades (aumento da resolução e da sensibilidade do ensaio) e menor será o comprimento de onda, entretanto, a atenuação sonora será maior.

O feixe sonoro gerado não vem de um único ponto do cristal piezoelétrico mas da totalidade de sua superfície, gerando um campo sonoro. O campo sonoro pode ser dividido em três regiões conhecidas como campo afastado, campo de transição ou zona de Fraunhofer e campo próximo ou zona de Fresnel (Figura 8) [LIMA, 2010]. A região vermelha, nesta figura, representa zonas de elevada energia, em compensação as áreas verde e azul representam as de mais baixa energia [OLYMPUS, 2011].

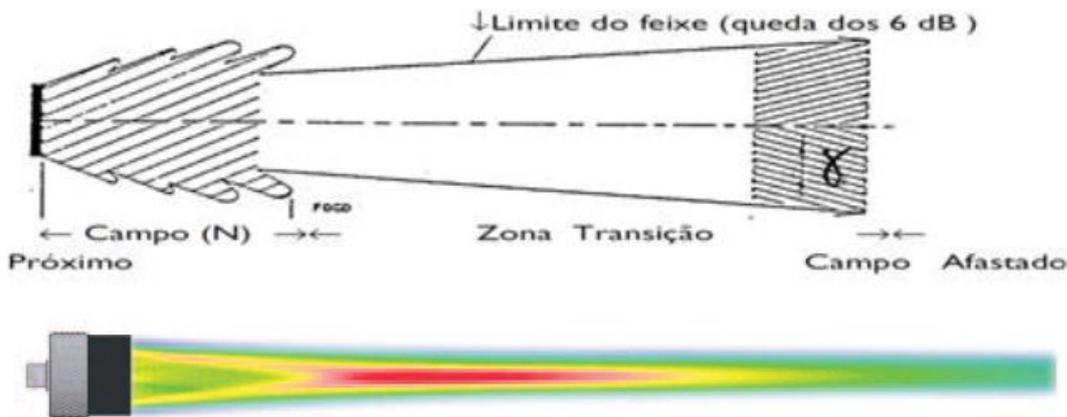


Figura 8 - Comportamento do feixe sonoro [VIEIRA, 2013; OLYMPUS, 2011].

Após o campo próximo, na denominada zona de transição, o feixe sonoro ganha uma aparência mais uniforme, manifestando máxima pressão sonora, ou seja, nessa região é mais fácil a detecção de descontinuidades ao decorrer da inspeção, independentemente de seu tamanho. Seu comportamento pode ser observado na Figura 8.

Por causa das variações no campo próximo, pode se tornar difícil uma avaliação com precisão as descontinuidades se utilizadas as técnicas baseadas em amplitude (Figura 8). A distância do campo próximo é função da frequência (f) da sonda, do diâmetro do elemento (D) e da velocidade do som (c) do material inspecionado, como é apresentado pela Equação 2.6 [LIMA, 2010]:

$$N = \frac{D^2 f}{4 c} \quad [2.6]$$

Na Figura 10 é possível se observar como a localização das descontinuidades na peça afeta a amplitude dos sinais refletidos, tanto da reflexão do defeito, como do eco de fundo. Pode-se chegar à conclusão de que quando a descontinuidade se

encontra no campo próximo, sua amplitude é pequena, já quando o defeito se encontra no campo distante (região vermelha da Figura 8), se observa um grande aumento na amplitude do sinal. Entretanto, quando a descontinuidade se encontra muito distante da zona de transição, à cerca de 3 vezes a distância do campo próximo, a leitura de alguma descontinuidade é de difícil detecção, uma vez que devido à perda de pressão do feixe após a zona de transição, a amplitude do pico é muito reduzida.

Na Figura 9, pode ser observado este processo, onde na região verde há uma amplitude de sinal bem diversificada (região N) e na região azul há uma maior estabilidade. A amplitude decresce com o aumento da distância, assim, a detecção das descontinuidades é mais complicada.

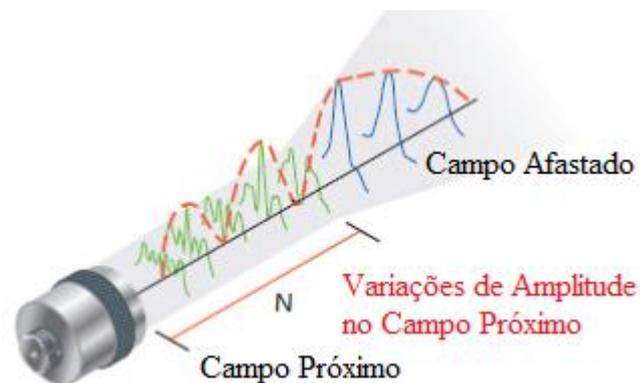
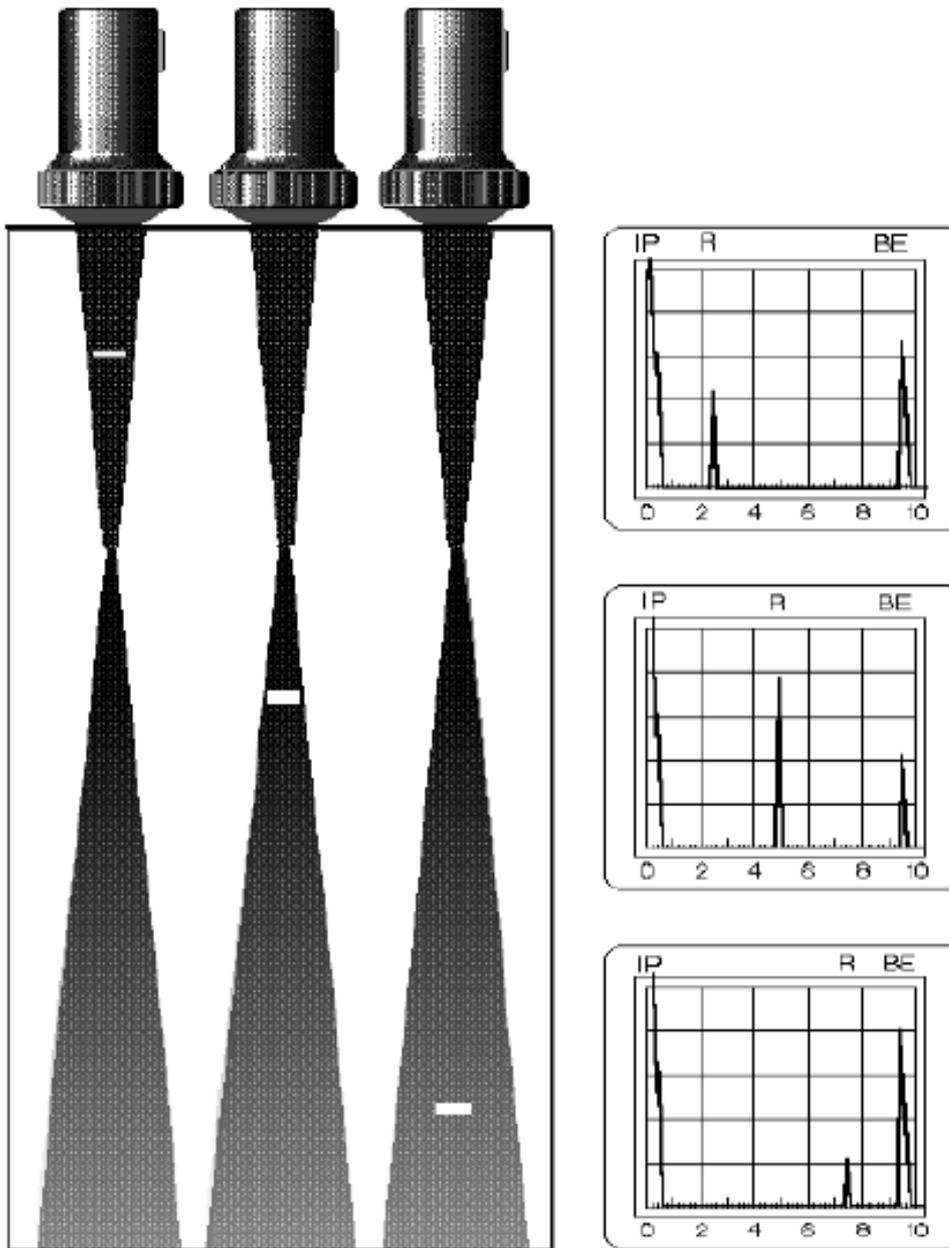


Figura 9 - Amplitude do feixe sonoro nas regiões do campo próximo ao campo distante [OLYMPUS, 2011].



**Figura 10 - Ampliação de vários picos para diferentes locais das
descontinuidades no feixe sonoro [BERKE].**

2.2.12. Transdutores

2.2.12.1. Normal ou Reto

Transdutores normais são formados por um cristal piezoelétrico, emissor e receptor posicionados em um bloco amortecedor, e geram apenas ondas longitudinais. Viabilizam a introdução perpendicular do feixe sonoro com a superfície da peça.

É utilizada quando se busca verificar a integridade de peças com superfícies paralelas ou quando se pretende encontrar descontinuidades perpendiculares à superfície da peça, como é o caso de fundidos, forjados ou chapas.

2.2.12.2. Angulares

Estes transdutores viabilizam a introdução de feixes sonoros com um ângulo determinado. O feixe sonoro é formado por um cristal piezoelétrico. É muito comum na inspeção de descontinuidades na camada superficial do material ou em regiões de solda. As ondas utilizadas para essas aplicações geralmente são transversais.

2.2.12.3. Duplo Cristal (TR)

Neste caso o transdutor é equipado com dois cristais com uma leve inclinação (entre 0° e 12°) com a superfície de contato. Nesse transdutor um cristal funciona como receptor, enquanto o outro funciona como transmissor do feixe sonoro, essa é a grande vantagem desse modelo, pois permite a escolha do cristal mais adequado para cada função. É ideal para a detecção de descontinuidades próximas da superfície da peça inspecionada.

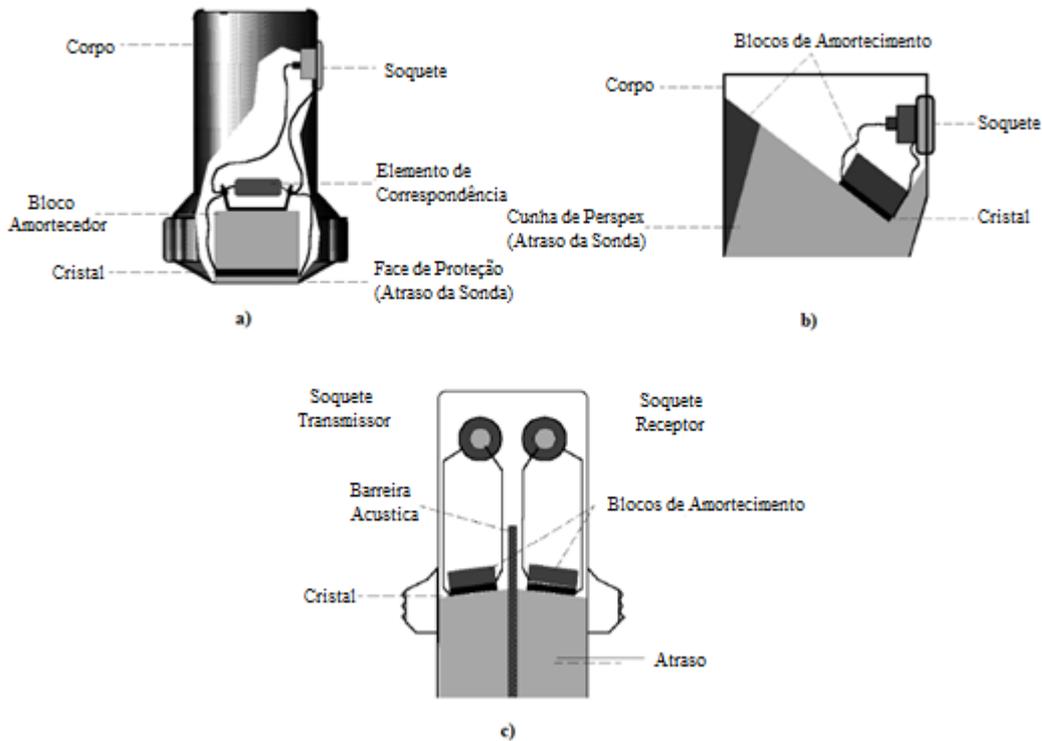


Figura 11 - Tipos de transdutores: a) Transdutor reto ou normal, b) Transdutor angular, c) Transdutor de duplo cristal (TR) [BERKE].

2.3. Ultrassom *Phased Array*

O ensaio por ultrassom utilizando a tecnologia *Phased Array* já é utilizado há algum tempo na área médica. Com o desenvolvimento da indústria e com a necessidade frequente de se obter uma maior precisão no dimensionamento de descontinuidades desenvolvidos em equipamentos com trabalhos cíclicos, esta técnica vem adquirindo mais espaço e importância na indústria.

Por diversas décadas a inspeção por radiografia industrial foi utilizada para a análise de dutos e tubulações industriais, porém a mesma apresenta limitações, principalmente quando é realizada avaliação de descontinuidades planares na raiz da solda e quando se deseja fazer uma análise através da mecânica da fratura, pois para esta aplicação a radiografia industrial não apresenta dados para o dimensionamento das descontinuidades internas, recomendando-se a utilização da técnica de ultrassom *Phased Array* para realizar esse tipo de inspeção, com menores custos, maior velocidade e menor risco a saúde do trabalhador, sem contar uma maior precisão de resultados.

Os *arrays* ultrassônicos oferecem duas vantagens principais sobre os transdutores monolíticos padrão. Em primeiro lugar, um arranjo particular é capaz de realizar uma gama de inspeções diferentes a partir de um único local e por isso é mais flexível do que um único elemento transdutor. Na verdade, um *array* pode gerar campos ultrassônicos de variedade quase infinita. Contudo, são mais comumente utilizados para produzir campos semelhantes aos dos transdutores de elemento único tradicionais, isto é, feixes planos, focados e direcionados. Em segundo lugar, a maioria dos tipos de matriz (com exceção de *arrays* anulares) pode ser usado para produzir imagens em cada local de teste. Isto permite a visualização rápida da estrutura interna de um componente. [WILCOX, 2006].

2.3.1. Princípios Básicos

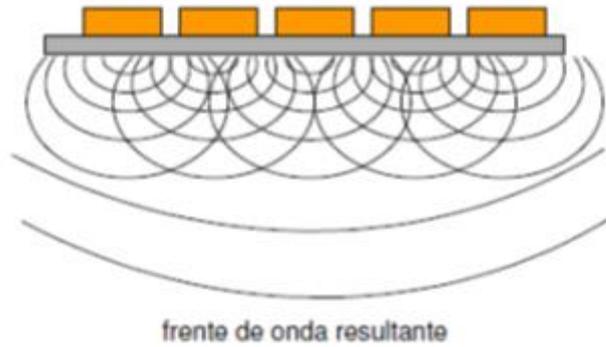
Os transdutores convencionais explicitados acima, possuem um cristal ou no máximo dois, em que o tempo de excitação do cristal é definido pelo aparelho de US, sempre executado de uma mesma maneira. Com o avanço tecnológico dos computadores, com circuitos e processadores mais rápidos, e o desenvolvimento de materiais piezocompostos para a fabricação de cristais mais eficientes, foi possível desenvolver uma tecnologia diferenciada em que funcionam em um mesmo transdutor dezenas (de 10 a 256 elementos) de pequenos cristais, cada um deles ligado a circuitos independentes dos demais cristais. Assim, temos uma modificação no comportamento do feixe sônico emitido pelo transdutor (Figura 12).

Devido aos vários cristais dos transdutores *Phased Array*, é possível em uma única varredura se inspecionar com diversos ângulos de refração distintos, uma vez que a mudança de ângulo é feita eletronicamente. Isso quer dizer que a inspeção é realizada de forma mais rápida, principalmente em soldas, onde é recomendado um mínimo de dois ângulos diferentes.

As principais vantagens dos transdutores *Phased Array* são [ANDREUCCI, 2014]:

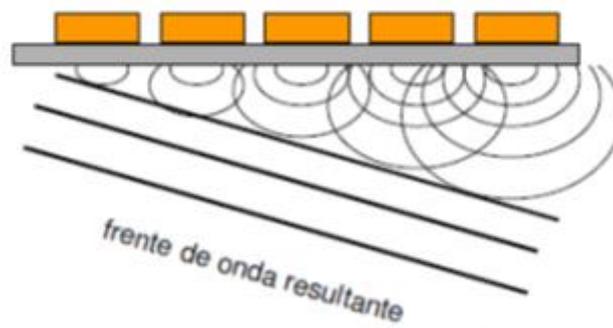
- ❖ Variedade de pontos focais para um mesmo transdutor;
- ❖ Variedade de ângulos de incidência para um mesmo transdutor;
- ❖ Varredura do material de forma eletrônica do feixe sônico;
- ❖ Variedade dos modos de inspeção;
- ❖ Maior flexibilidade para inspeção de juntas complexas.

a) Cristais com sinal em fase



Transdutor Olympus com 60 elementos (cristais) , 5 MHz

b) Cristais com sinal defasado no tempo



Transdutor com sapata intercambiável angular 60 graus 64 elementos, Sonatest

Figura 12 - Típicos transdutores *Phased Array* [ANDREUCCI, 2014].

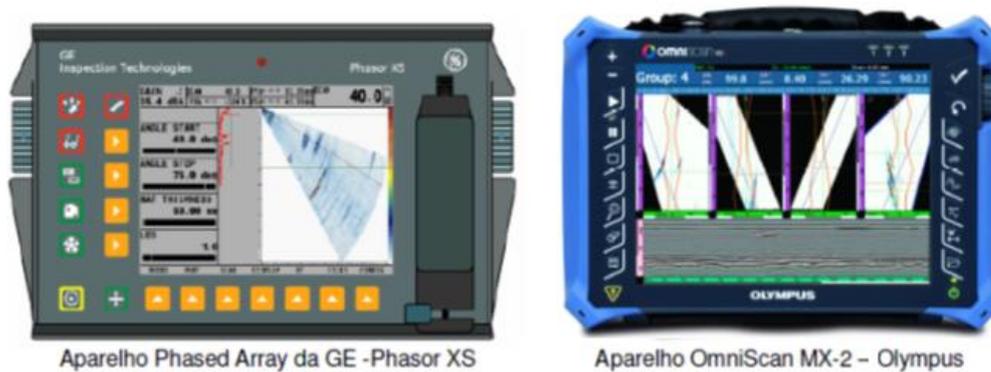


Figura 13 - Aparelhos *Phased Array* [ANDREUCCI, 2014].

2.3.2. Composição do Sistema de Inspeção

O formato da composição de uma inspeção por PA é demonstrado pela Figura 14. O sistema apresentado é completo e aplicável tanto para inspeções automáticas, mecanizadas ou manuais.

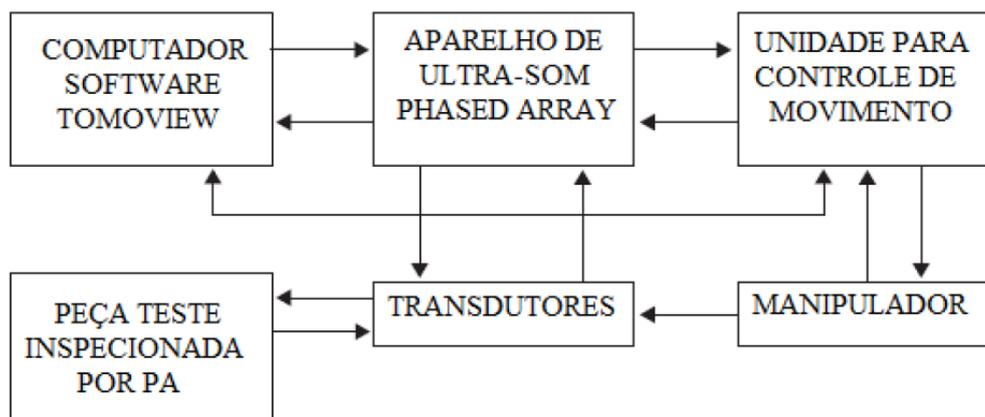


Figura 14 - Componentes de um sistema de inspeção por ultrassom *Phased Array* [CERQUEIRA, 2009].

2.3.3. Leis de Atrasos e Leis Focais

As matrizes de transdutores que compõem os cabeçotes utilizados na inspeção por *Phased Array* são normalmente instalados numa cunha de Roxelite que vão gerar leis de atrasos com várias formas, baseado no princípio de Fermat do mínimo tempo de chegada ao longo de um caminho específico [RD TECH, 2004].

A forma apresentada pelo gráfico de atraso da lei focal é parabólica em função da profundidade do foco. A Figura 15 exhibe três curvas de atraso para um cabeçote com 32 elementos, de forma que os valores de atraso aumentam no sentido dos elementos centrais do cabeçote.

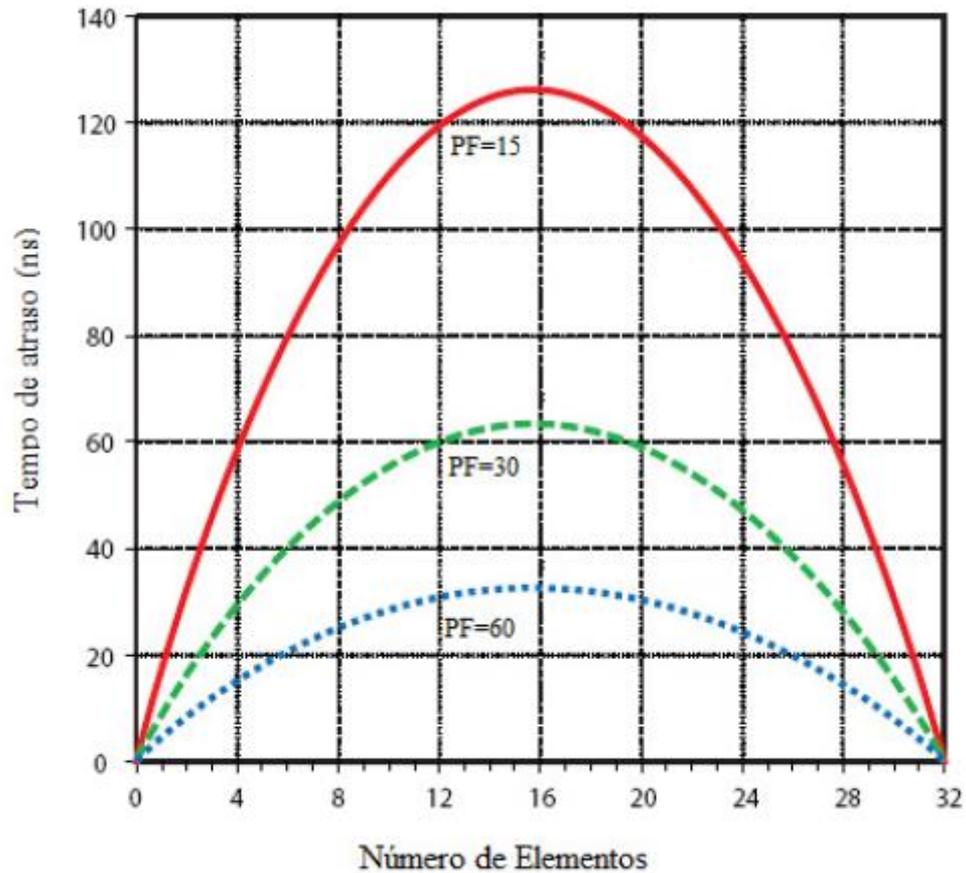


Figura 15 - Valores de atraso para um cabeçote linear com 32 elementos com profundidade focal em 15, 30 e 60 mm para ondas longitudinais [RD TECH, 2004].

A Figura 16 mostra que a relação da distância entre centros dos elementos adjacentes numa matriz de transdutor (passo) e atraso de tempo é linear.

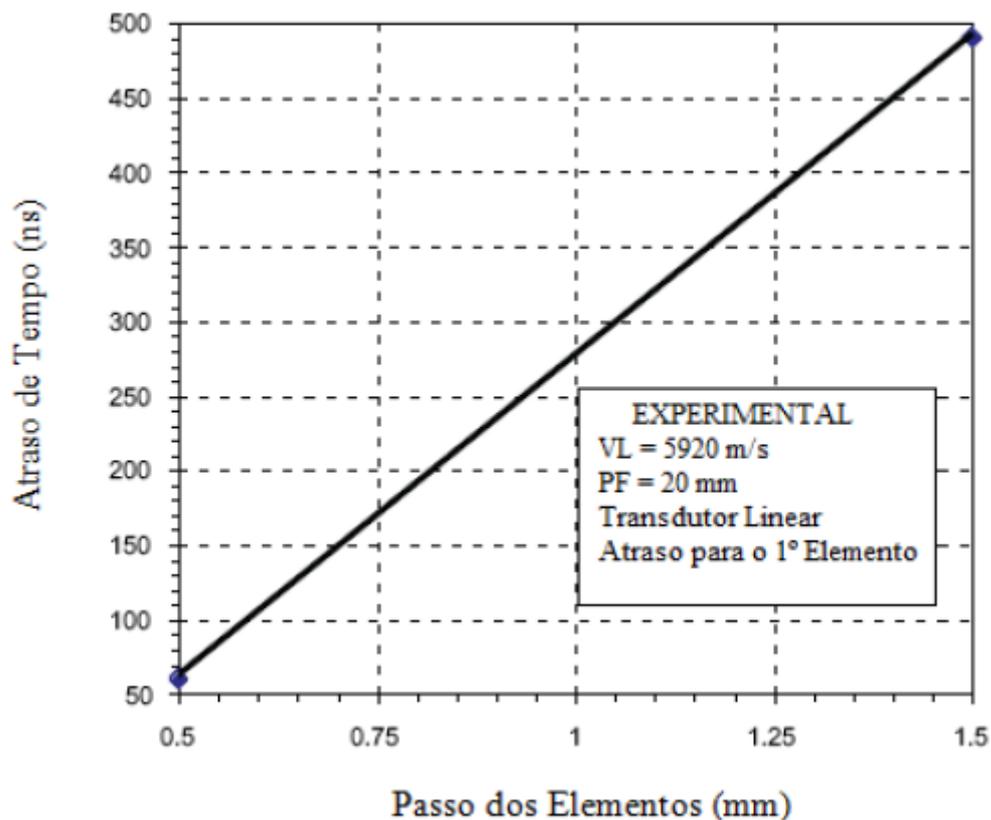


Figura 16 - Relação de atraso de tempo com o passo de um transdutor linear com 16 elementos para uma mesma profundidade focal [RD TECH,2004].

Em sondas que estão fixados sobre uma cunha, o valor de tempo de atraso é dependente da posição do elemento e do ângulo de refração que é desejado incidir sobre a área que deve ser inspecionada.

A Figura 17 exhibe a relação do ângulo de refração estabelecido pela lei de Snell com o tempo de atraso, através de uma função com formato de uma parábola quando o ângulo é igual a 45° . Quando os ângulos são menores do que aqueles determinados pela lei de Snell, o tempo de atraso vai aumentar da seção traseira do cabeçote para a seção frontal e quando os ângulos são maiores, o oposto ocorre, tendo maior atraso de tempo na região traseira do cabeçote, pois os elementos que se encontram na região frontal terão que percorrer uma distância maior dentro da cunha, logo, devem ser excitados primeiramente.

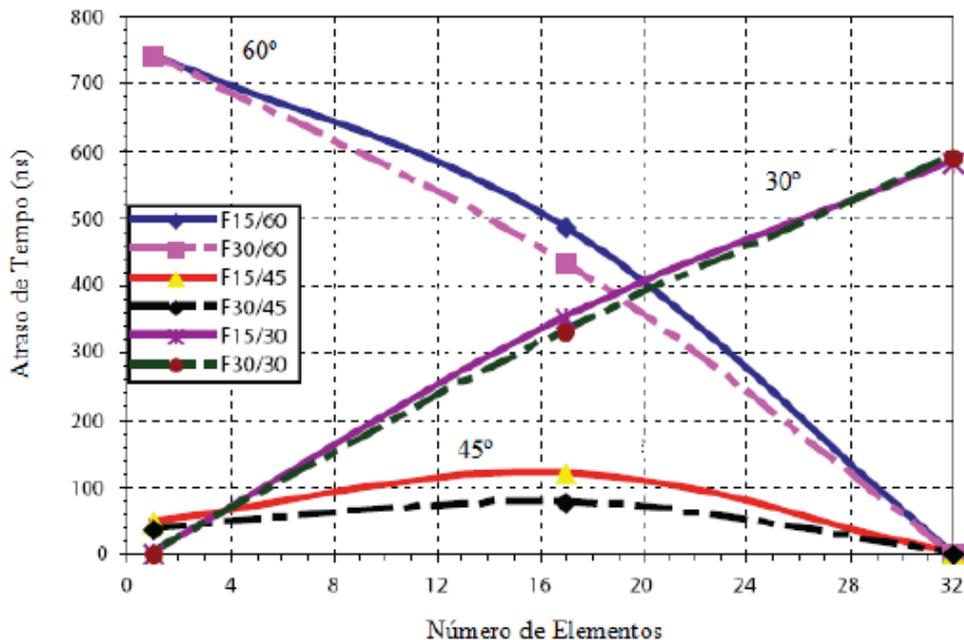


Figura 17 - Dependência do ângulo de refração e posição do elemento para um cabeçote *Phased Array* posicionado em uma cunha de Plexiglas® com 37° [RD TECH, 2004].

É feito o controle do tempo de atraso eletronicamente de forma precisa. O mínimo incremento no tempo de atraso determina a máxima frequência, esse vínculo pode ser obtido através da Equação 2.7:

$$\Delta t_{atraso} = \frac{n}{f_c} \quad [2.7]$$

onde: n é o número de elementos e f_c é a frequência.

Durante o planejamento da inspeção, que é elaborada de acordo com o projeto do componente a ser inspecionado, as varreduras são eletronicamente controladas através de ajustes dos parâmetros, o que vai determinar. A determinação do tipo de transdutor que é utilizado, a especificação da cunha, ângulos para realizar a varredura, posição do transdutor em relação à possível descontinuidade, a profundidade focal, o número de elementos que deve ser utilizado e a escala de inspeção são definidas de acordo com o projeto da peça à ser inspecionada. Varreduras controladas eletronicamente podem ser definidas das seguintes formas:

- ✓ Varredura Linear – a lei focal e atraso de tempo é multiplexada através de um grupo de elementos ativos, de forma que a varredura é realizada com um ângulo de incidência constante e ao longo do comprimento da sonda *Phased Array*. Na aplicação da cunha, a lei focal vai corrigir

os diferentes atrasos de tempo que vai ocorrer quando o feixe sônico se propaga pelo interior da cunha para os elementos individuais do transdutor.

- ✓ Varredura Setorial – Empregam um mesmo número de elementos, mas modifica o tempo de atraso para possibilitar a angulação do feixe sônico por uma determinada banda de ângulos e profundidade focal. Uma aplicação deste modelo de varredura foi desenvolvida para inspeção de componentes de difícil acesso em turbinas, como o caso de palhetas de rotores, sendo possível utilizar faixas de ângulos entre 20° e 80°.
- ✓ Profundidade Focal Dinâmica – A varredura é realizada com diferentes profundidades focais ao longo do eixo do feixe sônico, possibilitando deste modo a maximização dos sinais refletidos naquela região. Na prática, um pulso focalizado único é transmitido, e a focalização é realizada na recepção de todas as profundidades de focalização dinâmica, possibilitando a inserção somente da profundidade focal, nas leis focais, que é determinada como a região de maior interesse da inspeção.

2.3.4. Tipos de Representação Gráficas

Existem diferentes vistas para a interpretação dos dados que são adquiridos durante a realização de uma varredura, as mesmas são: A-Scan, B-Scan, C-Scan e S-Scan. Durante a aquisição, os dados de inspeção são posicionados através de um codificador (encoder).

Na inspeção pela técnica *Phased Array* os resultados que são apresentados em tempo real, contêm o número total de sinais representados no modo A-scan, obtidos para uma determinada posição do cabeçote, mostrados em uma apresentação setorial ou S-scan, ou em uma apresentação B-scan, varredura eletrônica [RD TECH, 2004].

2.3.4.1. A-scan

Essa vista é muito utilizada durante as inspeções, mostra um ecograma onde na escala horizontal a posição dos picos determina a profundidade da superfície refletora que deve ser medida empregando como parâmetro a posição da sonda durante a varredura e a escala vertical a altura dos picos indica a quantidade de energia que foi recebida pela sonda, quantificando a atenuação sônica do material e servindo como parâmetro para avaliação do defeito. A Figura 18, demonstra o resultado de uma inspeção com visualização em A-scan com um pico de reflexão de 56% de amplitude.

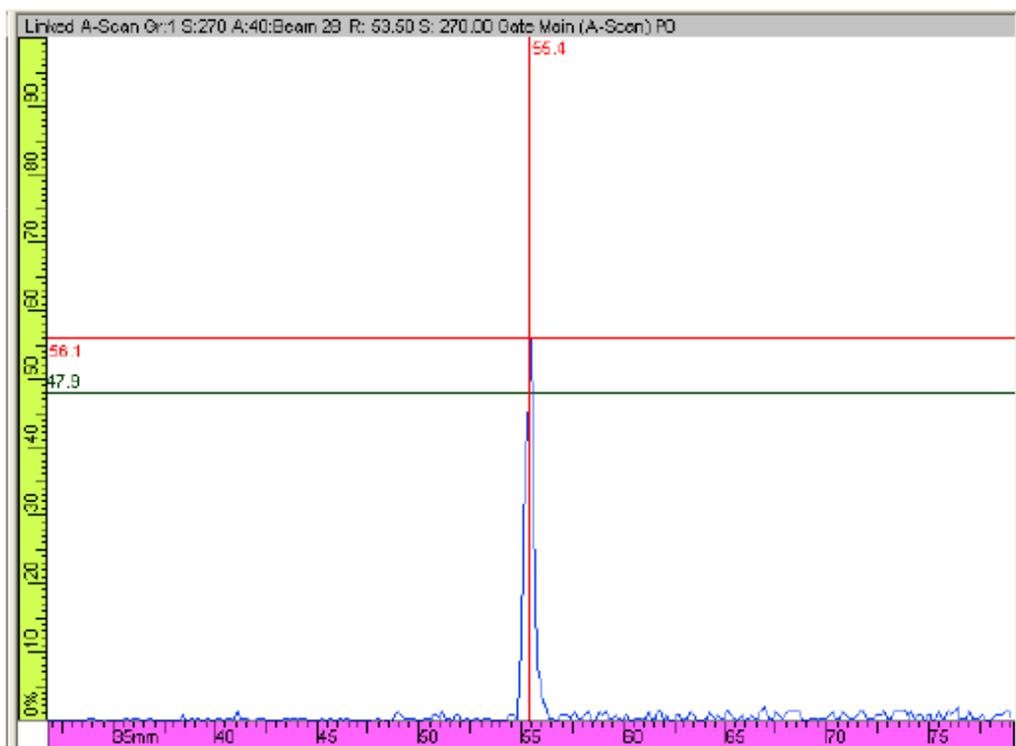


Figura 18 - Apresentação em A-scan dos dados de uma inspeção de uma junta soldada com um pico de reflexão com amplitude de 56% através de software Tomoviewer [RD TECH, 2004].

2.3.4.2. B-Scan

A visualização em B-scan mostra a seção transversal da superfície inspecionada, que condiz com o tempo versus a distância, de forma que um dos

eixos equivale ao tempo decorrido e o outro retrata a posição do cabeçote ao longo da superfície de contato da peça inspecionada, tomando como parâmetro o início da coleta dos dados. As medidas das intensidades dos ecos de reflexão não podem ser realizadas diretamente como é realizado na vista A-scan. A Figura 19 ilustra um sistema de inspeção por imersão com a técnica de visualização dos dados de inspeção em B-scan, com esse tipo de sistema pode-se localizar a descontinuidade e dimensiona-la no comprimento.

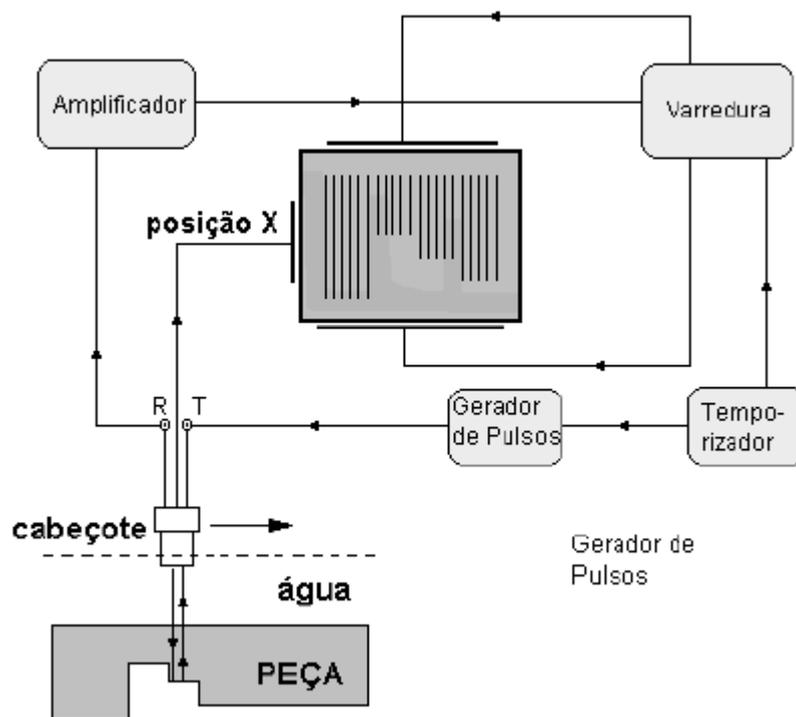


Figura 19 - Representação gráfica de um sistema de inspeção por imersão com visualização dos dados de inspeção em B-scan [SANTIN, 2003].

2.3.4.3. C-scan

Neste modo de visualização os dados de inspeção são plotados graficamente exibindo uma vista em planta da superfície inspecionada, com a chance de indicar a posição, o comprimento e a largura da descontinuidade. Geralmente a profundidade não é dimensionada, mesmo que hoje existam sistemas que são capacitados para determinar de forma semi-quantitativa a profundidade das descontinuidades, por meio das imagens adquiridas [METALS HANDBOOK VOL 17]. A Figura 20 exibe o resultado da inspeção de uma junta soldada com *Phased*

Array com focalização na raiz da solda com a exposição dos dados em C-scan, é identificada a existência de descontinuidades caracterizadas como falta de fusão.

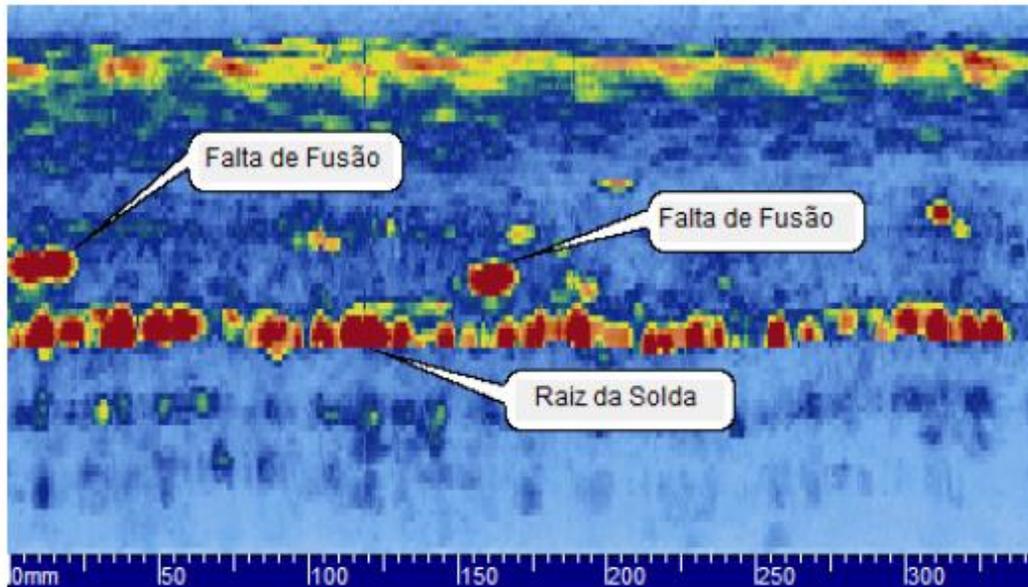


Figura 20 - Resultado da inspeção com *Phased Array* de uma junta soldada com a visualização dos dados em C-scan através do Software Tomoviewer [RD TECH, 2004].

2.3.4.4. S-scan

A exposição dos dados de inspeção em S-scan gera uma imagem global da superfície inspecionada e uma ligeira informação do componente em questão, assim como as possíveis descontinuidades presentes e detectadas pelas leis focais que foram produzidas para a inspeção. Os S-scans empregados na área industrial foram adaptados dos utilizados na área médica. As vistas em S-scan combinadas com os outros tipos de apresentação possibilitam determinar a morfologia do defeito encontrado [RD TECH, 2004]. A Figura 21, mostra o resultado de uma inspeção com *Phased Array* em S-scan com varredura setorial com os ângulos variando entre 42° e 68°.

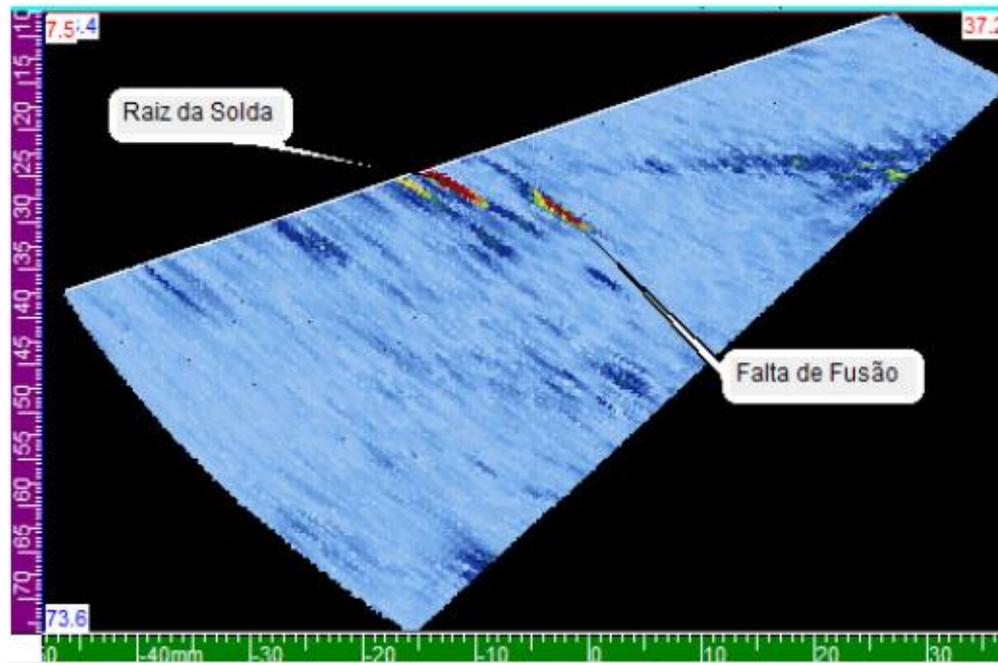


Figura 21 - Resultados da inspeção com *Phased Array* com varredura setorial e visualização dos resultados em S-scan através do Software Tomoviewer [RD TECH, 2004].

2.4. Técnicas de Inspeção por Ultrassom

Diversas técnicas podem ser empregadas nos testes por US dependendo de alguns fatores, como por exemplo, a natureza, dimensão e orientação das discontinuidades, condição da superfície, geometria do material à ser inspecionado e sua estrutura interna, isto é, com grãos grosseiros ou finos. Pode ser realizado de duas maneiras, a primeira é pelo contato direto entre a peça e o transdutor, com a utilização do acoplante e a segunda é pela imersão, onde uma coluna de água está entre o transdutor e a peça analisada (Figura 22) [HELIER, 2003].

2.4.1. Técnica de Pulso-eco

Esta técnica consiste pela emissão de feixes sonoros regulares pelo transdutor, de forma que se propaguem pelo material até se refletirem em um obstáculo, seja a superfície ou um defeito. Após a reflexão do feixe, o mesmo retorna ao transdutor,

transformando a energia mecânica em pulsos elétricos e apresentando os resultados no osciloscópio para análise do operador. Apenas um transdutor emite e recebe o feixe sonoro que percorre o material, podendo ser realizada a análise de profundidade do defeito ou da espessura do material (Figura 22).

2.4.2. Técnica de Transparência

Nesta técnica é utilizado dois transdutores, um funcionando como emissor enquanto o outro funciona como receptor das ondas ultrassônicas. Não permite localizar as descontinuidades ou defeitos, apenas é possível observar uma queda no eco recebido. É utilizado para a procura de defeitos na região próxima à superfície ou na inspeção de grandes espessuras (Figura 22), assim como na detecção de diferentes estruturas do material estudado.

A técnica de transparência pode ser utilizada para chapas, juntas soldadas, barras e o principal objetivo é estipular um critério comparativo para avaliação do sinal recebido, isto é, da altura do pico na tela.

O tamanho do sinal recebido pela técnica de transparência varia de acordo com a quantidade e tamanho das descontinuidades presentes no caminho do feixe ultrassônico. Deste modo o operador não consegue analisar as características e só realiza uma comparação com os valores obtidos pelo ensaio em uma peça sem presença de descontinuidades.

2.4.3. Técnica de Imersão

Neste caso o transdutor é à prova de água. A peça estudada é colocada submersa em água, o que permite um acoplamento homogêneo entre a peça e o transdutor. O transdutor pode estar em contato com a peça ou separado por diferentes distâncias (Figura 22).

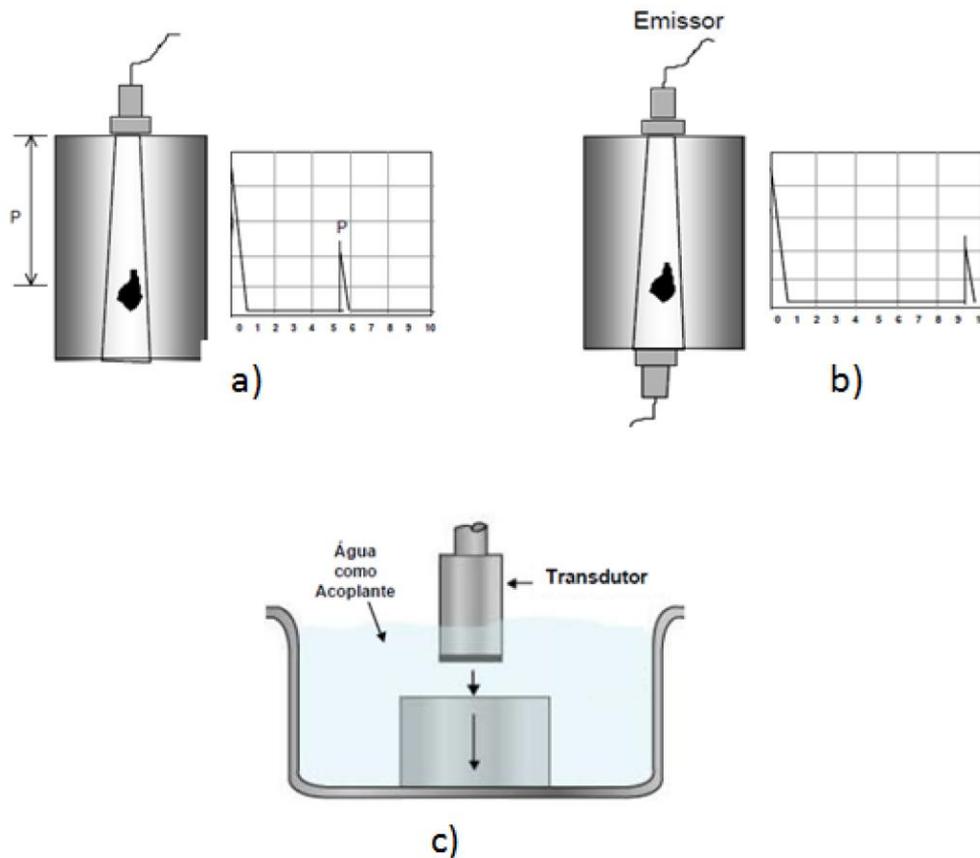


Figura 22 - a) Técnica de pulso - eco, b) Técnica de transmissão total e c) Técnica de imersão [HELIER, 2003].

2.5. Técnicas de Inspeção com *Phased Array*

As técnicas mais utilizadas nas inspeções feitas com *Phased Array*, para avaliação e dimensionamento de descontinuidades, são a pulso eco, TANDEM e o TOFD. A escolha da técnica é realizada dependendo de alguns fatores, os quais se destacam os seguintes:

- ✓ O tipo de material que será inspecionado e seus requisitos de fabricação;
- ✓ O tipo de descontinuidade que se pretende detectar e os critérios de avaliação;
- ✓ Em caso de inspeção de juntas soldadas depende da geometria do chanfro à ser inspecionado;

- ✓ A classificação da inspeção (inspeção de fabricação ou inspeção em serviço), uma vez que a técnica TOFD é a mais indicada para dimensionar a altura das descontinuidades em inspeções em serviço.

2.5.1. Pulso-Eco

Nessa técnica um mesmo transdutor é responsável tanto pela transmissão como pela recepção das ondas ultrassônicas que se propagam pelo material inspecionado. Estes pulsos que se propagam pelo material são refletidos pelas descontinuidades, refletor ou pela superfície oposta ao local de contato entre a sonda e o material monitorado, que origina os sinais de reflexão recebidos pelo mesmo transdutor. [KRAUTKRAMER, 2005].

Para os transdutores *Phased Array* são adotadas defasagens no tempo dos sinais enviados (pulsos) e dos sinais recebidos (ecos) pelos seus elementos individuais. O tipo de onda, o ângulo de refração e a profundidade focal são parâmetros utilizados para determinar o tempo de atraso.

A Figura 23 apresenta uma configuração de pulso-eco com o uso de um transdutor *Phased Array* em um bloco de referência numa varredura setorial com a visualização em S-scan, através do software Tomoview. É notada nessa varredura a existência de quatro furos do bloco padrão com dimensões conhecidas.

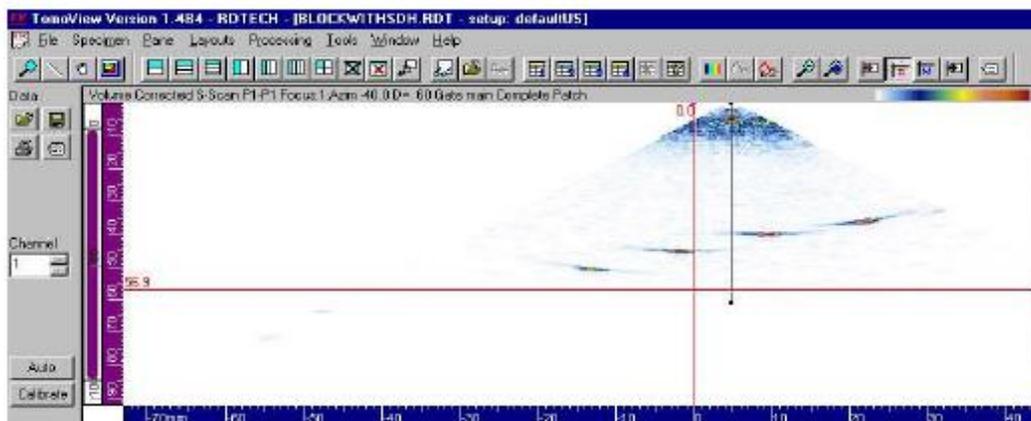


Figura 23 - Visualização em S-scan de uma configuração pulso-eco, empregando um transdutor *Phased Array* por meio de uma varredura setorial no bloco padrão [RD TECH, 2004].

2.5.2. TANDEM

Quando são realizadas inspeções em peças de grandes espessuras onde há a dificuldade de a onda ultrassônica refletir na descontinuidade e retornar ao transdutor e assim proporcionando deste modo uma análise das descontinuidades, é utilizada a configuração TANDEM. O método necessita da utilização de dois transdutores, um atuando como emissor e outro como receptor, e estando separados por uma distância fixa e fixados em dispositivos de forma que ambos possam ser deslocados sobre a superfície inspecionada e a distância se mantenha inalterada.

Com essa técnica é possível realizar a detecção de descontinuidades que se encontram também na vertical, no entanto, não é adequada para realizar o dimensionamento de descontinuidades, já que apresentam limitações que vão requerer a utilização de outra técnica.

2.5.3. Time of Flight Diffraction

O TOFD (Time of Flight Diffraction) opera um par de sondas ultrassônicas posicionadas em lados opostos de uma solda. Uma das sondas, o transmissor, emite um pulso ultrassônico que é captado pela sonda oposta, o receptor. Quando no material não contem descontinuidades, o sinal capturado pela sonda receptora é de duas ondas: uma que percorre a superfície e uma que se reflete na parede distante. Quando a descontinuidade está presente, há uma difração de baixa energia da onda ultrassônica pelas extremidades da descontinuidade. Usando o tempo de voo medido do pulso, a profundidade do defeito pode ser calculada facilmente.

Para criar a imagem, o sinal analógico é digitalizado e quantificado (dividido em porções) em uma gama grande de tonalidades de cinza, ajustáveis entre o branco e o preto, apresentando uma vista em B-scan empilhada. O preto é a representação de um grande sinal positivo, enquanto o branco é a representação de um grande sinal negativo em TOFD, sendo possível realizar uma visualização em D-scan, pois cada sinal de A-scan é substituído pela tonalidade de cinza associada com a amplitude do sinal, tornando possível que cada tela em A-scan que foi registrada na varredura, represente uma imagem bidimensional do interior do cordão de solda, o que possibilita a detecção das descontinuidades. A polaridade é um parâmetro fundamental para a interpretação da imagem [RTD ROTOSCAN, 2007]. A Figura 24 mostra a imagem criada com os dados de inspeção com TOFD em D-scan. É

possível notar a presença da onda lateral, dos sinais de difração da descontinuidade existente na região da solda e do eco de fundo representada pela onda longitudinal.

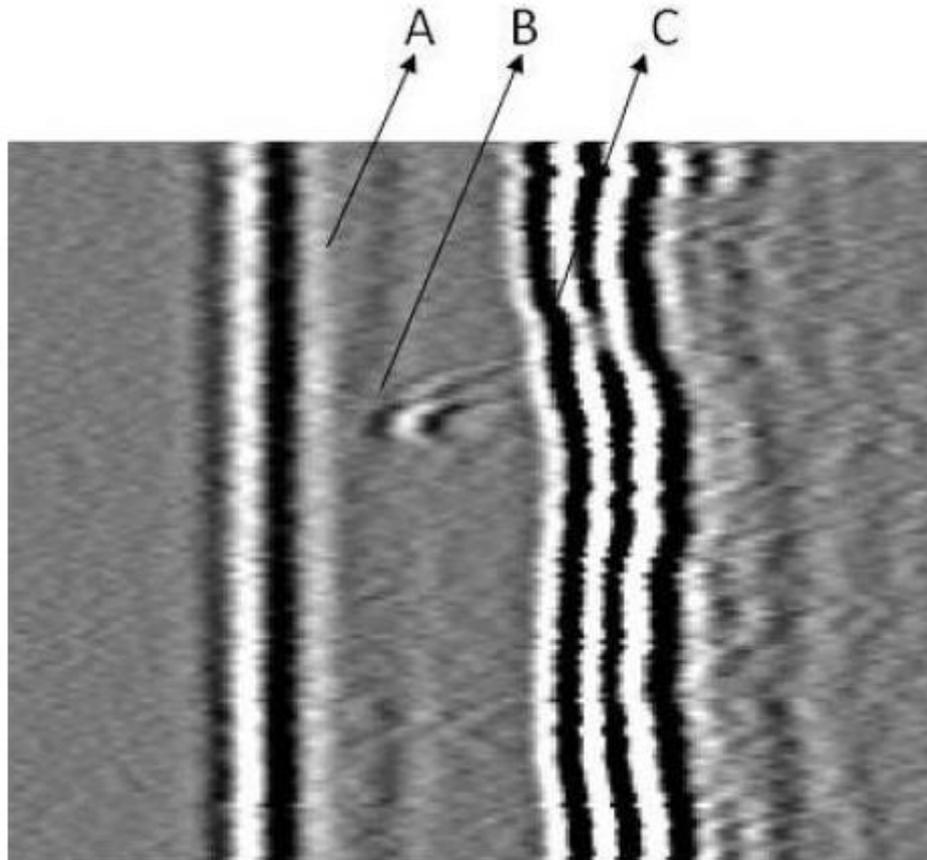


Figura 24 - Visualização em D-scan de uma inspeção de junta soldada com TOFD: (A) onda lateral, (B) sinais da descontinuidade e (C) Eco de fundo da onda longitudinal [MOREIRA, 2003].

Inspeções que precisam do dimensionamento das descontinuidades internas nas paredes de vasos de pressão, dutos e cordões de solda, a técnica de TOFD é muito utilizada e detecta o percurso das ondas difratadas das extremidades destas descontinuidades.

A técnica também é utilizada com sondas *Phased Array* na forma transmissor-receptor (pitch-and-catch). A principal diferença entre as indústrias é que a técnica TOFD é empregada com varredura com movimento em duas direções na área de geração de energia e com varredura com movimento linear na área petroquímica. Quando a varredura é realizada com movimentação bidirecional, a

coleta de dados é maior, e conseqüentemente há maior precisão nos resultados, enquanto que a varredura linear é realizada com maior velocidade. [RD TECH, 2004].

As limitações desse tipo de técnica podem ser resumidas nos seguintes pontos: pequena relação sinal ruído, sensibilidade elevada para materiais com granulação grosseira, problemas de acoplamento em componentes de geometria complexa e o fato de a amplitude do sinal não estar diretamente relacionada com a dimensão da descontinuidade.

Apesar das limitações citadas, a técnica é muito precisa para dimensionamento de trincas (tanto comprimento como altura). Segundo o ASME Code Case 2235 a técnica TOFD é aceita como alternativa para o controle de qualidade das soldas de vasos de pressão.

2.6. Técnicas de Dimensionamento de Descontinuidades

Para avaliação, de uma descontinuidade, através de critérios de inspeção é necessário saber suas dimensões, logo o ensaio por ultrassom possui meios que permitem que os inspetores e engenheiro visualizem o tamanho da descontinuidade presente no material para a sua avaliação de forma correta. Entretanto, para este dimensionamento ser confiável e aceitável é necessário se ter os seguintes cuidados:

- ✓ Experiencia consolidada no tipo de componente que será realizado o dimensionamento de descontinuidades;
- ✓ Conhecimento do comportamento do feixe sônico sobre a área que está sendo realizada a inspeção;
- ✓ Conhecer as diferentes técnicas de dimensionamento e suas limitações;
- ✓ Selecionar a aplicar de forma correta a técnica de dimensionamento para dimensionamento das descontinuidades;
- ✓ Em caso de aparelhos com softwares específicos para realização de análise e dimensionamento das descontinuidades, o inspetor deve ter conhecimento da ferramenta computacional utilizada.

2.6.1. Técnica da Queda dos 6dB

A técnica de dimensionamento utilizando a queda de 6dB tem como parâmetro inicial a localização da sonda ultrassônica em relação a descontinuidade que deverá apresentar nesta posição um eco de reflexão com a maior amplitude possível. Após conhecimento deste ponto o cabeçote é deslocado lateralmente até que metade do feixe sônico inicial esteja incidindo sobre a descontinuidade, que vai proporcionar uma queda de amplitude de 50% que equivale a 6dB, de forma que a linha de centro do cabeçote esteja coincidente com uma das extremidades do defeito [SANTIN 2003]. É repetido o mesmo procedimento até que seja atingido a outra extremidade, e desta forma é determinado o comprimento da descontinuidade. Esta técnica pode ser utilizada para medir refletor pequenos (falta de fusão, inclusão de escoria e trincas) assim como serve também para grandes refletor (dupla laminação) muito comuns em chapas laminadas.

O dimensionamento do comprimento de descontinuidades pode ser separado em etapas, como mostrado na Figura 25. A sonda no ponto (A) busca a maximização do sinal da descontinuidade a 100% da altura da tela do aparelho no modo de representação em A-scan. Os pontos (B) e (C) são locais onde a sonda já sofreu deslocamento lateral com o intuito de se determinar as bordas da descontinuidade, que vai apresentar uma queda de 50% da altura inicial do sinal que corresponde a uma queda de 6dB.

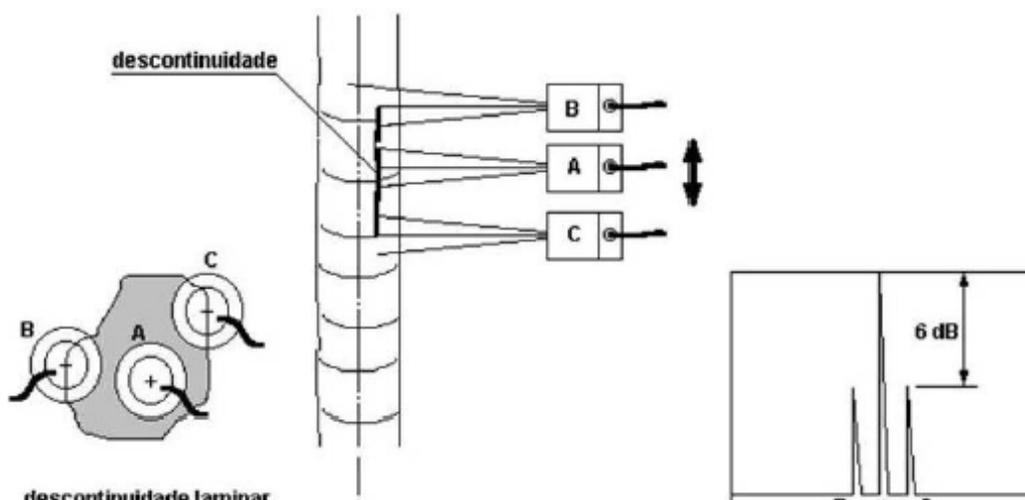


Figura 25 - Representação esquemática do dimensionamento de descontinuidades utilizando a técnica da queda dos 6dB numa junta soldada [SANTIN, 2003].

2.6.2. Técnica da Queda de 20dB

Está técnica é comumente utilizada para o dimensionamento de descontinuidades internas em cordões de soldas ou componentes estruturais, e é recomendada para refletores grandes. A sua utilização mais comum é para o dimensionamento da altura (dimensão em relação à espessura do componente inspecionado) da descontinuidade empregando transdutores angulares [SANTIN, 2003].

Antes da aplicação da técnica o inspetor deve conhecer as características do feixe sônico que será empregado para a inspeção e as bordas dos 20dB, com a utilização de um bloco IOW. Na Figura 26 está ilustrado o procedimento para verificação do feixe sônico empregando um cabeçote angular convencional. Na distância (d_1) a sonda está na posição onde a reflexão é a máxima obtida por este refletor, ajustando o ganho na tela de modo que o sinal esteja a 100% de altura. Ao movimentar o cabeçote para a frente, é observado a queda da amplitude até que o eco de reflexão do refletor caia para 10% da altura da tela, o que será equivalente à uma diminuição de 20dB, registrado no ponto (d_2). No ponto (d_3) é seguido o mesmo procedimento do ponto anterior, modificando apenas o sentido em que o cabeçote é movimentado. Para os outros refletores se repete os mesmos procedimentos e com estes respectivos pontos, que vai corresponder a distância projetada com a profundidade de cada refletor padrão, é traçado e verificado as características do feixe sônico que está sendo utilizado no transdutor convencional.

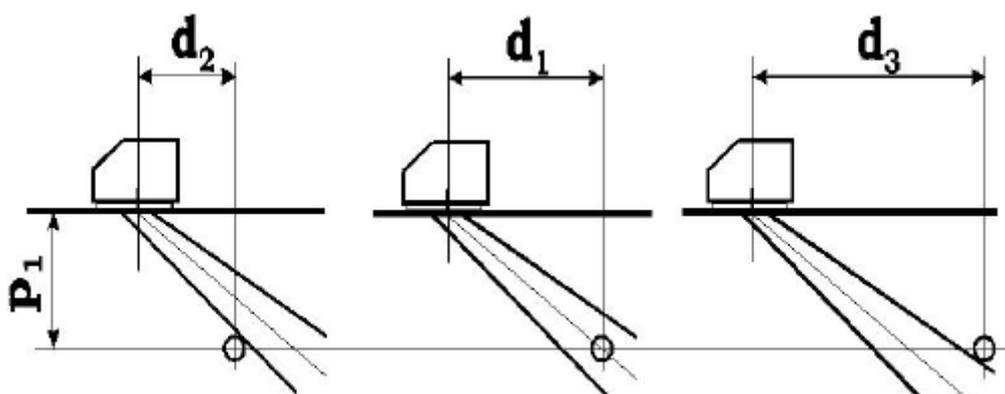


Figura 26 - Representação esquemática da verificação do comprimento do feixe sônico com a utilização de um cabeçote angular convencional num bloco IOW [SANTIN 2003].

É necessário, para o dimensionamento da altura do defeito, conhecer a geometria do chanfro que está sendo inspecionado e a característica do feixe sônico empregado. Na Figura 27 é ilustrada as etapas para o dimensionamento. Em (B) a sonda é posicionada de forma a se obter o maior eco de reflexão da descontinuidade com ajuste no ganho de modo a colocar a sua altura em 100%, o percurso sônico (p_1) é conhecido. Em (A) e (C), a sonda é movimentada para frente e para trás, a partir de (B), de modo a se obter uma reflexão com 10% da altura de reflexão original, e assim se determina os percursos sônicos (p_2) e (p_3), respectivamente. Com todos os percursos sônicos conhecidos (p_1 , p_2 e p_3) e as respectivas distâncias projetadas (d_1 , d_2 e d_3), é estabelecida a altura da descontinuidade.

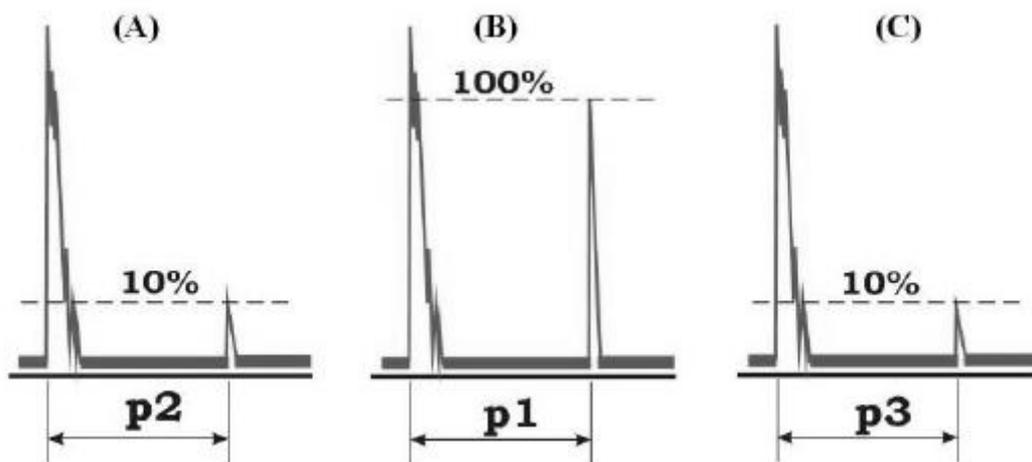


Figura 27 - Representação esquemática do dimensionamento da altura de defeitos utilizando a representação em A-scan pela técnica da queda de 20dB [SANTIN 2003].

Para o uso da técnica pelo equipamento com tecnologia *Phased Array* e com o emprego de software de análise dos resultados, este dimensionamento é feito através de ferramentas computacionais disponibilizadas pelo próprio software. A imagem da descontinuidade é codificada em cores que representam um nível de ganho, desta forma este dimensionamento é realizado pela representação gráfica da descontinuidade, observando a escala de ganho indicada.

2.6.3. Aplicações

Nos dias atuais o US é abundantemente utilizado na manutenção industrial, como por exemplo, na busca por prevenir possíveis falhas de equipamentos, vazamentos de gás, óleos e líquidos em geral.

É muito utilizado na detecção de defeitos em regiões críticas que são relacionadas com a segurança e qualidade, como soldas estruturais, forjados, vigas de aço, oleodutos, vasos de pressão, aeronaves, cascos de navios e diversas outras aplicações [ANDREUCCI, 2014].

2.6.4. Vantagens e Limitações do Método

Método de teste ultrassônico desempenha um papel importante no controle de qualidade de produção. Contudo, devido à complexidade do perfil de superfície, os transdutores de contato ultrassônicos convencionais apresentam incompatibilidade de contato e desorientação do feixe de ultrassom, o que leva a um mau desempenho de detecção, caracterização incorreta e área de varredura descoberta. Assim, são urgentemente necessários novos métodos de ensaios não destrutivos com elevada eficiência e precisão. [CAO, HUAN-QING, 2015].

Sempre existem vantagens e limitações para cada END utilizado e o US não é diferente, tendo os seguintes prós e contras [VIEIRA, 2013]:

Vantagens:

- ✓ A inspeção pode ser realizada a partir de uma superfície e detectar discontinuidades no interior do material, assim como dimensioná-las.
- ✓ Permite detectar tanto discontinuidades internas ao material como discontinuidades superficiais.
- ✓ Possibilita a medição de espessura de diversos materiais, assim como observar o desgaste natural ou por corrosão do material.
- ✓ É possível realizar a detecção de discontinuidades de dimensões reduzidas.
- ✓ Existem diversas técnicas de inspeção, permitindo avaliar com maior abrangência de dimensões e materiais.
- ✓ Permite a realização de ensaios em equipamentos de difícil acesso.
- ✓ Pode ser realizado em temperaturas elevadas desde que seja utilizado o equipamento adequado.
- ✓ O equipamento é portátil, leve e de fácil utilização.

Desvantagens:

- ✓ Defeitos orientados paralelamente as ondas ultrassônicas, normalmente não são detectadas, necessitando vários ângulos ou direções de varrimento.
- ✓ Materiais fundidos, se apresentarem grão muito grosseiros, ou seja, a estrutura dos materiais pode inviabilizar o ensaio.
- ✓ Superfícies irregulares podem diminuir a eficácia do ensaio.
- ✓ Necessita de uma grande experiência e de qualificação do operador nos ensaios e na avaliação das descontinuidades.
- ✓ Os sinais apresentados durante o ensaio são dependentes de interpretação, ou seja, pode-se ter indicação de uma descontinuidade inexistente ou alguma descontinuidade pode não ser indicada.

2.7. Radiologia Industrial

O Raio-X foi descoberto em 1895 por Wilhem Roentgen, quando durante estudos sobre radiação percebeu certa radiação “invisível” que podia atravessar alguns materiais que a luz visível não conseguia. Logo essa descoberta foi utilizada na medicina, uma vez que a radiação atravessava o corpo humano e conseguia diferenciar o esqueleto das demais partes do corpo, já que sua densidade é diferente do resto dos tecidos do corpo.

A radiografia é um método usado como END, fundamentado na absorção variada da radiação penetrante pela peça que é inspecionada. Em consequência de diferenças na densidade e variações de espessura do material, ou diferenças nas características de absorção causadas por variações na composição do material, diferentes partes de uma peça absorverão diferentes quantidades de radiação penetrante. Essa distinção na quantidade de radiação absorvida, irá indicar a existência de uma falha interna ou defeito no material.

A radiografia industrial é utilizada para a detectar regiões de um determinado material que manifestam espessuras ou densidades diferentes quando comparadas com uma região vizinha, isto é, é um método capacitado para detectar com boa sensibilidade defeitos volumétricos. Em outras palavras, a capacidade do processo em detectar defeitos pequenos como trincas em planos perpendiculares ao feixe, depende da técnica realizada no ensaio. Defeitos volumétricos como inclusões e

vazios, que apresentam uma espessura variável em todas as direções, serão facilmente detectados, contanto que não sejam muito pequenos em relação à espessura total da peça.

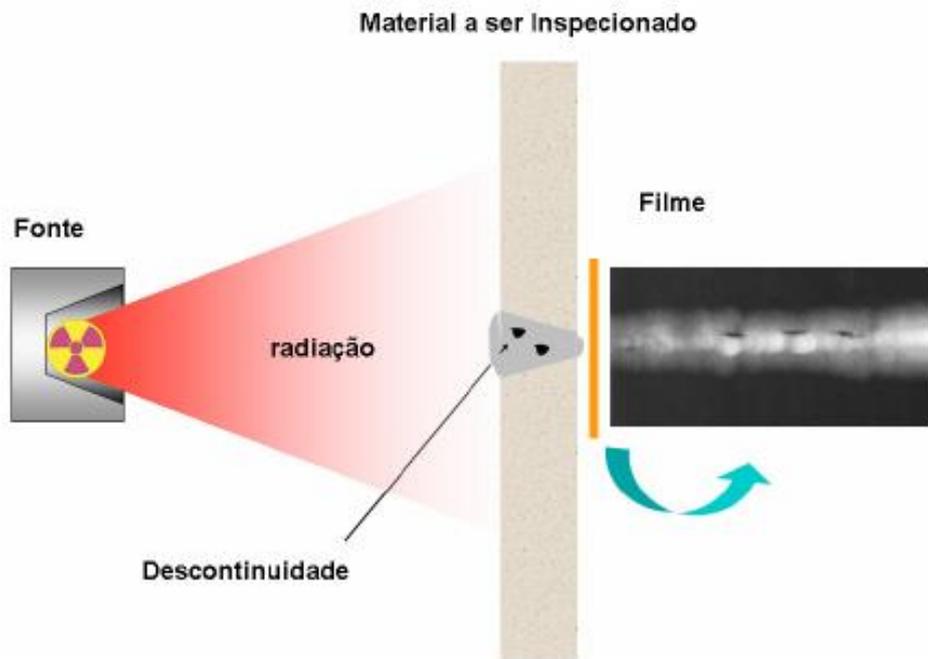


Figura 28 - Técnica geral de ensaio radiográfico na indústria
[ANDREUCCI, 2014].

2.7.1. Princípios Físicos

O ensaio radiográfico emprega radiação de alta energia (baixo comprimento de onda), exemplos são o Raios-X e Gama. Este tipo de radiação pode atravessar diversos tipos de materiais, como corpos opacos, metais, dentre outros, sendo posteriormente registrado em forma de filme radiográfico ou digital.

É possível observar alguns dos princípios do ensaio radiográfico industrial na Tabela 2, desde a formação do feixe radioativo até a formação do filme radiográfico.

Tabela 2 - Princípios básicos do ensaio radiográfico [VIEIRA, 2013].

Princípios básicos do ensaio radiográfico	
Fontes de radiação (Raios-X e Gama)	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Muitos elementos exibem uma propriedade chamada radioatividade, esta característica é causada pela instabilidade da complexa estrutura destes elementos, sobre a ação de forças elétricas, magnéticas e gravitacionais. <input type="checkbox"/> Criando assim um feixe de radiação capaz de penetrar em vários tipos de materiais.
Absorção da radiação pela matéria	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Quando um feixe de radiação incide num material, parte é absorvida ou dispersada e uma parte é transmitida. <input type="checkbox"/> A radiação transmitida é a parte do feixe utilizada para detectar as descontinuidades.
Exposição do filme	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Como num filme fotográfico que é sensibilizado pela luz, o filme radiográfico será sensibilizado não somente pela luz, mas também pela radiação. <input type="checkbox"/> As áreas escuras observadas num filme radiográfico indicam que uma maior quantidade de radiação passou por aquela região correspondente na peça ensaiada.

O método é baseado na diferença de absorção da radiação (Raios-X ou Gama), frutos das descontinuidades presentes no interior da peça. O feixe de radiação é reduzido de acordo com sua espessura e densidade da peça, quanto maior e mais denso, maior é a redução (Figura 28). Desta forma existe uma diferenciação entre quantidade absorvida de radiação entre parte íntegra da peça e do local onde existe a descontinuidade, essa diferença de absorção produz, por consequência, uma diferenciação na imagem radiográfica resultante, onde a imagem apresentando tonalidade mais escura é devido à menor absorção de radiação pela peça, ou seja, uma maior quantidade de radiação atinge o filme, já a região mais clara da imagem ocorre o contrário, maior é a absorção de radiação pela peça e menor quantidade que atinge o filme neste local.

Na Figura 29b há uma ilustração de um filme radiológico após a peça estudada ser radiografada, onde pode ser verificada a diferença de espessura, assim como o defeito apresentado pela peça (a diferença de tonalidade indica diferentes níveis de exposições à radiação por parte do filme).

Apesar da simplicidade do princípio em que é baseada o ensaio radiográfico, muitas variáveis podem induzir erros ou dificuldades na interpretação dos operadores. Na realização do ensaio deve ser levado em consideração sempre a intensidade da radiação aplicada, o tipo de radiação que será utilizada (X ou Gama), distância entre a peça e a fonte de radiação, assim como a distância que a peça deve ter do filme radiográfico. Esses parâmetros são sempre dependentes da sua composição química, do tamanho da peça e de que tipo de defeitos podem estar presentes.

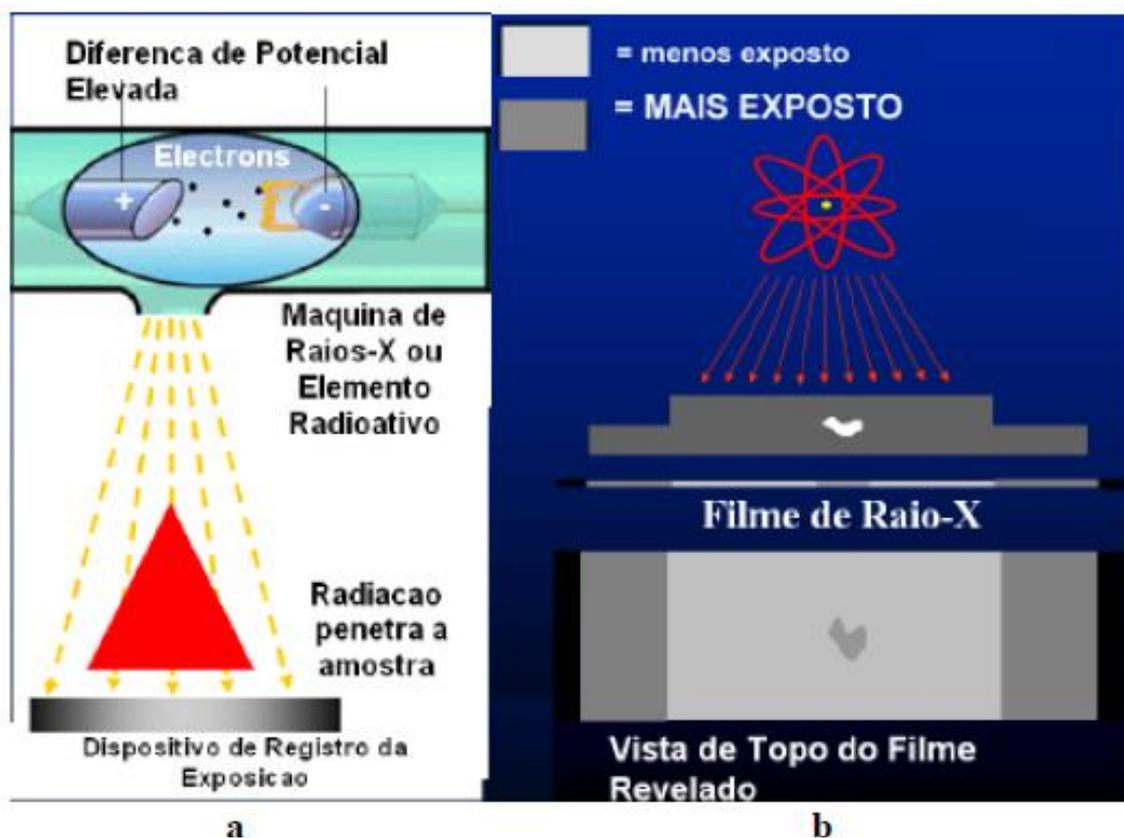


Figura 29 - Princípios do ensaio radiográfico. a) Radiação produzida por um gerador e b) formação da imagem radiográfica.

Para que seja obtido um resultado com boa nitidez e qualidade nos filmes radiográficos, o ensaio deve seguir as seguintes condições:

- Para se obter a penetração adequada do feixe, a fonte deve estar o mais distante possível da peça estudada.
- A fonte de radiação deve ser posicionada perpendicular à superfície do filme.
- O filme deve ficar posicionado o mais próximo possível da peça.
- A amostra deve se posicionada paralela ao filme.

Esta técnica pode ser realizada com diversos materiais distintos. Entretanto, existe a limitação proveniente da grande absorção que alguns materiais apresentam, tais como chumbo e urânio, que são materiais normalmente utilizados para blindagem da radiação, esse tipo de material pode inviabilizar este método.

O ensaio deve ser realizado em diferentes posições e ângulos para a mesma peça, pois não é possível realizar detecção de descontinuidades planas perpendiculares à incidência do feixe. O método radiográfico tem maior sensibilidade para descontinuidades volumétricas [VIEIRA, 2013, ANDREUCCI, 2014].

2.7.2. Radiação Eletromagnética

Os Raios-X e Gama são radiações eletromagnéticas, bem como a luz visível, as ondas de rádio e micro-ondas, porém, com frequências e comprimento de onda distintos (Figura 30). Essa radiação não possui massa ou carga, não é influenciada nem por campos magnéticos ou elétricos e se propaga em linha reta.

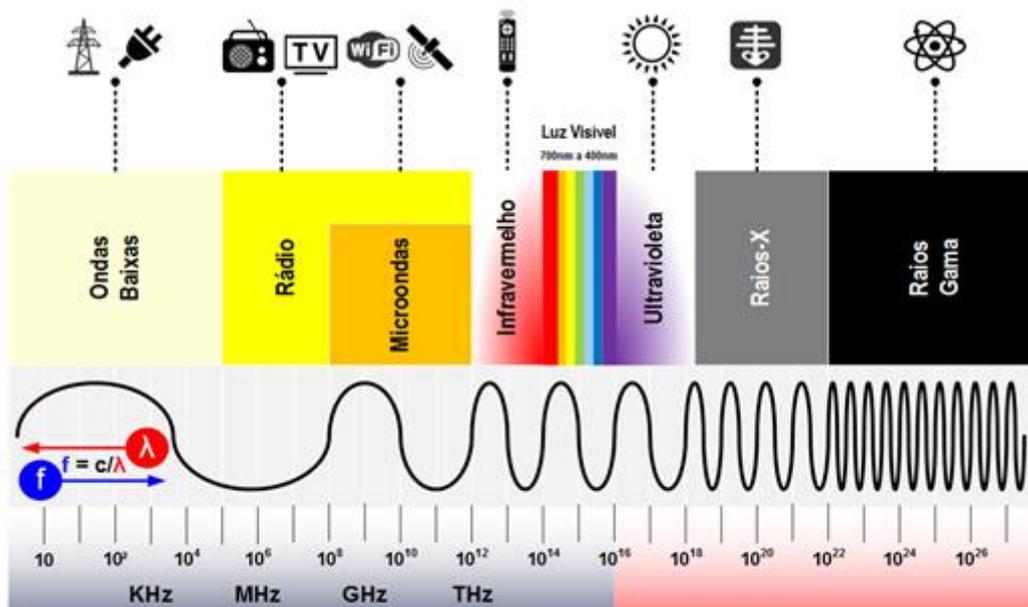


Figura 30 - Espectro eletromagnético [BRITO].

Logo, a radiação Gama e X tem uma faixa de frequência (f) característica, bem como comprimento de onda (λ) e velocidade (c).

$$f = \frac{c}{\lambda} \quad [1.4]$$

Em consequência de seu pequeno comprimento de onda, fora do espectro visível, essa radiação possui energia suficientemente grande para atravessar a matéria, onde esse nível de penetração é dependente da energia da radiação X ou Gama e das características da matéria, como sua densidade.

2.7.3. Fontes de Radiação

É normalmente utilizado dois distintos tipos de radiação eletromagnética na radiografia industrial, que têm capacidade de penetração diferentes, além de serem produzidas por dois tipos de fontes diferentes:

- A radiação Gama decorre de isótopos radioativos, onde normalmente tem uma maior capacidade de penetração em relação ao Raio-X devido ao seu tamanho de comprimento de onda inferior.
- Os Raios-X decorre de fontes eletricamente alimentadas, e normalmente tem menor capacidade de penetração em comparação com a radiação gama (maior comprimento de onda).

Obviamente a capacidade de penetração tem uma importância fundamental na radiografia digital, uma vez que para analisar o interior de alguma peça é necessário que a radiação penetre no objeto. A capacidade de penetração está ligada à quantidade de energia das radiações emitidas (maior energia corresponde a uma maior capacidade de penetração).

2.7.4. Raio Gama

Como mencionado anteriormente a radiação Gama é proveniente de isótopos radioativos produzidos em reatores nucleares, e graças a evolução desta tecnologia, foi possível o desenvolvimento para criação de isótopos radioativos provenientes de reações nucleares de ativação.

Os isótopos radioativos são criados por elementos naturais, colocados no núcleo do reator, que são submetidos a um bombardeamento de nêutrons. Quando

o núcleo dos átomos destes elementos é atingido pelos nêutrons, estes elementos ficam instáveis e mudam a sua massa atômica, e desta forma é criado os isótopos reativos. E no processo de recuperar sua estabilidade energética são liberadas partículas e energia em forma de radiação Gama. Assim são formadas fontes reativas, de forma que o isótopo radioativo é colocado em um recipiente de aço como mostrado na Figura 31. Pode-se observar, na figura da esquerda, a capsula de aço que contém o isótopo radioativo que emite a radiação gama. Já na Figura 31b mostra o direcionamento da radiação, uma vez que ela se espalha em todas as direções, então é necessária uma proteção de chumbo e colimadores que realizam esse direcionamento da radiação gama para a direção desejada. [VIEIRA, 2013; ANDREUCCI, 2014].

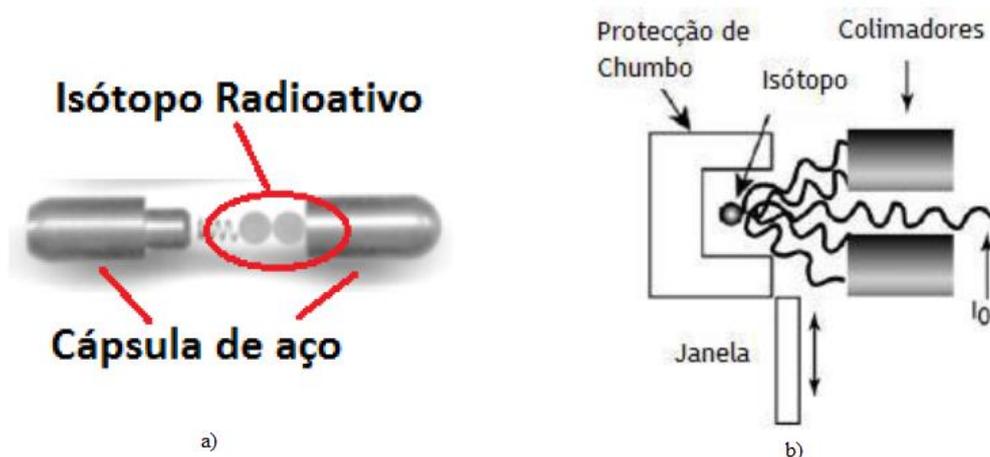


Figura 31 - a) Fonte de radiação; b) direcionamento da radiação emitida. [VIEIRA, 2013]

2.7.5. Raio-X

Os equipamentos Raios-X que são empregados na indústria são concebidos com tubos de Coolidge (também conhecido como ampola de Raios-X), sendo constituído de uma ampola sob vácuo, onde no seu interior existe dois elementos diferentes, um anodo e um catodo, como ilustrado na Figura 32.

O catodo é composto de um filamento de tungstênio, em que é aplicada uma corrente na casa dos miliamperes, que aquece pelo efeito joule e assim emite elétrons de maneira controlada. Estes elétrons são acelerados através do campo elétrico que existe entre o catodo e o anodo na casa dos kilovolts, desta forma é

fornecida uma energia cinética aos elétrons. Estes elétrons com energia cinética colidem com o anodo, geralmente constituído de tungstênio ou cobre, quando esta energia cinética é transferida para os átomos do tungstênio ou cobre, há uma interação de nível atômico, o que provoca a emissão de Raios-X em forma de espectro contínuo graças as diferentes interações que os elétrons experimentam no anodo, desta maneira são criados Raios-X com diferentes comprimentos de onda, já que interações atômicas são diferentes umas das outras, e depende da corrente aplicada [VIEIRA, 2013; ANDREUCCI, 2014].

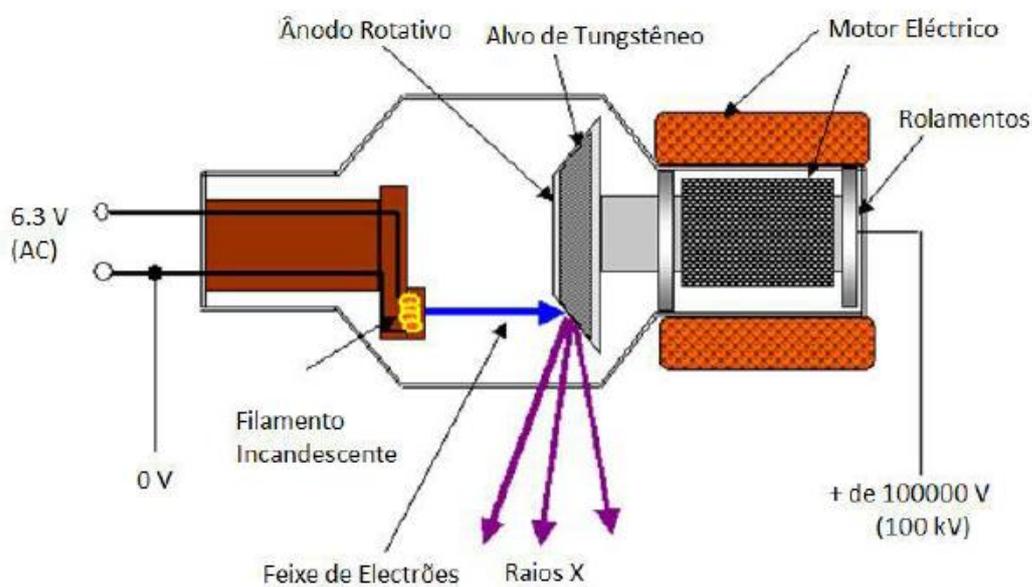


Figura 32 - Tubo de Raios-X com alvo rotativo, de forma a melhorar o arrefecimento do alvo [VIEIRA, 2013].

2.7.6. Classificação dos Filmes Industriais

A existência de diferentes condições e a heterogeneidade de materiais encontrados na radiografia industrial, fizeram os fabricantes produzirem distintas espécies de filmes radiográficos. Uma classificação dos filmes foi estabelecida pelo ASTM E-1815-96, que identifica os diferentes tipos de filmes pela velocidade de exposição e sua sensibilidade. A velocidade de exposição é função logarítmica da dose de radiação necessária para que o filme atinja densidade óptica de 2,0. A seguir está descrita de forma simplificada os tipos de filmes.

Tipos dos filmes:

- **Tipo 1** – Características: granulação ultrafina alto contraste e qualidade. Deve ser usado em ensaios de metais leves ou pesados, ou seções espessas, com radiação de alta energia. São marcas comerciais Tipo 1: Kodak M, Fuji 50, Agfa D4 ou D5.
- **Tipo 2** – Características: filme com granulação muito fina e com alta velocidade e alto contraste quando utilizado em conjunto com telas intensificadoras de chumbo. São marcas comerciais Tipo 2: Kodak AA400, Fuji 100, Agfa D7.
- **Tipo 3** – Características: Filme de granulação fina, com alto contraste e velocidade. É o filme mais utilizado na indústria em razão do atendimento em qualidade e maior produtividade.
- **Tipo 4** – Características: Filme de granulação média, pouco utilizado na indústria.

2.7.7. Análise por Radiografia

As radiações ionizantes utilizadas na indústria consistem em um fator de grande importância no aprimoramento do controle de qualidade em inúmeros processos e equipamentos industriais. Os END são comumente utilizados na inspeção de dutos em serviço, ou seja, geralmente estão sobre altas pressões e com fluxo constante de fluidos ou gases, o que pode causar uma erosão ou corrosão no interior do duto, assim como corrosão externa pode ocorrer devido a questões naturais. Esta mudança na espessura dos tubos devido a esse desgaste pode ser crítica ao funcionamento da linha, acarretando no aparecimento de trincas ou até o colapso.

Um obstáculo comum na inspeção de dutos é a remoção dos isolamentos, uma vez que para medição de perda de espessuras ou detecção de corrosão são utilizados normalmente métodos que dependem do contato direto com o duto, como no caso de medição de espessura por US.

No processo de radiografia convencional, é determinada espessura dos dutos através da avaliação visual das imagens radiográficas realizadas por um inspetor. Já que os valores resultantes são dependentes do fator humano, as estimativas têm uma incerteza considerável, o que não é aceitável. Foi criada uma técnica que se baseia em algoritmos que utilizam a radiografia digital para diminuir estas incertezas, com uma calibração adequada e um software que permite tratar as imagens adquiridas (Figura 33).

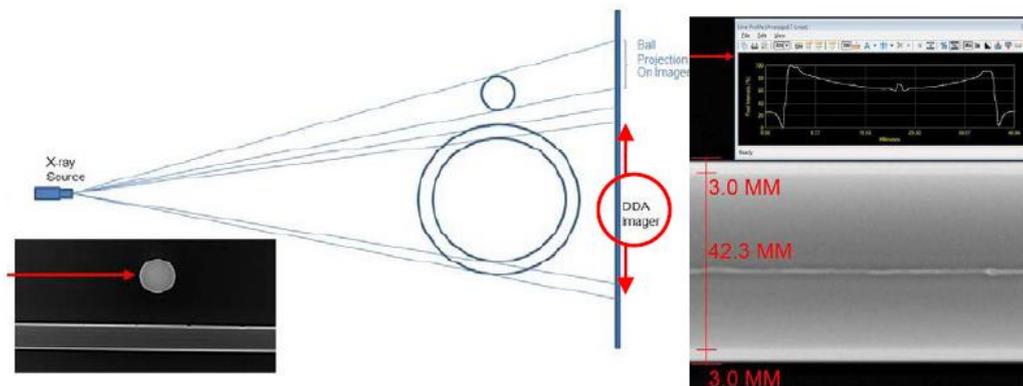


Figura 33 - À esquerda encontra-se o fator de ampliação. À direita a medição automática das espessuras reais do duto através da análise das tonalidades do cinza [Picl e coautores].

O exemplo demonstrado na Figura 33 expõe claramente como é realizada uma avaliação pelo método de RD, onde a análise se dá pelas diferentes tonalidades da radiografia, isto é, a tonalidade indica se há maior ou menor quantidade de material naquela região.

2.8. Radiografia Digital

Os métodos para obtenção de imagens através da radiação sem uso do filme fotográfico estão disponíveis a muitos anos, um exemplo disso é a radioscopia com câmera de vídeo analógica em tempo real, que sofreu uma evolução para o CCD, tubos de raios-X microfocus, e por fim, a digitalização da imagem analógica.

Quando se fala da qualidade da imagem digital, se refere à resolução da imagem. A resolução é definida como sendo a menor separação (distância) entre dois pontos da imagem que podem ser diferenciadas ou visualizadas. O olho

humano é o observador final de uma imagem, desta forma, a resolução seria “o que o olho consegue ver”. Para se ter uma ideia, o olho humano consegue diferenciar 30 tons diferentes de cinza. Porém quando se trata de cores, o olho humano pode distinguir milhões de cores. A imagem digitalizada é formada por “pixels”, ou seja, uma partícula quadrada, que quando agrupadas formam a imagem digital. Cada “pixel” possui uma única tonalidade de cor e possui a mesma medida horizontal e vertical.

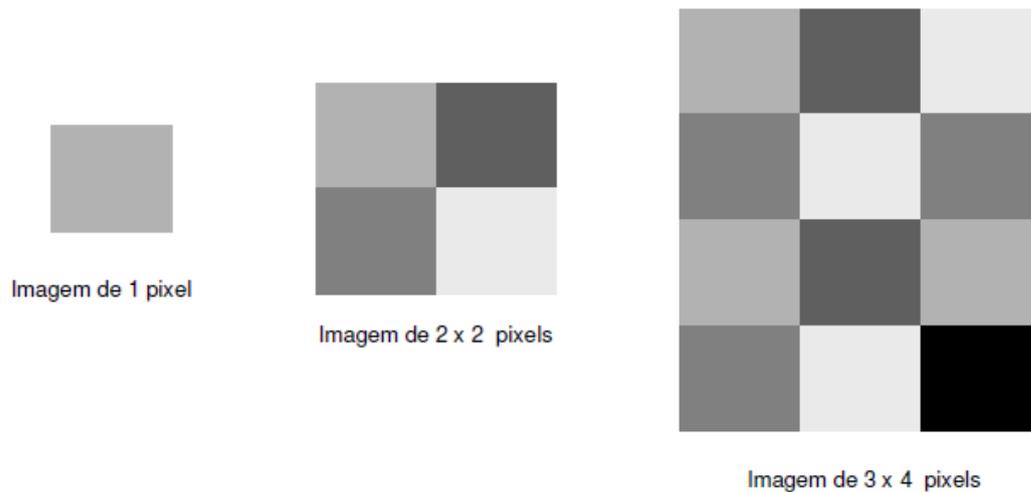


Figura 34 - Imagens “pixeladas” [ANDREUCCI, 2014].

O número de “pixels” lineares existentes em uma medida padrão, tal como milímetro (p.p.m.) defini a resolução, e é a única para toda a imagem. Na Figura 35, pode ser visto um exemplo de resolução 6 p.p.m., que significa que existem 6 pixels em cada medida linear de 1 mm.

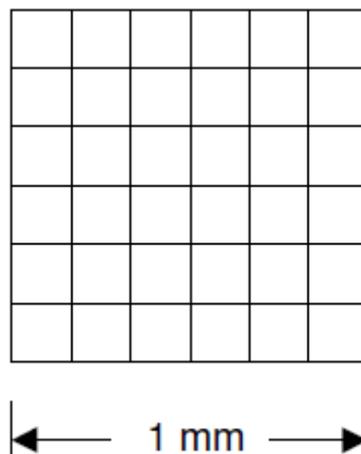
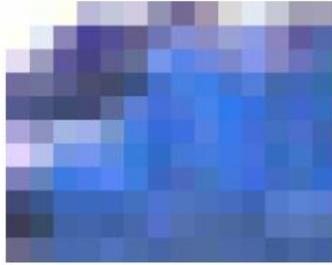


Figura 35 - Imagem com resolução de 6 p.p.m. [ANDREUCCI, 2014]

Quando há ampliação da imagem, sempre existe a perda da qualidade e da resolução de uma imagem digitalizada, a menos que se aumente a quantidade de pixels na mesma proporção de ampliação.



Digitalização de uma imagem com resolução de: 14 pixels x 11 pixels

Tamanho da Imagem: 1 kbyte



Digitalização da mesma imagem com resolução de: 84 pixels x 63 pixels

Tamanho da Imagem: 16 kbytes



Digitalização da mesma imagem com resolução de: 640 pixels x 480 pixels

Tamanho da Imagem: 900 kbytes

Figura 36 - Exemplo de graus de resolução diferentes para uma mesma imagem [ANDREUCCI, 2014].

Assim, para fazer uma avaliação da capacidade de resolução de diferentes sistemas de imagem a quantidade de pixels é um dos fatores determinantes. Na radiografia digital industrial valores como 2500 x 3000 pixels são comuns para uma boa qualidade de imagem. O contraste é outro fator que mede a qualidade entre dois pontos adjacentes como uma função da sua distância de separação. Isto é chamado de “Função Modulação de Transferência – MTS” que assume valores entre 0 e 1 dependendo do sistema digital usado. Quanto maior é o valor associado ao MTS, mais facilmente uma descontinuidade é visualizada.

Os parâmetros de maior importância para comparação entre o filme convencional e a radiografia digital são a resolução espacial, sensibilidade do

contraste. Os grandes méritos da radiografia digital quando comparada com a técnica convencional são:

- Exposições radiográficas mais rápidas;
- Processamento rápido, eliminando a câmara escura;
- Inexistência de químicos, eliminando problemas ambientais;
- Não há consumíveis, portanto, redução de custos;
- Oferece uma ampla faixa dinâmica de exposição/latitude, reduzindo repetições.

2.8.1. Formação da Imagem Digital

Na radiografia convencional, o olho humano é usado para analisar a imagem radiográfica no filme, onde é registrada a intensidade de radiação incidente se pode observar pelos diferentes tons de cinza no filme. Na imagem digital, a intensidade de radiação é primeiramente medida ponto a ponto pelo sistema de captura, e depois digitalizada e convertida em milhares de tons de cinza. Este processo de registro é conhecido como mapeamento. Finalmente esses milhares pixels em tons de cinza e suas coordenadas são mostradas na forma de uma imagem coerente na tela do monitor, ou impressa para exame pela visão humana.

Após o mapeamento pronto e salvo, podem ser aplicados diferentes filtros com o objetivo de detalhar ou mostrar faixas diferentes de espessuras sem alterar a imagem original. As extensões dos arquivos salvos são excluídas do programa de digitalização, não sendo possível a alteração por qualquer meio digital, com o objetivo de fraudar ou modificar a imagem original.

2.8.2. Processos de Digitalização da Imagem Radiográfica

Os processos de digitalização da imagem radiográfica estão demonstrados na Figura 37.

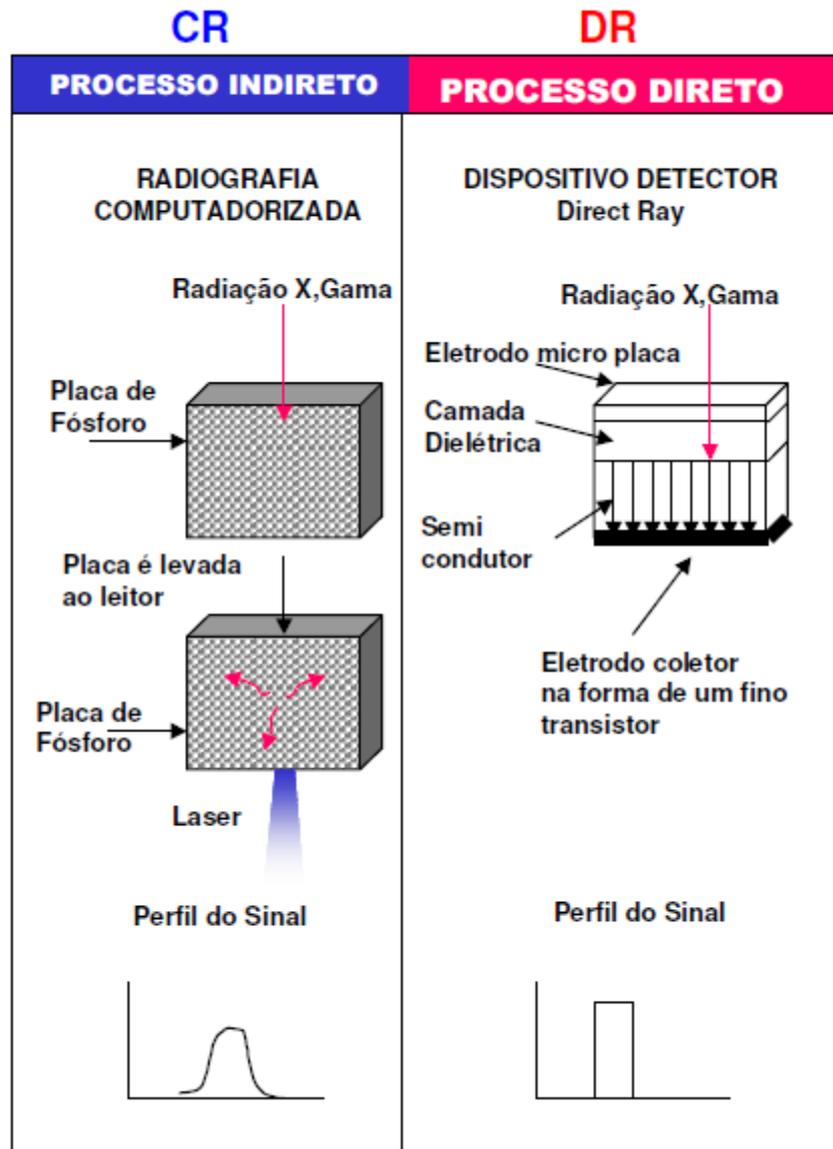


Figura 37 - Processos de digitalização de imagens da radiografia digital [ANDREUCCI, 2014].

2.8.2.1. Radiografia Computadorizada – CR

O método de Radiografia Computadorizada (CR), utiliza uma tela flexível contendo cristais de fósforo fotoestimulado. Os grãos de fósforo são cobertos por um substrato flexível e armazenam a energia da radiação incidente. Após a exposição radiográfica da placa, esta deve passar por um scanner CR. Os elétrons do fósforo que compõe a placa, são excitados por um feixe de laser, provenientes do scanner, que emitem uma luz proveniente dos pequenos elementos "pixels" da

placa. A luz emitida produzida é detectada eletronicamente pelo scanner por uma fotomultiplicadora, digitalizada e armazenada na memória do computador na forma de um sinal digital, ou mostrada no monitor do computador [ANDREUCCI, 2014].



Figura 38 - Estrutura da placa de imagem CR e Scanner portátil [ANDREUCCI,2014].

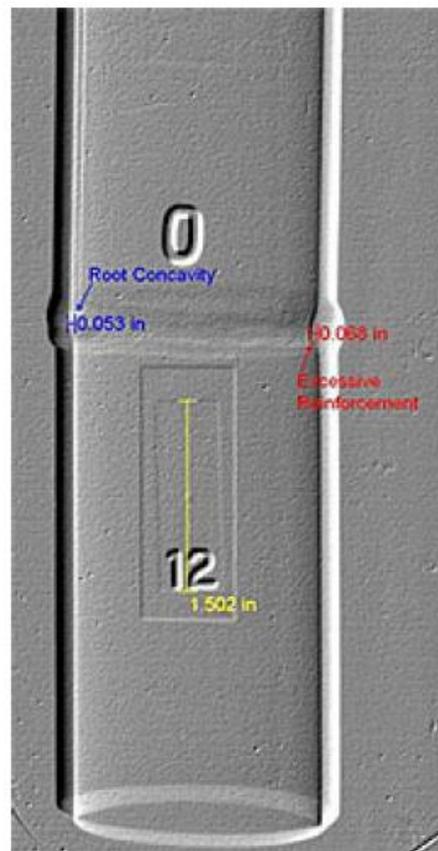


Figura 39 - Imagem de radiografia digital (CR) de uma solda de um tubo [ANDREUCCI, 2014].

As placas CR, compreendendo a estrutura mostrada na Figura 38, podem ser usadas em temperaturas de -5°C a 30°C .

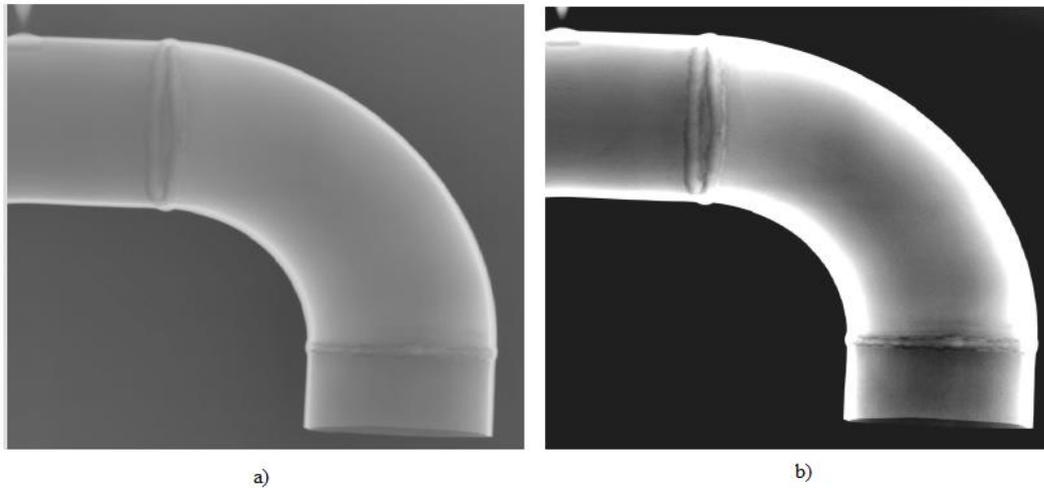


Figura 40 - a) Radiografia original digitalizada e b) Radiografia processada digitalmente [ANDREUCCI, 2014].

2.8.2.2. Processo Direto – DR

No processo direto, a energia da radiação é transformada diretamente em sinal elétrico pelo detector o que previne perdas e melhora a eficiência do sistema.

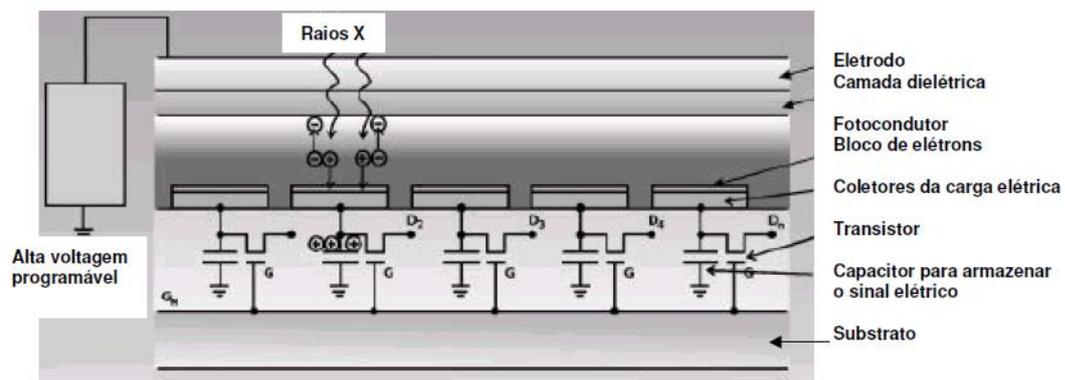


Figura 41 - Esquema do detector para captura da imagem digital no sistema direto [ANDREUCCI, 2014].

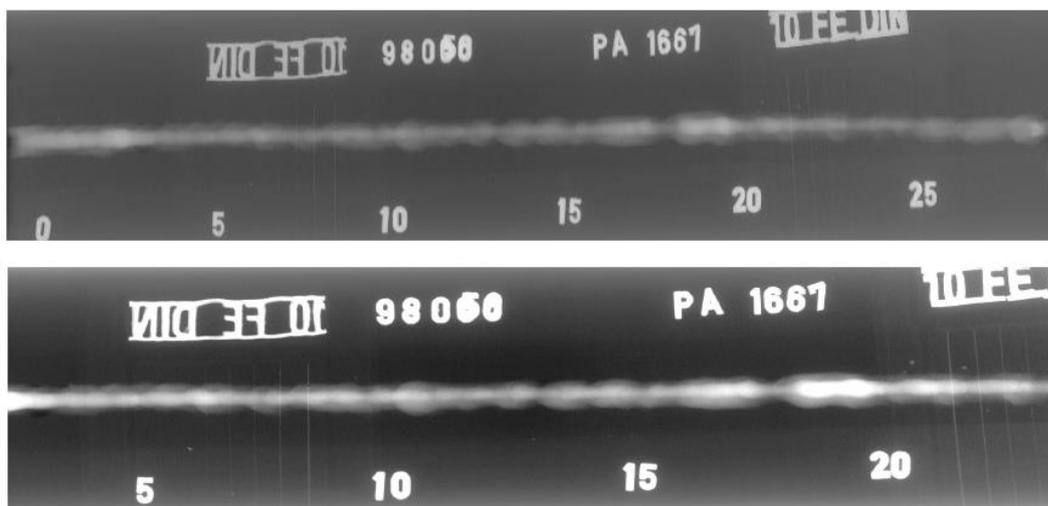


Figura 42 - Diferença entre a imagem original (foto superior) não processada digitalmente e a processada pelo sistema digital (foto inferior) [ANDREUCCI, 2014].

Principais vantagens da Radiografia Digital:

- As placas de captura da imagem digital possibilitam a utilização em variadas condições de exposição, permitindo reutilização imediata caso aconteçam erros na exposição, evitando deste modo perdas de material e tempo de ensaio;
- A grande latitude de exposição das placas de captura digital possibilita a visualização da imagem radiográfica com somente uma pequena exposição à radiação o que permite a melhora da proteção radiológica, otimizando a segurança;
- As placas de captura uma durabilidade elevada e boa proteção mecânica, podendo atuar em temperaturas de 10°C a 35°C, pesando 8kg.
- Os programas de computador para análise da imagem digital são versáteis, viabilizando ampliações localizadas da imagem, proporcionando maior segurança do laudo radiográfico.

2.8.3. Técnicas de Exposição Radiográfica

Os posicionamentos e arranjos geométricos entre a fonte de radiação, a peça e o filme devem seguir algumas técnicas especiais de forma que possibilitem uma imagem radiográfica de fácil interpretação e localização das discontinuidades. As técnicas apresentadas a seguir são largamente utilizadas e recomendadas por normas e especificações nacionais e internacionais.

2.8.3.1. Técnicas de Parede Simples

A técnica de parede simples (PSVS) é conhecida desta forma pois no arranjo entre a fonte de radiação, peça e filme, somente a seção da peça que está próxima ao filme será inspecionada e a projeção será em apenas uma espessura do material. É a técnica mais utilizada na inspeção radiográfica, e a de maior facilidade de interpretação.

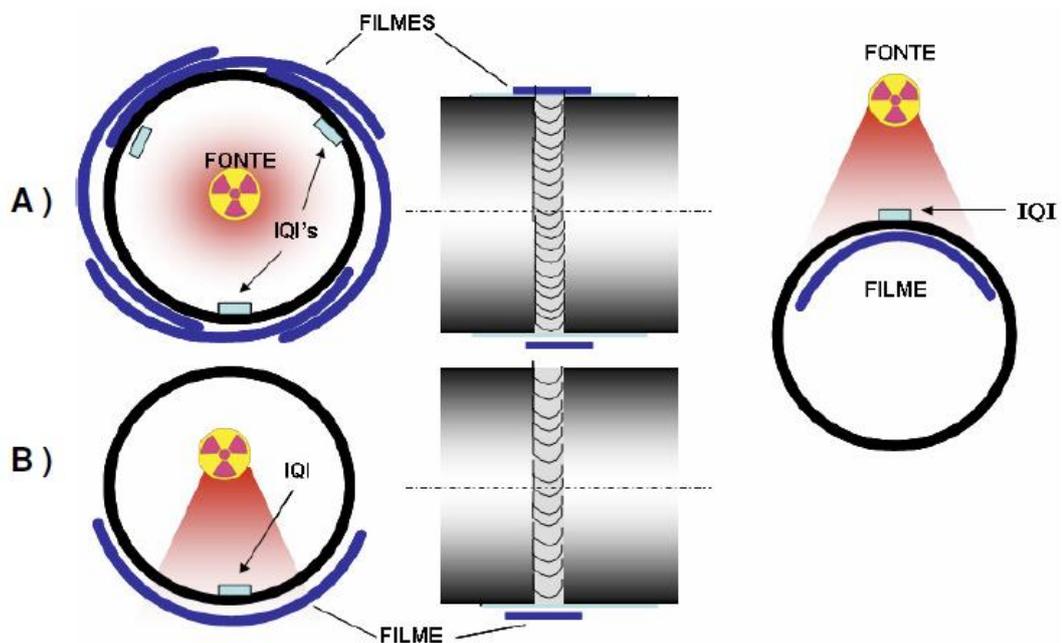


Figura 43 - Técnica de exposição de parede simples - vista simples

[ANDREUCCI, 2014].

2.8.3.2. Exposição Panorâmica

Esta técnica provém de um caso particular da técnica PSVS, descrita acima, mas que proporciona alta produtividade em rapidez em uma inspeção de juntas soldadas circulares com acesso interno.

Na técnica panorâmica a fonte de radiação deve estar centralizada no ponto geométrico equidistante das peças e dos filmes. No caso das juntas soldadas circulares a fonte deve ser posicionada no centro da circunferência. Desta forma com uma única exposição de radiação todos os filmes serão igualmente irradiados, permitindo desta forma a inspeção completa das peças ou das juntas.

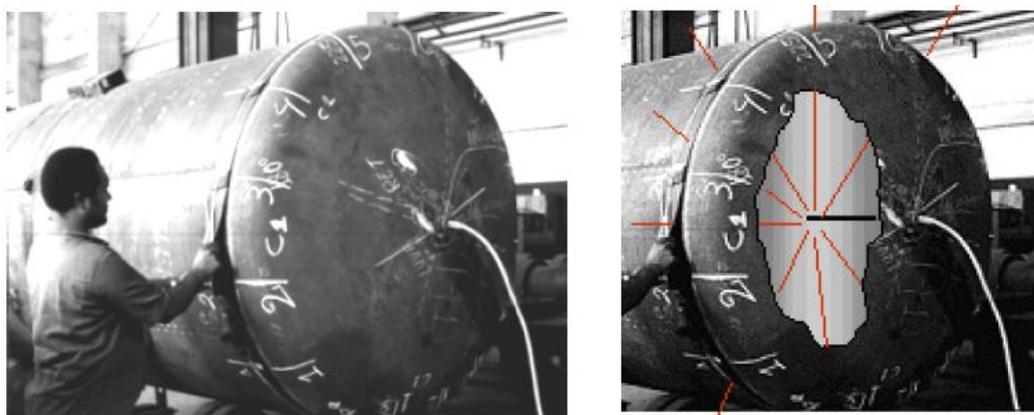


Figura 44 - Técnica Radiográfica Panorâmica em uma solda
[ANDREUCCI, 2014].

2.8.3.3. Técnica de Parede Dupla

- **Técnica de parede dupla vista simples (PDVS):**

Nesta técnica o feixe de radiação vindo da fonte atravessa duas espessuras da peça, porém, projeta no filme somente a seção da peça que está mais próxima à fonte.

Esta técnica é frequentemente utilizada em inspeção de juntas soldadas em que não há acesso interno, por exemplo, tubulações com diâmetro maiores que 3,5 polegadas e vasos fechados.

É de fundamental importância lembrar que para a utilização desta técnica é necessário que o feixe atravesse duas espessuras da peça e sendo assim, o tempo de

exposição será maior que a inspeção pela técnica PSVS. Desta forma, esta opção deve ser adotada quando a outra técnica não for possível ou permitida.

- **Técnica de parede dupla vista dupla (PDVD):**

Assim como na técnica PDVS, o feixe de radiação deve atravessar duas espessuras, porém, será projetado no filme a imagem de duas seções da peça. Neste caso para o cálculo do tempo de exposição deve ser levado em consideração as duas espessuras das paredes que serão atravessadas pela radiação.

É uma técnica de frequente utilização para inspeção de juntas soldadas em tubulações com diâmetros menores que 3,5 polegadas.

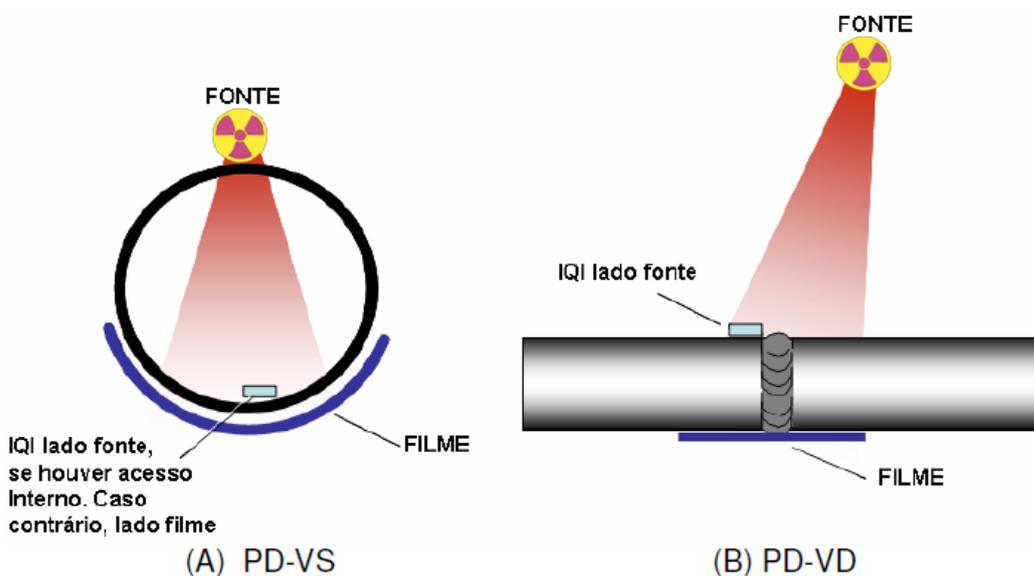


Figura 45 - Técnica de exposição parede dupla e vista simples (A) e parede dupla e vista dupla (B) [ANDREUCCI, 2014].

Formula para cálculo da técnica PDVD (Figura 46):

$$d_2 = 105/\sqrt{D^2 + 2,25} \text{ cm} \quad [2.8]$$

$$d_1 = (D \cdot d_2)/1,5 \text{ cm} \quad [2.9]$$

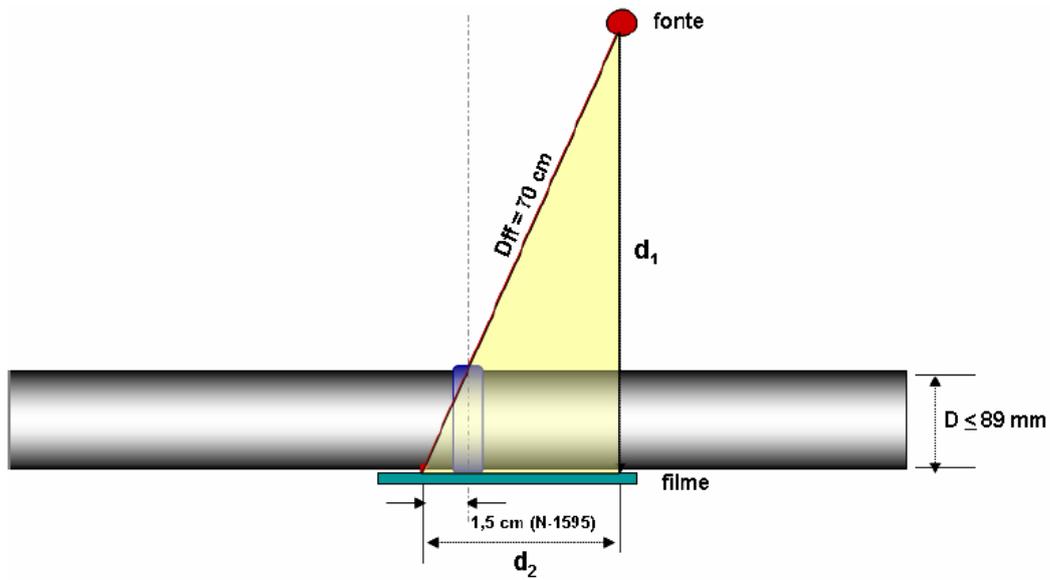


Figura 46 - Técnica de parede dupla vista dupla [ANDREUCCI, 2014].

Diâmetro Externo do Equipamento ou Tubo	Quantidade de Filmes
a) acima de 89 mm (3,500") até 219 mm (8,625")	a) 4 filmes com exposições separadas de 90°, dimensões 216 mm (máximo) x 89 mm (8 1/2" x 3 1/2") ou 216 mm (máximo) x 114 mm (8 1/2" x 4 1/2"), com a fonte locada externamente e o filme internamente ao equipamento ou tubo; 3 filmes ou 4 filmes com exposições separadas de 120° ou 90°, respectivamente, dimensão 216 mm x 89 mm (8 1/2" x 3 1/2") ou 216 mm x 114 mm (8 1/2" x 4 1/2"), com a fonte e filme locados externamente ao equipamento ou tubo.
b) de 219 mm (8,625") até 457mm (18")	b) 4 filmes com exposições separadas de 90°, dimensões 432 x 89 mm (17" x 3 1/2") ou 432 mm x 114 mm (17" x 4 1/2").
c) de 457 mm (18") até 610 mm (24")	c) 5 filmes com exposições igualmente separadas, dimensão 432 mm x 89 mm (17" x 3 1/2") ou 114 mm (17" x 4 1/2").
d) de 610 mm (24") até 737 mm (29")	d) 6 filmes com exposições igualmente separadas, dimensão 432 mm x 89 mm (17" x 3 1/2") ou 432 mm x 114 mm (17" x 4 1/2").
e) de 737 mm (29") até 864 mm (34")	e) 7 filmes com exposições igualmente separadas, dimensão 432 mm x 89 mm (17" x 3 1/2") ou 432 mm x 114 mm (17" x 4 1/2").
f) de 864 mm (34") até 991 mm (39")	f) 8 filmes com exposições igualmente separadas, dimensão 432 mm x 89 mm (17" x 3 1/2") ou 432 mm x 114 mm (17" x 4 1/2").
g) de 991 mm (39") até 1 118 mm (44")	g) 9 filmes com exposições igualmente separadas, dimensão 432 mm x 89 mm (17" x 3 1/2") ou 432 mm x 114 mm (17" x 4 1/2").
h) de 1 118 mm (44") até 1 245 mm (49")	h) 10 filmes com exposições igualmente separadas, dimensão 432 mm x 89 mm (17" x 3 1/2") ou 432 mm x 114 mm (17" x 4 1/2").
i) de 1 245 mm (49") até 1 346 mm (53")	i) 11 filmes com exposições igualmente separadas, dimensão 432 mm x 89 mm (17" x 3 1/2") ou 432 mm x 114 mm (17" x 4 1/2").
j) de 1 346 mm (53") até 1 473 mm (58")	j) 12 filmes com exposições igualmente separadas, dimensão 432 mm x 89 mm (17" x 3 1/2") ou 432 mm x 114 mm (17" x 4 1/2").
k) de 1 473 mm (58") até 1600 mm (63")	k) 13 filmes com exposições igualmente separadas, dimensão 432 mm x 89 mm (17" x 3 1/2") ou 432 mm x 114 mm (17" x 4 1/2").
l) maior que 1600 mm (63")	l) Quantos filmes forem necessários com exposições igualmente separadas, dimensão 432 mm x 89 mm (17" x 3 1/2") ou 432 mm x 114 mm (17" x 4 1/2").

Figura 47 - Quantidades de filmes por junta circunferencial totalmente radiografada (100%) em vista simples [NORMA PETROBRAS N-1595d, 2004].

2.8.4. Interpretação de Resultados

2.8.4.1. Aparência das Descontinuidades

As descontinuidades são qualquer inconstância na homogeneidade de uma peça ou material. Pela análise de influência que a descontinuidade fará sobre a utilização do equipamento, é possível definir critérios de aceitabilidade. Os defeitos podem ser atribuídos a diferentes causas, podendo ocorrer durante o processo de

fabricação do material ou durante o uso do equipamento. As discontinuidades mais comuns são:

- **Rupturas**

São discontinuidades típicas de processamento, ocorrendo tanto em materiais ferrosos como em materiais não ferrosos. Consistem em cavidades pequenas e irregulares, superficiais e geralmente paralelas aos grãos. Ocorre durante processos de forjamento, extrusão ou laminação, causados pelas temperaturas muito baixas, material excessivamente trabalhado ou por movimentação do material durante o procedimento.

O ensaio radiográfico não é muito utilizado para detecção desse tipo de discontinuidade.

- **Trincas de Filete**

Ocorrem pela utilização do equipamento, são trincas superficiais que são encontradas na junção dos filetes, e que se propagam para o interior da peça.

As trincas de filete ocorrem quando há uma abrupta mudança de diâmetros, como na região entre a cabeça de um parafuso e sua haste, onde há grande acúmulo de tensões. Normalmente não são detectadas pelo ensaio radiográfico.

- **Trincas de Esmerilhamento**

Acontecem durante o processamento das peças, em materiais ferrosos e não ferrosos. Descontinuidades de pouca profundidade e muito finas, semelhante às causadas por tratamento térmico. Geralmente ocorrem em grupos e com ângulos retos com a direção da usinagem. Encontradas em materiais que sofreram tratamento térmico, endurecimento superficial e de materiais cerâmicos que sofrem usinagem.

- **Trincas de Tratamento Térmico**

São falhas de processamento que ocorrem em materiais ferrosos e não ferrosos, fundidos e forjados. Defeitos superficiais, geralmente de grande profundidade e em forma de forquilha. Aparecem em regiões com abrupta mudança de espessura ou áreas onde outras descontinuidades estejam expostas à superfície do material.

Os ensaios mais indicados para esse tipo de descontinuidade são o líquido penetrante e partículas magnéticas. A radiografia geralmente não é utilizada para detecção de falhas superficiais.

2.8.4.2. Descontinuidades internas em juntas soldadas

- **Inclusões gasosas (Poros)**

Ocorrem durante a fusão da solda, devido a várias razões, como o tipo de eletrodo utilizado, má regulagem do arco de solda, deficiência na técnica do operador, umidade e etc. Podem ter a forma esférica ou cilíndrica.

Sua aparência na radiografia é de pontos escuros com o contorno nítido. Algumas inclusões gasosas adotam uma forma alongada, cilíndrica e sua aparência vai depender da sua orientação em relação ao feixe incidente.

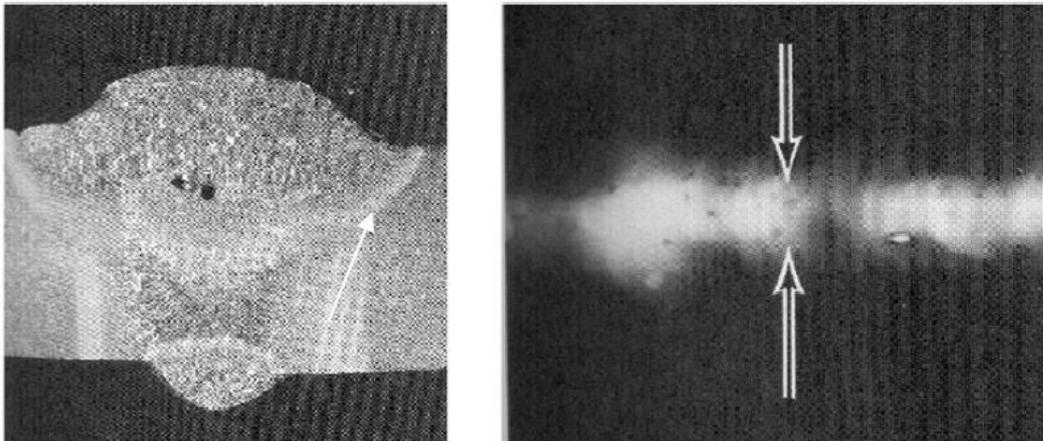


Figura 48 - Solda com porosidade [ANDREUCCI, 2014].

- **Inclusão de Escória**

Acontecem pelo aprisionamento de escória ou materiais estranhos durante o procedimento de soldagem. Estão presentes com maior regularidade em soldas de passes múltiplos, principalmente quando não é realizada a limpeza adequada entre um passe e outro.

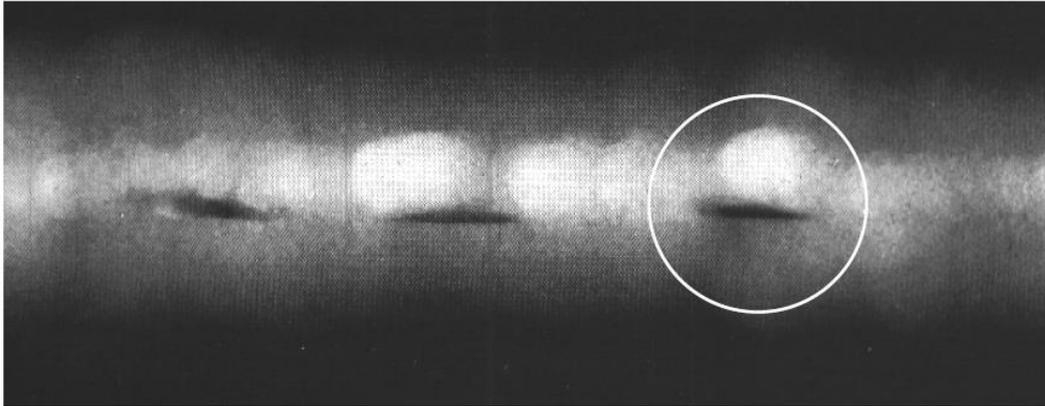


Figura 49 - Aparência radiográfica de soldas contendo inclusões de escória [ANDREUCCI, 2014].

- **Falta de Penetração**

É considerada falta de penetração quando existe a falta de material depositado na raiz da solda, devido ao fato do material não ter chegado até a raiz. No caso de não ser aplicado o passe de raiz (selagem) a falta de penetração pode ficar aparente. Na imagem radiográfica é apresentada como uma linha escura, intermitente ou continua no centro do cordão.

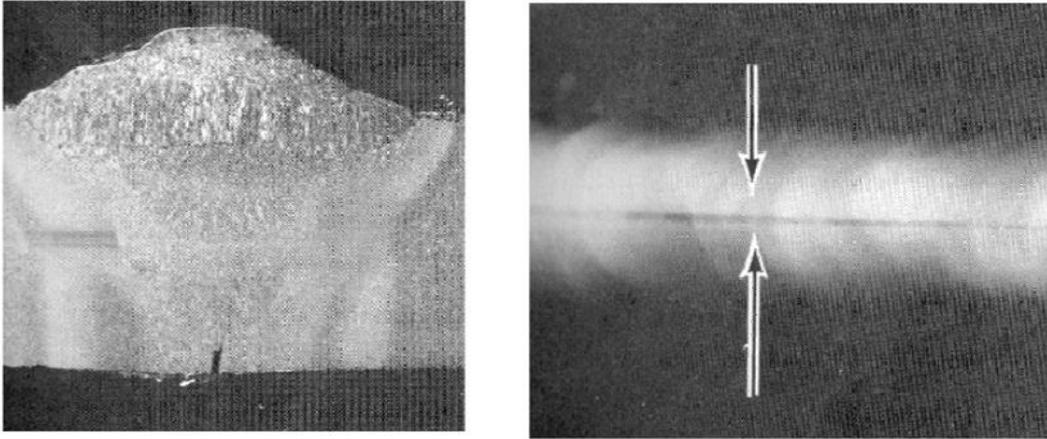


Figura 50 - Solda com falta de penetração na raiz [ANDREUCCI, 2014].

- **Trinca**

São descontinuidades produzidas pela ruptura no metal. É mais visível na radiografia quando o feixe de radiação incide sobre a peça numa direção paralela ao plano que contem a trinca.

A trinca é apresentada na imagem radiográfica como uma linha escura com direção irregular. Se a direção do plano que contem a trinca corresponde ao do feixe radioativo, sua imagem será bem escura, caso contrário, ela perde densidade e pode não aparecer.

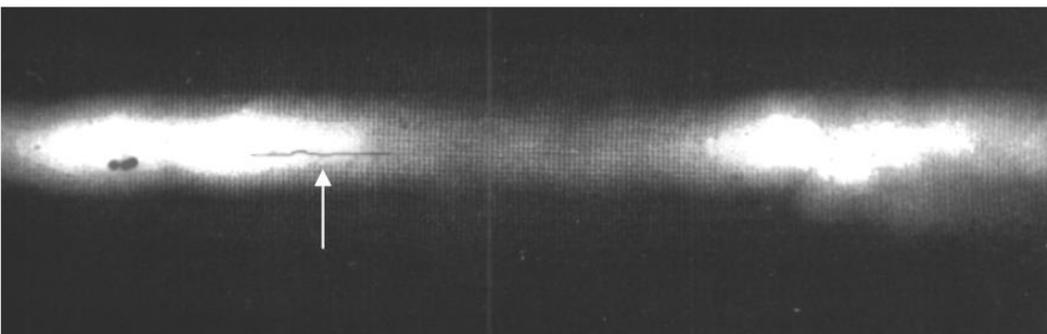


Figura 51 - Seção de uma solda contendo poro e uma trinca longitudinal no cordão [ANDREUCCI, 2014].

- **Falta de Fusão**

Descontinuidades em duas dimensões devido a uma falta de fusão entre o metal base e o metal depositado. Só é bem caracterizada pela radiografia quando a direção do feixe coincide com o plano da falha. Na radiografia é apresentada por uma linha escura e estreita paralela ao eixo da solda.

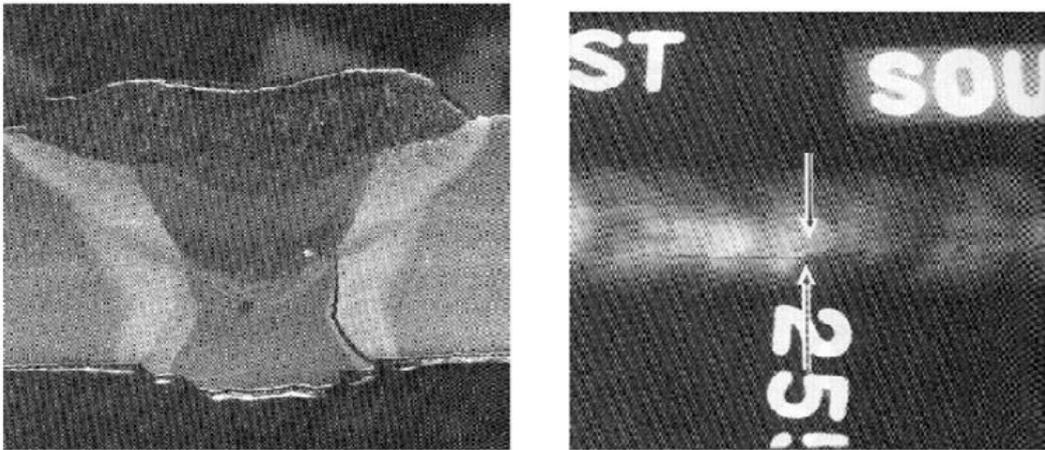


Figura 52 - Seção de uma solda contendo uma falta de fusão junto ao chanfro [ANDREUCCI, 2014].

2.8.4.3. Descontinuidades Internas em Fundidos

- **Inclusão de Areia**

São óxidos não metálicos e são visualizados na radiografia na forma irregular, mais escuras. São provenientes de partes desintegradas do molde.

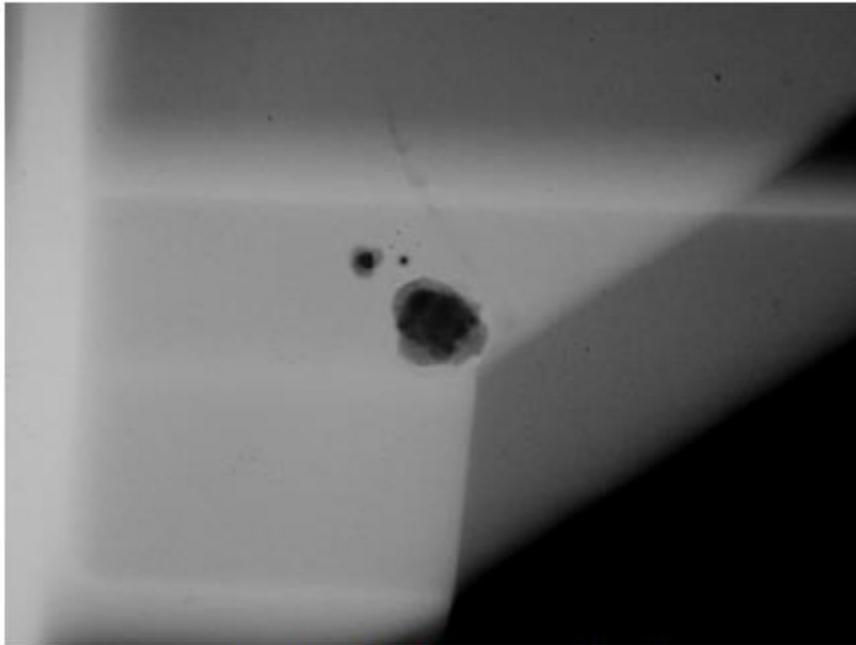


Figura 53 - Inclusão de Areia [ANDREUCCI, 2014].

- **Porosidade**

Causada pelo acúmulo de gases ou ar que foram aprisionados dentro do material. Geralmente são cavidades arredondadas ou esféricas, alongadas ou com a forma planar.

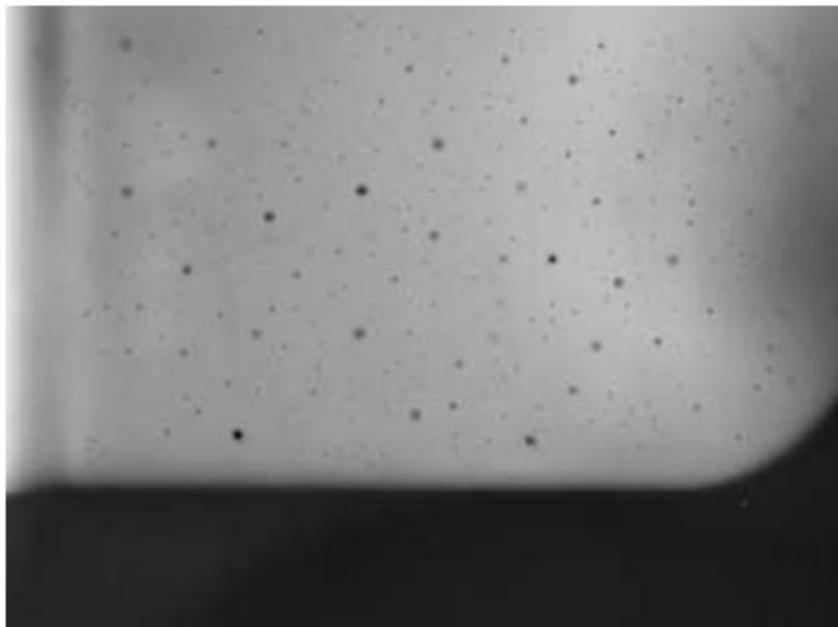


Figura 54 - Porosidade [ANDREUCCI, 2014].

- **Trincas**

Aparecem na radiografia como linhas finas, retas ou sinuosas, que ocorrem após o metal ter sido solidificado. Geralmente aparecem de forma isolada e são originizadas na superfície do fundido.

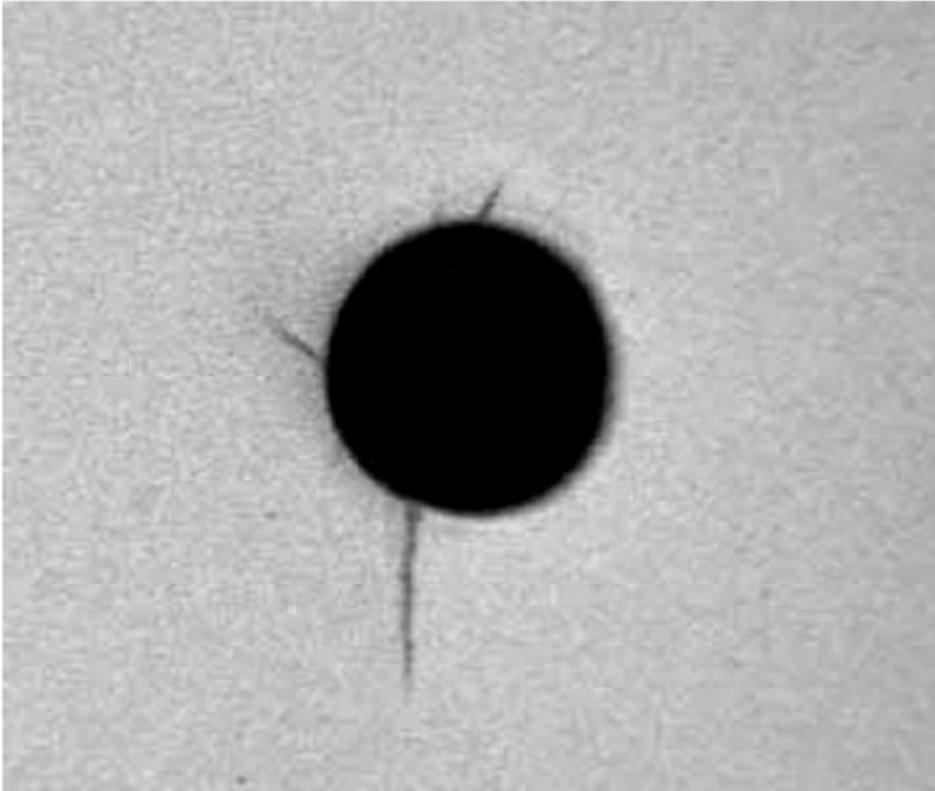


Figura 55 - Trincas [ANDREUCCI, 2014].

- **Inclusões**

São materiais não metálicos contidos no interior do metal. Elas podem ser mais ou menos densas que o próprio metal e assim, podem aparecer na imagem radiográfica em uma coloração mais escura ou clara em relação ao metal fundido.

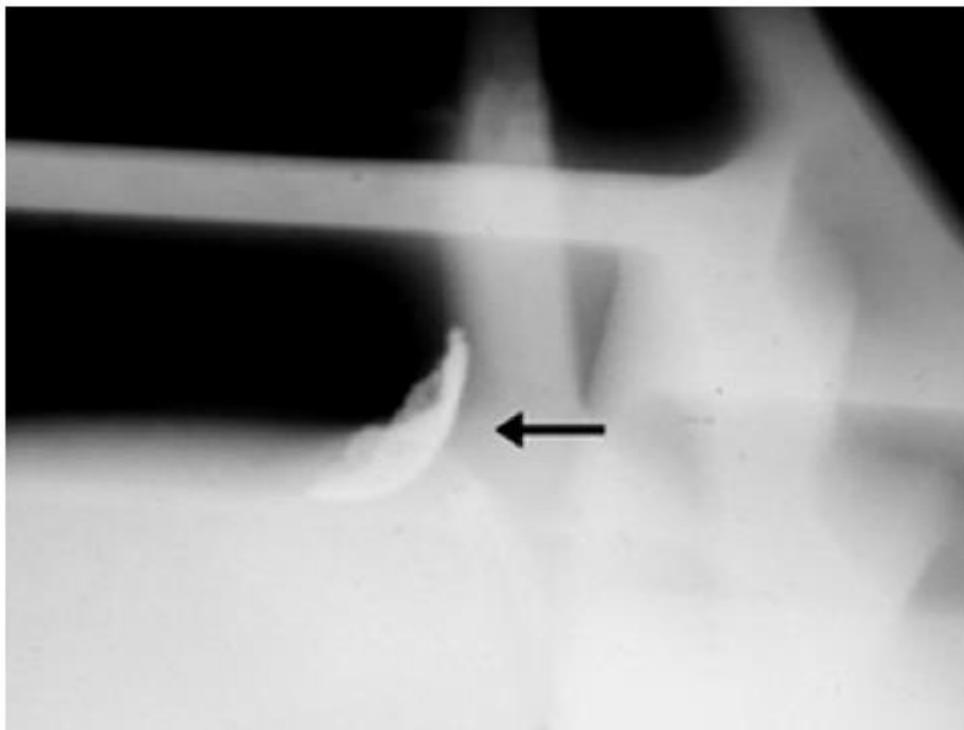


Figura 56 - Inclusão [ANDREUCCI, 2014].

3. Procedimento Experimental

3.1. Material

O material selecionado para esta pesquisa foi o aço estrutural 42CrMo4, de acordo com a norma DIN, adotado na fabricação de eixos virabrequim de motores Diesel e/ou gás para plantas termoeletricas (Figura 57) e oriundo de um eixo que falhou em serviço por fadiga. Na Figura 58, observa-se uma trinca de fadiga nucleada e propagada durante a vida em serviço do eixo que falhou.



Figura 57 - Eixo virabrequim de termoeletrica.



Figura 58 - Trinca aparente em uma das seções do eixo.

3.2. Corpos de Prova

Corpos de prova circulares de diâmetro 12,5 mm (Figura 59) foram retirados com seus eixos longitudinais coincidentes com aquele do eixo virabrequim. Inicialmente, um entalhe superficial reto, com profundidade de 0,5 mm, foi usinado, com o auxílio de uma fresa, em uma das faces do comprimento útil do corpo de prova, com o objetivo de torná-lo o local de nucleação e propagação de trincas de fadiga (vide item 3.3). Entretanto, nos ensaios preliminares para se saber um número médio de ciclos para fratura, corpos de prova foram ensaiados até 10^7 ciclos sem apresentarem qualquer indicio de falha.

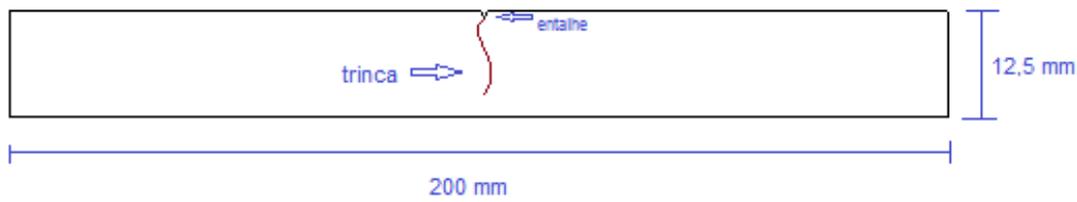


Figura 59 - Geometria inicial dos corpos de prova.

Posteriormente, em função desta dificuldade experimental, a geometria do entalhe foi alterada (Figura 60), aumentando-se a profundidade e fazendo-se um segundo entalhe por eletroerosão na raiz do entalhe usinado, para proporcionar um maior concentrador de tensões na ponta do entalhe, uma vez que o raio de arredondamento causado pela eletroerosão é menor que o conseguido pela fresa.

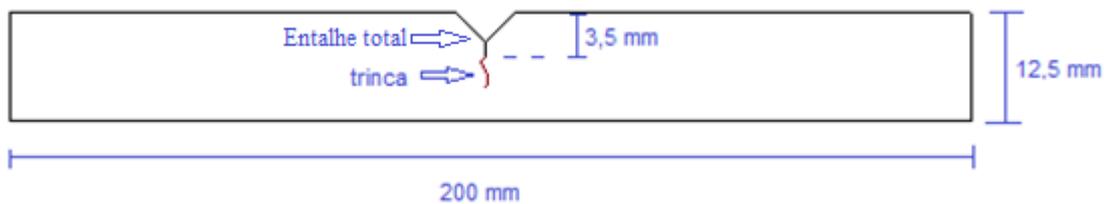


Figura 60 - Geometria modificada dos corpos de prova.

3.3. Nucleação e Propagação de Trincas

3.3.1. Flexão Rotativa

No instituto Mauá de tecnologia, em São Paulo, foram ensaiados corpos de prova com o objetivo de se conhecer o número de ciclos para falha do material, corpos de prova foram carregados em flexão rotativa até a fratura. Em função da capacidade do equipamento e geometria do corpo de provas foi calculada uma tensão máxima constante de 180 MPa, adotada para todos os corpos de prova. Como mencionado anteriormente, a primeira geometria de entalhe projetada (Figura 59) não se mostrou eficiente para tal metodologia, uma vez que devido a limitações do equipamento só foi possível aplicar uma tensão de 40MPa, enquanto que com a mudança de geometria do entalhe (Figura 60) foi possível estabelecer uma vida em fadiga do material de $1,4 \times 10^6$ ciclos, sendo aplicada a tensão de 180MPa. A Figura 61 apresenta, de forma esquemática, a montagem de um corpo de provas para ensaio de flexão rotativa.

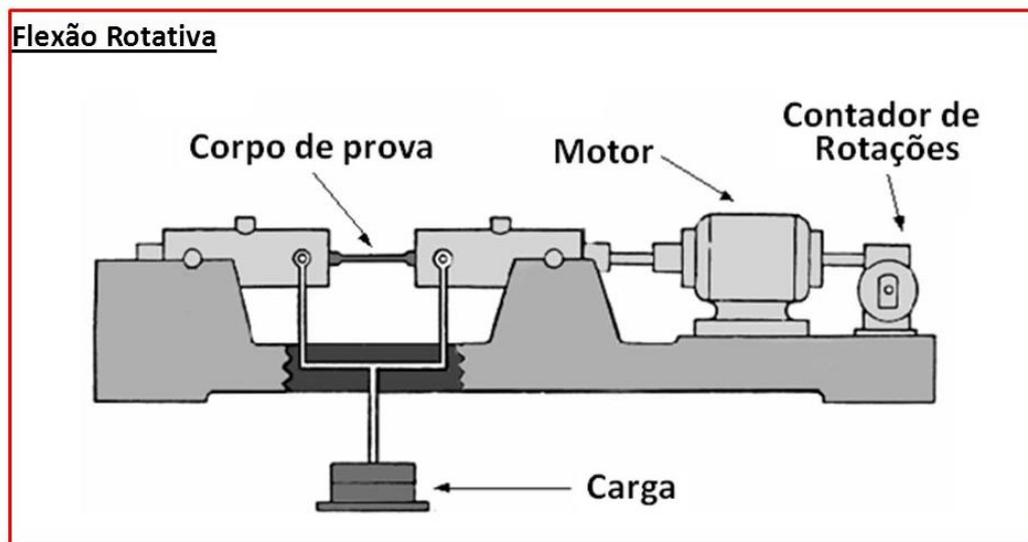


Figura 61 - Equipamento para ensaio de flexão rotativa.

Com o objetivo de se produzir diferentes extensões (comprimentos) de trincas, tendo como limite superior a vida-fadiga do material ($1,4 \times 10^6$ ciclos), foi estabelecida uma metodologia de carregar os corpos de prova entre $0,2$ e $1,2 \times 10^6$ ciclos. Nessa etapa do procedimento experimental foram carregados 6 corpos de prova. Entretanto, o número de $1,4 \times 10^6$ ciclos não se mostrou como uma referência adequada para estes 6 corpos de prova, uma vez que alguns falharam antes deste número, enquanto que outros não apresentavam propagação de trinca ao chegar

perto deste número, conforme verificado após a fratura em nitrogênio líquido dos corpos de prova.

3.3.2. Tração-Tração

Após o insucesso do trincamento de corpos de prova por flexão rotativa, optou-se pela nucleação e propagação de trincas com carregamentos do tipo tração-tração (Figura 62).

Para os carregamentos do tipo tração-tração foi necessário o cálculo das cargas máximas admissíveis, considerando o limite de escoamento do material como 716 MPa [Pereira, 2016] e o concentrador elástico de tensão k_t equivalente a 4 [Shigley, 1986]. A Figura 49 apresenta as áreas consideradas na sessão transversal dos corpos de prova.



Figura 62 - Equipamento utilizado para os testes de tração-tração [PUC-Rio, Laboratório de Fadiga e Mecânica da Fratura, 2016].

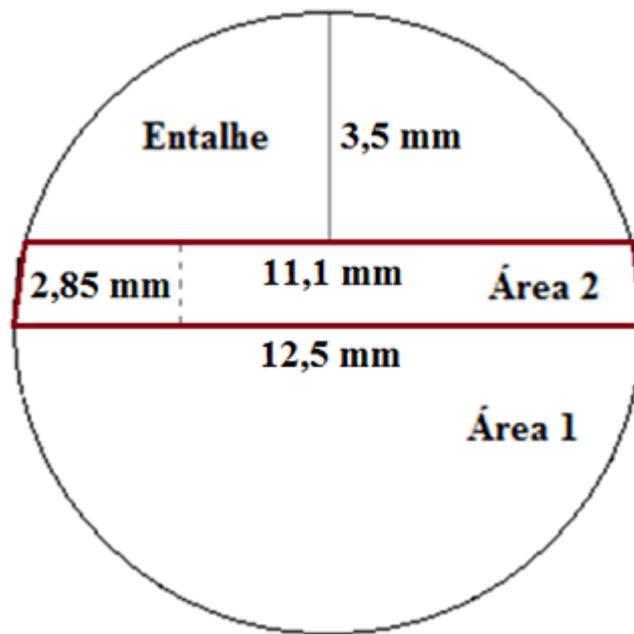


Figura 63 - Ilustração das áreas usadas para os cálculos.

Com base na Figura 63, tem-se:

$$A1 = \frac{\pi \cdot r^2}{2} = \frac{\pi \cdot 12,5^2}{2} \quad [3.1]$$

$$A1 = 61,36 \text{ mm}^2$$

$$A2 \approx \frac{(11,1 + 12,5)}{2} \cdot 2,85$$

$$A2 \approx 33,63 \text{ mm}^2$$

$$A_{total} = 61,36 + 33,63$$

$$A_{total} \approx 95 \text{ mm}^2$$

Como:

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad [3.2]$$

e $\sigma_y = 716 \text{ MPa}$ e considerando $k_t = 4$, temos:

$$P = \frac{716 \cdot 95}{4}$$

$$P = 17 \text{ kN}$$

Então, com base no valor calculado de 17 kN e levando em consideração à incerteza sobre o k_t , do entalhe, o primeiro corpo de prova foi inicialmente ensaiado com uma carga máxima de 10 kN, na qual eram acrescidos 5 kN a cada 25 mil ciclos. Após atingir o carregamento de 25 kN, o corpo de prova fraturou com 88 mil ciclos.

Levando em consideração o carregamento de 25 kN responsável pela fratura do corpo de prova, foi aplicada uma carga de 15 kN nos primeiros dois corpos de prova (CP1 e CP2), enquanto que a trinca durante a sua etapa de propagação foi monitorada pela lateral do corpo de prova. Para facilitar o monitoramento da trinca, foi realizado um polimento superficial do corpo de prova na região do entalhe, de forma a minimizar a quantidade de defeitos superficiais nessa região e, assim, facilitar a observação da nucleação e crescimento das trincas.

Em virtude do elevado número de ciclos necessários para a propagação estimada da trinca (vide Tabela 3), se optou pelo aumento do carregamento em 20%, resultando em uma diminuição significativa do número de ciclos para a nucleação e propagação da trinca. A Tabela 3 apresenta os parâmetros de carregamento e propagação de trinca. Nesta tabela, CP, P_{máx}, P_{min} e NC representam, respectivamente, corpo de prova, carga máxima, carga mínima e número de ciclos.

Tabela 3 - Cargas utilizadas nos ensaios tração-tração nos corpos cilíndricos e tamanho lateral da trinca (TLT).

Corpo de Prova (CP)	Carga máxima (kN)	Carga Mínima (kN)	Número de ciclos	TLT (mm)
1	15	2	146183	6,5
2	15	2	101101	5,5
3	18	2	72250	4,5
4	18	2	75484	3,4
5	18	2	65076	2,8
6	18	2	48907	3,3
7	18	2	35830	3,0
8	18	2	69423	2,5
9	18	2	61931	1,8
10	18	2	55200	1,1

3.4. Técnicas de Testes Não Destrutivos

Após a geração das trincas nos corpos de prova, se deu o início a etapa de detecção e dimensionamento destes defeitos através de END, no qual foram utilizados o US convencional, o US *Phased Array* e a Radiografia Digital. Os ensaios de END foram realizados nas instalações da ARCTEST em Paulínia, SP.

3.4.1. Ultrassom Convencional

Foi utilizada, no ensaio, a técnica Pulso-Eco por contato direto, usando onda longitudinal com feixe reto (0°) e monocristal. O equipamento utilizado foi o modelo USM-35 do fabricante GE e a sonda utilizada foi a MB45-GE, do mesma fabricante.

A preparação para a utilização deste método, passou pela calibração, por comparação, utilizando blocos padrão conhecidos, com furos de tamanhos e distâncias conhecidas. Desta forma é ajustada a curva DAC, que relaciona a distância entre o defeito e o cabeçote do equipamento com a amplitude do sinal obtido. Para tal calibração foi adotado um refletor do tipo FFP (furo de fundo plano) e um ganho de 50 dB. Na Figura 64 apresenta, esquematicamente, os padrões utilizados na calibração.

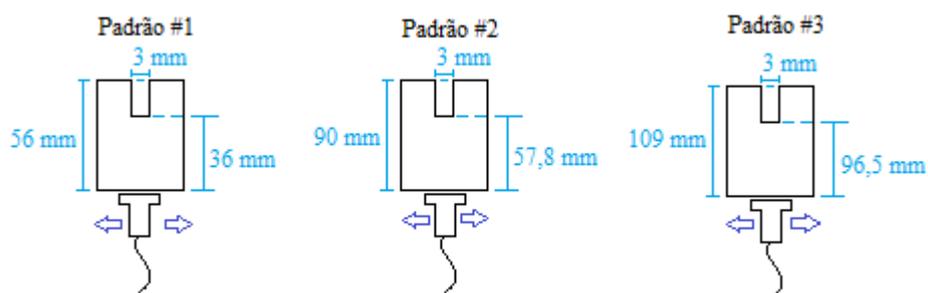


Figura 64 - Calibração do US convencional utilizando padrões tipo FFP.



Figura 65 – Esquema do posicionamento da sonda para inspeção por Ultrassom convencional.

As Figura 64 e 65 ilustram a técnica de ensaio, com a sonda posicionada na extremidade lateral do corpo de prova, perpendicular à trinca. Foram feitas leituras da amplitude do sinal tanto na posição do entalhe como na posição do eco de fundo (extremidade oposta àquela da sonda), na tentativa de se determinar a existência e a profundidade da trinca, através da comparação dessas amplitudes.



Figura 66 - Inspeção por US convencional.

3.4.2. Ultrassom *Phased Array*

Foi utilizada, no ensaio, a técnica Pulso-Eco por contato direto, usando cabeçote angular e feixe setorial com ângulos entre 50° e 70°. O equipamento utilizado foi o OMNISCAN MX-2 do fabricante Olympus, enquanto a sonda utilizada foi a Olympus 7.5CCEV35, com a sapata SA15-N60S-IH-A00084 de 0,84”, do mesmo fabricante.

A calibração foi realizada com a utilização de um bloco padrão modelo V1 angular, no qual existem furos passantes perpendiculares ao feixe, e em diferentes distâncias.

As Figura 67 e 68 ilustram a técnica de ensaio, sendo a sonda movimentada para frente e para trás e o corpo de prova rotacionado, ambos com o objetivo de aumentar a eficiência da detecção.

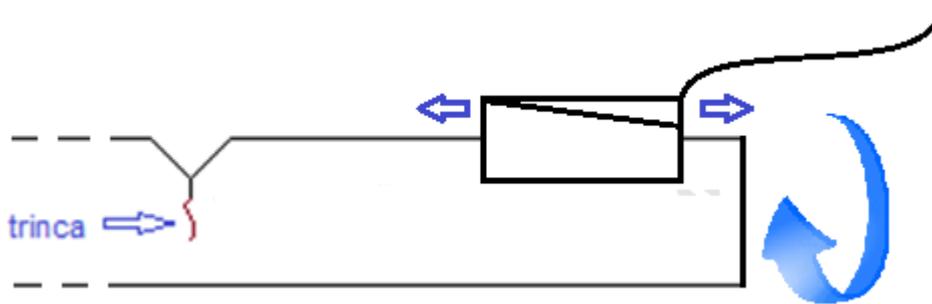


Figura 67 – Ilustração da inspeção pelo *Phased Array*.



Figura 68 - Inspeção por ultrassom *phased array*.

3.4.3. Radiografia Digital

O desenvolvimento do ensaio por Radiografia Digital se deu pela técnica de PS-VS com uma posição [FERNANDES, 2017], empregando equipamento de Raios-X. As inspeções foram realizadas pelas laterais dos corpos de prova, de forma que o entalhe e a trinca fossem perpendiculares ao feixe radioativo, resultando em imagens como na Figura 69, possibilitando realizar medição das trincas. O número na imagem é a referência do corpo de prova.

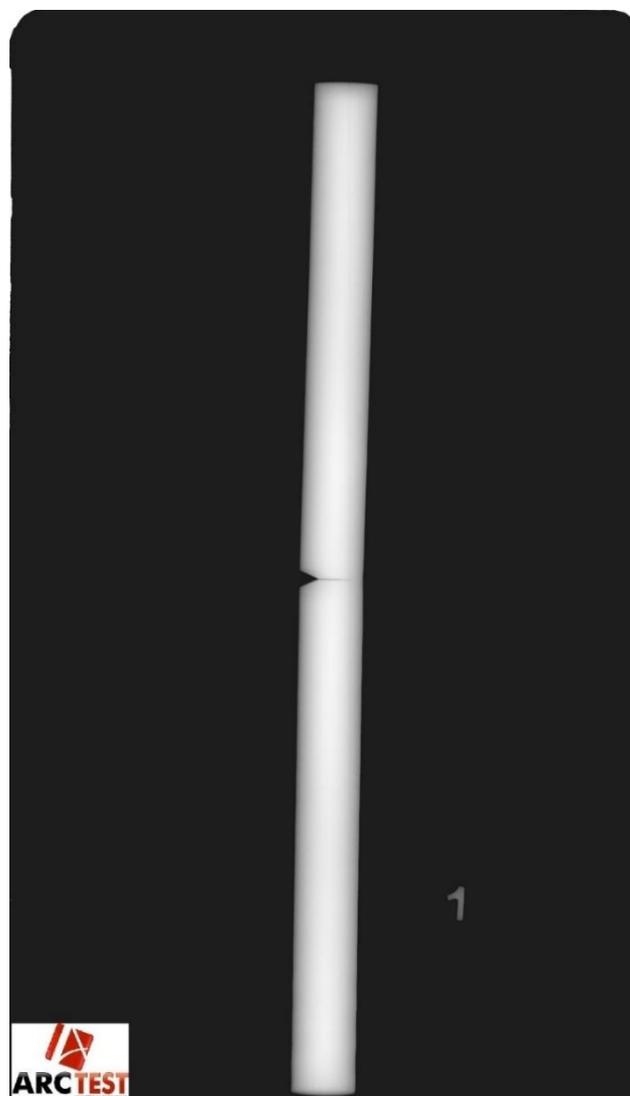


Figura 69 - Radiografia do corpo de prova 1 trincado.

3.4.4. Análise Visual das Superfícies Fraturadas

Após as inspeções realizadas por US convencional, PA e RD, foi realizada a fratura dos corpos de prova após imersão em nitrogênio líquido (Figura 70), para que os corpos de prova sofressem uma fratura frágil, não prejudicando a análise posterior. Isto possibilitou a análise visual da sessão transversal do corpo de prova na região do entalhe, permitindo a identificação e medição tanto do entalhe quanto da região fadigada (Figura 71).



Figura 70 - Corpos de prova após a fratura.

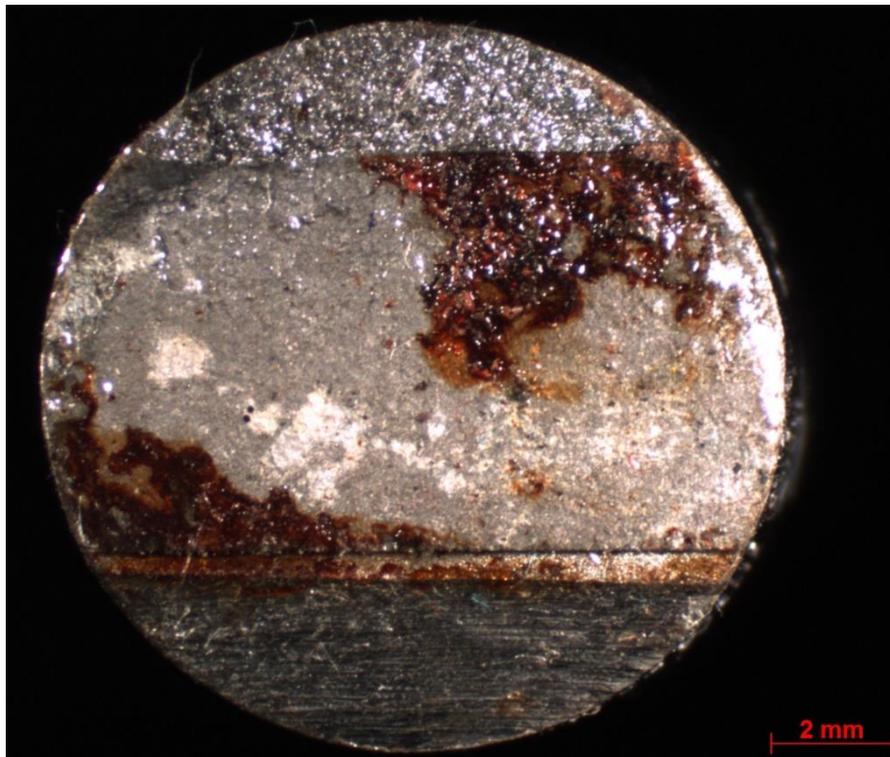


Figura 71 - Superfície de fratura do CP 1.

Na Figura 71 é possível observar as diferentes regiões da superfície de fratura, onde se tem, de baixo para cima na figura, os entalhes mecânicos (fresa e eletroerosão), seguido pela região de fadiga e, por fim, a área de fratura final (nitrogênio líquido).

A determinação do tamanho da trinca de fadiga ocorreu com a medição em 7 posições, duas nas laterais da trinca e outras cinco distribuídas na face da trinca (Figura 72), com o auxílio de uma lupa e adotando-se a Equação 3.3:

$$trinca = \frac{\frac{M_{Le} + M_{Ld}}{2} + M_1 + M_2 + M_3 + M_4 + M_5}{6} \quad [3.3]$$

onde: M_{Le} = Medida da lateral esquerda; M_{Ld} = Medida da lateral direita

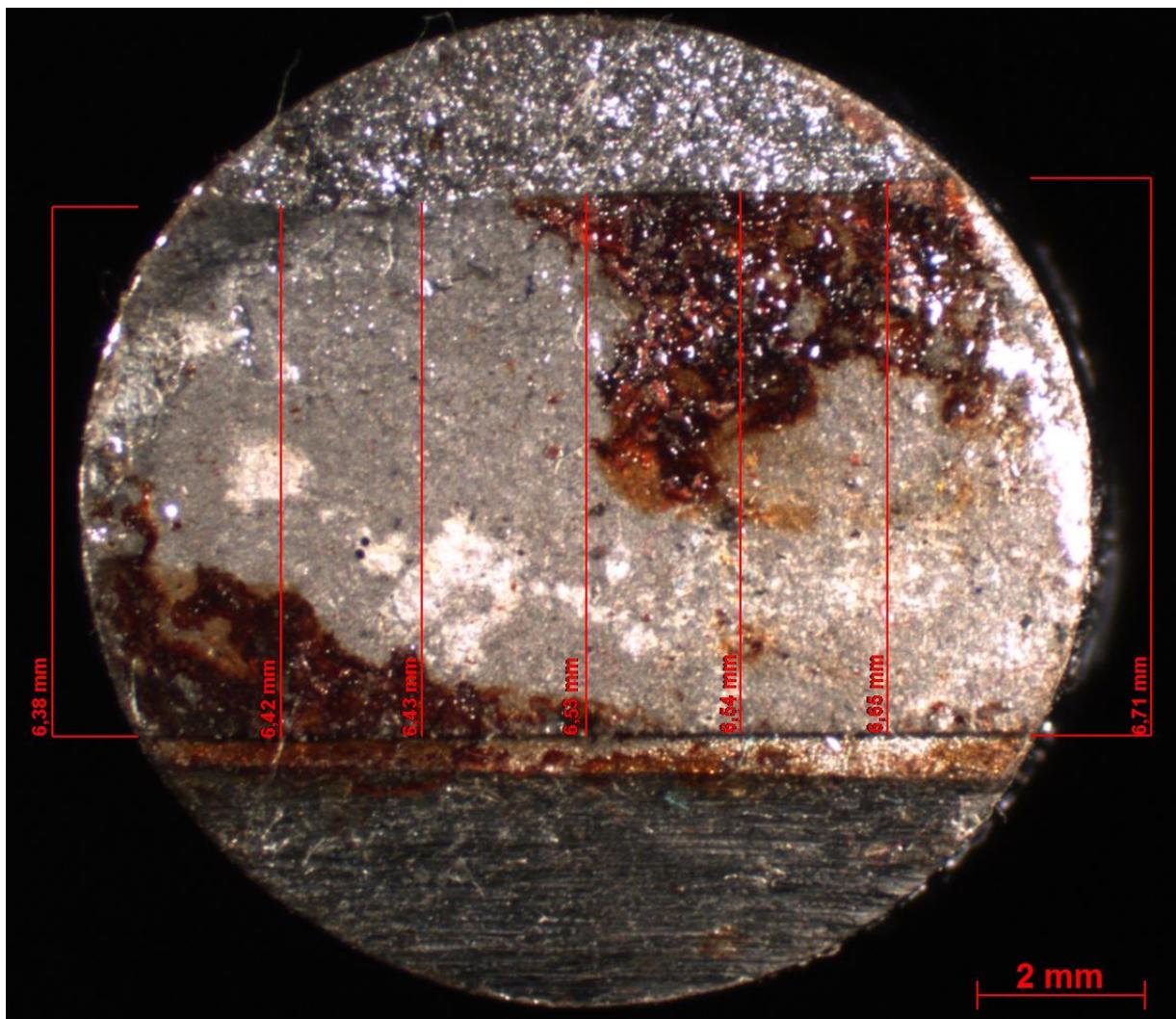


Figura 72 – Posições de medição da profundidade da trinca.

4. Resultados e Discussão

4.1. Medição Visual

A Tabela 4 mostra os valores dos comprimentos de trinca em cada posição de medição, em função do corpo de prova. Nesta tabela, M_{Le} e M_{Ld} representam as posições de medição externas da superfície de fratura, enquanto que as demais medidas representam posições internas da mesma superfície. Já a Tabela 5 apresenta os valores de comprimento de trinca (a) calculados pela Equação 3.3.

Tabela 4 – Valores de trinca nas superfícies de fratura.

CP	Comprimentos de trinca (mm)						
	M_{Le}	M_{Ld}	M1	M2	M3	M4	M5
1	6.38	6.71	6.42	6.43	6.53	6.54	6.65
2	5.38	5.45	5.44	5.60	5.63	5.64	5.52
3	4.66	4.87	5.05	5.26	5.37	5.41	5.19
4	3.57	3.60	4.27	4.45	4.49	4.37	4.20
5	2.41	3.86	4.12	4.38	4.37	4.43	4.30
6	3.19	3.51	3.71	3.90	4.06	4.04	3.81
7	2.72	3.26	3.66	3.57	3.86	3.62	3.59
8	2.70	2.86	3.38	3.69	3.56	3.57	3.45
9	1.93	2.03	2.58	2.97	3.09	3.00	2.82
10	0.99	0.73	1.46	1.68	1.74	1.55	1.20

Tabela 5 - Valores calculados de comprimento de trinca.

CP	a (mm)
1	6,52
2	5,54
3	5,17
4	4,23
5	4,12
6	3,81
7	3,55
8	3,41
9	2,74
10	1,42

A Tabela 6 reporta os valores calculados de comprimento de trinca em função dos parâmetros de carregamento de fadiga, responsáveis pela nucleação e propagação das trincas.

Na Tabela 6 é visto que os corpos de prova 4, 8, 9 e 10 apresentam uma dispersão quando é comparado o tamanho do comprimento da trinca com o valor de número de ciclos, nestes casos houve aumento do número de ciclos para comprimentos de trincas menores do que nos resultados anteriores. Isto pode ter ocorrido devido às diferenças microestruturais no material, porém este resultado pode também ser inerente aos ensaios de fadiga.

Tabela 6 - Tamanho de trinca em função dos parâmetros de carregamento de fadiga.

CP	a (mm)	Pmax (kN)	NC
1	6,52	15	146183
2	5,54	15	101101
3	5,17	18	72250
4	4,23	18	75484
5	4,12	18	65076
6	3,81	18	48907
7	3,55	18	35830
8	3,41	18	69423
9	2,74	18	61931
10	1,42	18	55200

Na Tabela 7 e a Figura 73 apresentam o comprimento do entalhe, o comprimento de trinca e o comprimento total do comprimento da descontinuidade (a_T).

Tabela 7 - Tabela comparativa entre os valores de entalhe.

CP	entalhe (mm)	a (mm)	a_T (mm)
1	3,24	6,52	9,76
2	3,59	5,54	9,13
3	3,22	5,17	8,39
4	3,19	4,23	7,42
5	3,35	4,12	7,47
6	3,55	3,81	7,36
7	3,79	3,55	7,34
8	3,27	3,41	6,68
9	3,36	2,74	6,10
10	3,34	1,42	4,76

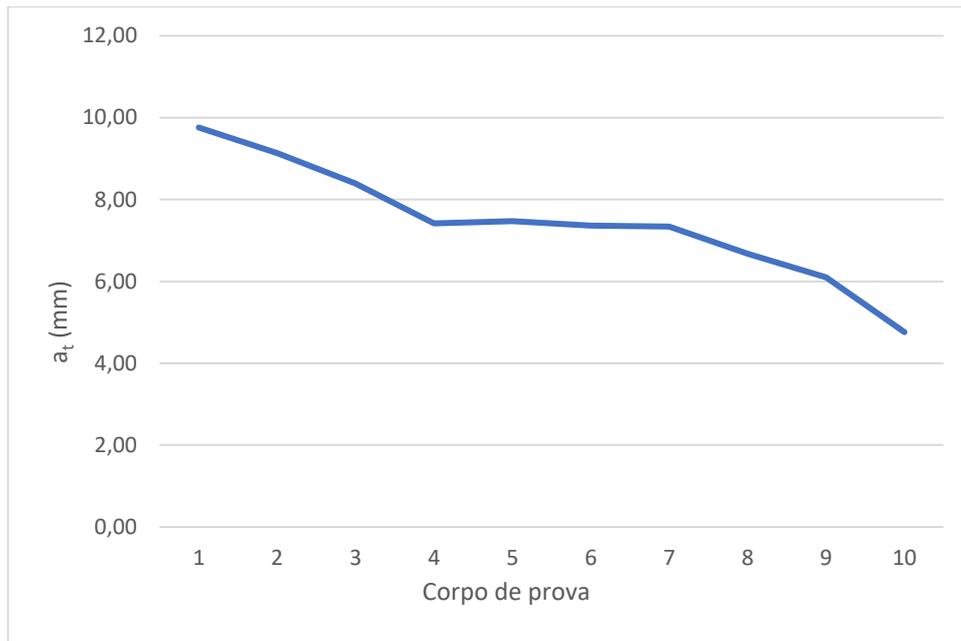


Figura 73 – Comprimento total da descontinuidade em função do CP.

4.2. Ultrassom Convencional

Com este método foi analisado o comportamento dos sinais simultâneos da reflexão da região da descontinuidade (amplitude ED) e da extremidade da peça (amplitude EF), conforme apresentado na Tabela 8.

Tabela 8 - Resultados do US convencional.

CP	US Convencional	
	Amplitude ED (dB)	Amplitude EF (dB)
1	-1,0	-1,4
2	-4,4	-7,0
3	-2,6	-3,6
4	-2,0	-6,0
5	-5,0	-5,0
6	-6,6	-9,0
7	-4,4	-5,4
8	-4,0	-7,0
9	-8,0	-12,0
10	-15,0	-6,0

O ultrassom convencional permite a realização de ensaios qualitativos (indicação do defeito) e quantitativos (indicação da dimensão do defeito) [COSTA e MARRIEL 2014]. A indicação da descontinuidade acontece quando o parâmetro ED for menor em módulo do que o parâmetro EF [ANDREUCCI, 2014].

Porém, no caso do ensaio aqui reportado, não foi possível haver o dimensionamento das descontinuidades, e sim obter um resultado qualitativo, indicando a presença de defeitos. A impossibilidade de se realizar o dimensionamento das descontinuidades foi influenciada tanto pela geometria do entalhe, que ocasionou um ruído elevado na tela do equipamento, como pelo fato do cabeçote disponível para a realização da inspeção ser de tamanho similar ao diâmetro do corpo de prova, o que impediu a realização de uma varredura adequada, na qual fosse possível comparar áreas trincadas com outras não trincadas (ilustrado nas Figuras 64 e 65).

Como já mencionado, foi possível, neste trabalho, a detecção de descontinuidades com base na diferença de amplitudes entre a descontinuidade (ED) e o eco de fundo (EF). Essa afirmativa se encontra baseada na análise da Tabela 8, na qual para todos os corpos de prova os valores de ED são menores em módulo do que aqueles de EF, com exceção dos corpos de prova 5 e 10.

4.3. Ultrassom *Phased-Array*

Com esta técnica, além da indicação do defeito, foi obtido o comprimento da trinca para cada corpo de prova, cujos valores se encontram apresentados na Tabela 9, onde a_1 significa o comprimento de trinca medido pela técnica de *Phased Array*. Já a Tabela 10 compara os comprimentos de trincas detectados pela técnica de

Phased Array com aqueles calculados e apresentados anteriormente na Tabela 5, sendo que o erro relativo entre ambas as medidas foi calculado pela Equação 4.1.

$$Erro = \frac{a - a_1}{a} \quad [4.1]$$

Tabela 9 - Resultados do ensaio de *Phased Array*.

CP	US <i>Phased Array</i>	
	a ₁ (mm)	Amplitude (%)
1	2,0	> 100
2	1,1	91,0
3	1,7	> 100
4	2,2	> 100
5	2,1	> 100
6	1,5	> 100
7	2,2	> 100
8	1,5	> 100
9	1,5	> 100
10	0,9	91,0

Tabela 10 - Comprimentos de trinca medidos pelo *Phased Array* e calculados.

CP	US <i>Phased Array</i>		
	a ₁ (mm)	a (mm)	erro (%)
1	2.0	6.52	69.3
2	1.1	5.54	80.1
3	1.7	5.17	67.1
4	2.2	4.23	48.0
5	2.1	4.12	49.1
6	1.5	3.81	60.6
7	2.2	3.55	60.5
8	1.5	3.41	55.9
9	1.5	2.74	45.3
10	0.9	1.42	36.4

O gráfico apresentado na Figura 74 compara os tamanhos de trinca indicados pela técnica de *Phased Array* com aqueles calculados após medições nas superfícies de fratura (valor real).

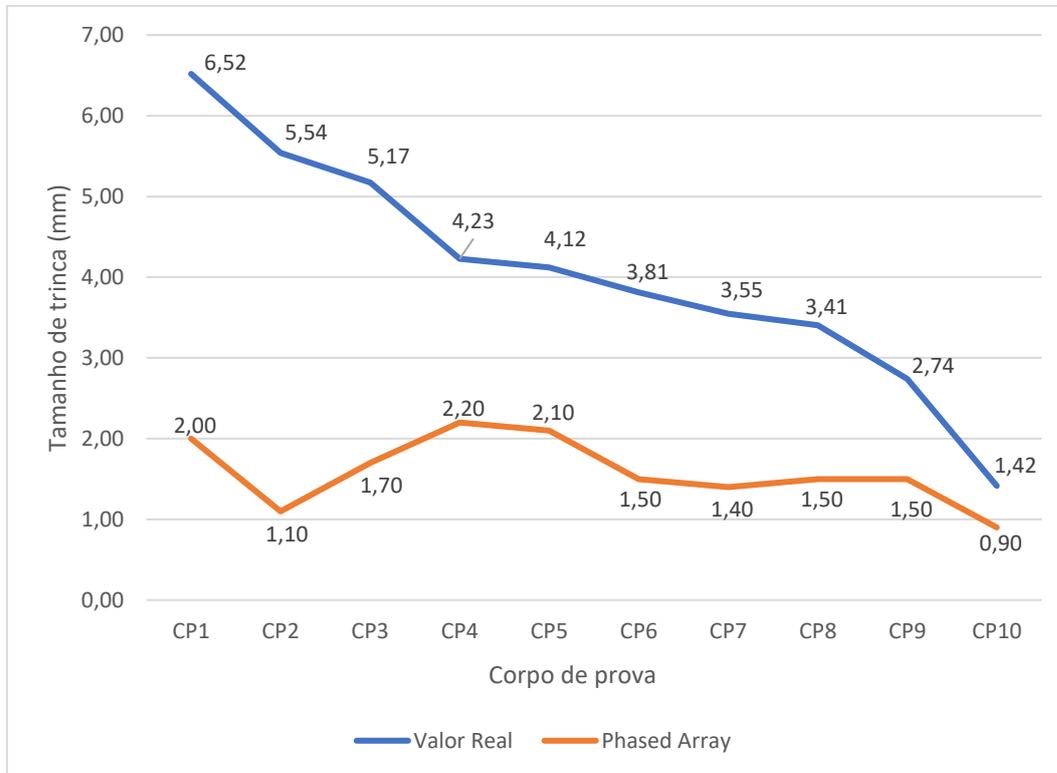


Figura 74 - Gráfico comparativo entre os diferentes comprimentos de trinca.

Na realização das leituras pela tecnologia *Phased Array* se obteve a indicação dos defeitos em todos os corpos de prova. Porém, os valores dos dimensionamentos realizados pela técnica foram muito discrepantes em relação aos comprimentos medidos das trincas. A explicação para essa discrepância pode ser devido a geometria do entalhe inspecionado, que proporcionava um sinal muito ruidoso, causado pelas reflexões no mesmo, como na sapata utilizada, adequada a corpos cilíndricos com diâmetro de 0,84", ou seja, aproximadamente 21,3 mm, enquanto que a barra inspecionada tinha um diâmetro de 12,5 mm, proporcionando assim um encaixe com folga (vide Figura 75) e, conseqüentemente, prejudicando uma correta indicação dimensional das descontinuidades.

Com a realização dos experimentos em Ultrassom e Radiografia Digital, foi adquirida alguma experiência na utilização dos equipamentos. Apesar de uma breve

experiência com os END, foi possível observar alguns aspectos interessantes, o método de US requer alguma experiência na detecção de descontinuidades e no seu dimensionamento, porém é um ensaio de grande eficácia na detecção de descontinuidades internas.

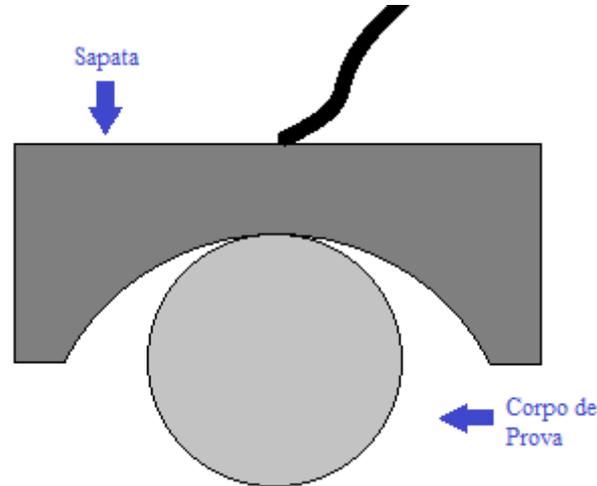


Figura 75 - Ilustração do encaixe da sapata com o corpo de prova.

4.4. Radiografia Digital

Com a técnica radiográfica também foi possível obter uma estimativa do comprimento da trinca contida no corpo de prova, resultados apresentados na Tabela 11, onde o erro foi calculado pela Equação 4.1, substituindo a_1 por a_2 .

Tabela 11 - Resultados do RX Digital.

CP	a_2 (mm)	a (mm)	erro (%)
1	6.45	6.52	1.07
2	3.73	5.54	32.7
3	4.89	5.17	5.4
4	1.15	4.23	72.8
5	0.76	4.12	81.6
6	0.75	3.81	80.3
7	0.82	3.55	76.9
8	0.39	3.41	88.6
9	0.24	2.74	91.2
10	0.82	1.42	42.2

Embora fosse possível observar as descontinuidades pelas imagens de radiografia com bastante facilidade, os resultados apresentados nas Tabela 10 e 11

divergem bastante. Uma comparação entre tais resultados permite se constatar que em sua maioria, os resultados obtidos pela técnica de Radiografia Digital são piores que os apresentados pela técnica *Phased Array*, exceção para os corpos de prova 1, 2 e 3.

Isto não seria esperado, pois no caso da Radiografia Digital a imagem foi obtida na superfície lateral do corpo de prova, isto é, considerando apenas as dimensões externas das trincas. Por outro lado, as trincas calculadas levaram em consideração dimensões internas e externas das mesmas. Essa suposição é reforçada pela observação das imagens das superfícies de fratura apresentadas no Anexo 3, onde se observa que a geometria da trinca varia de acordo com o seu comprimento; quanto menor for o comprimento da trinca, maior é a sensação de que o crescimento da trinca se dá com um formato radial, ou seja, o centro da trinca tem um comprimento maior que nas suas laterais. Porém, também é percebido que quando a trinca atinge aproximadamente o centro do corpo de prova, a trinca passa a se propagar com uma frente reta, isto é, o comprimento central se assemelha ao valor da profundidade na lateral. Além disto, deve ser levado em consideração que trincas maiores apresentaram também uma maior abertura (maior afastamento entre seus flancos), o que facilitou a irradiação do feixe tornando mais visível a própria trinca.

Na Figura 76 é observada a comparação entre a média dos comprimentos de trinca das laterais do corpo de prova com o valor calculado de trinca adotando todas as medições (parâmetro a na Tabela 5 ou *valor real* na Figura 76). Nesta figura, é possível se observar que para trincas com maior comprimento os dois valores tendem a se aproximar, com exceção do corpo de prova 5 que apresentou uma diferença maior entre resultados. Já na Figura 77 é apresentada a comparação entre a média dos comprimentos de trinca das laterais do corpo de prova com os valores indicados pela Radiografia Digital, no qual pode ser observada uma maior aproximação das curvas nos pontos de maior comprimento de trinca, onde houve também uma maior abertura de trinca.

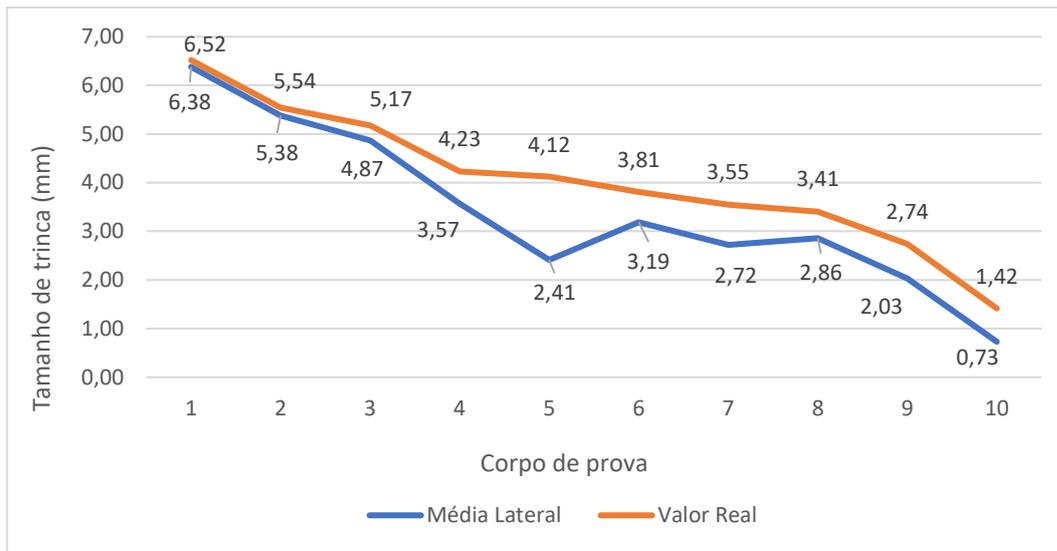


Figura 76 - Gráfico comparativo dos valores da média lateral e do valor real.

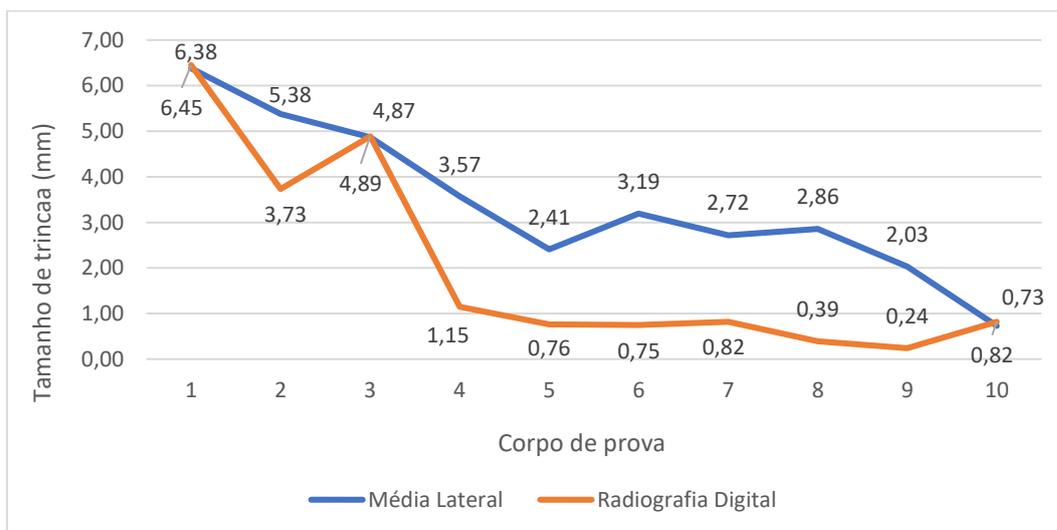


Figura 77 - Gráfico comparativo entre a média lateral e o valor indicado por Radiografia Digital.

5. Conclusões

O objetivo deste trabalho foi avaliar a susceptibilidade das técnicas não destrutivas de Ultrassom Convencional, Ultrassom *Phased Array* e Radiografia Digital na indicação e dimensionamento de trincas passantes de fadiga em corpos de prova cilíndricos. Com base nos resultados apresentados, tem-se como conclusões:

1. A técnica de Ultrassom Convencional mostrou-se adequada para a indicação de descontinuidades internas no material, uma vez que indicou a existência de defeitos na maioria (80%) dos corpos de prova ensaiados.
2. Entretanto, tal técnica mostrou-se ineficaz para o dimensionamento das descontinuidades introduzidas nos corpos de provas.
3. Os resultados obtidos pela técnica de Ultrassom *Phased Array* mostraram que esta técnica foi mais eficiente do que o Ultrassom Convencional para a indicação de defeitos.
4. Para trincas curtas, o Ultrassom *Phased Array* apresentou a maior susceptibilidade para o dimensionamento de descontinuidades. Todavia, 40% dos resultados obtidos apresentaram uma diferença entre 60-70% dos comprimentos verdadeiros das trincas introduzidas nos corpos de prova.
5. Por sua vez, a técnica de Radiografia Digital também se mostrou apropriada para a indicação de descontinuidades em materiais.
6. Esta técnica se mostrou eficiente para a detecção de trincas longas. Porém, no número de indicações totais, a mesma apresentou de 50% dos resultados com erro superior a 70% em relação aos comprimentos verdadeiros das trincas.
7. Com base nesta diferença de resultados observados, pode-se concluir que a técnica de Ultrassom *Phased Array*, nesta pesquisa, se mostrou mais eficaz do que a técnica de Radiografia Digital na detecção de descontinuidades.

6. Sugestão para Trabalhos Futuros

Devido as dificuldades experimentais observadas e reportadas nesta dissertação, se propõe adoção de uma outra geometria de corpo de prova para se repetir os ensaios de Ultrassom Convencional e Ultrassom *Phased Array*. Uma proposta para uma nova geometria de corpo de prova encontra-se na Figura 78.

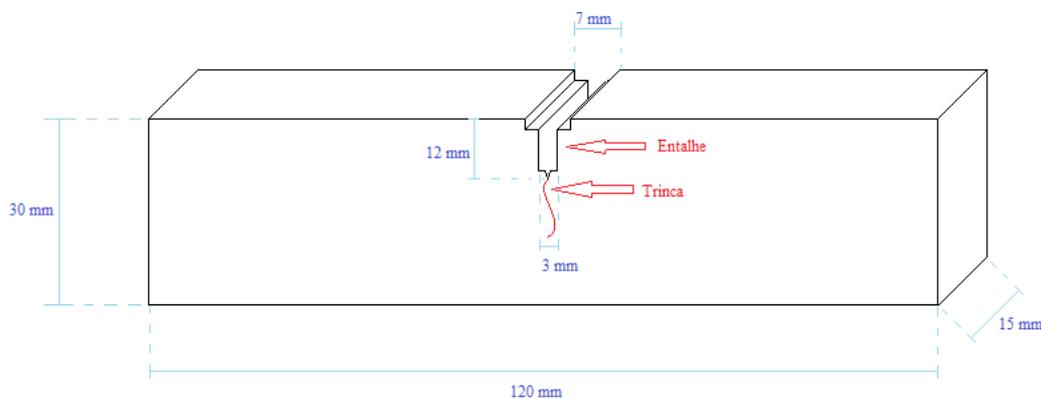


Figura 78 - Geometria de um Corpo de prova retangular.

A geometria deste corpo de prova iria proporcionar uma menor influência na detecção de descontinuidades, uma vez que o entalhe causaria menos ruído devido ao fato do mesmo ser paralelo à superfície de contato entre ele (entalhe) e o cabeçote do ultrassom, além de possibilitar uma varredura mais ampla, permitindo uma maior movimentação do cabeçote. Essa geometria também permitiria eliminar a sapata angular utilizada no ensaio de *Phased Array* para acoplar corpos de prova cilíndricos. Com isso, o encaixe seria facilitado com uma sapata reta, proporcionando uma maior susceptibilidade na detecção de trincas, tanto no caso do Ultrassom Convencional como no *Phased Array*.

7. Referências bibliográficas

- 1 Vieira Pereira, João Adriano. **Estudo e Aplicação de Ensaios Não Destrutivos: Líquidos penetrantes, Ultra sons, Radiografia digital – Técnica tangencial medição de espessuras.** Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Mestrado Integrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, 2013.
- 2 Andreucci, R. **Ensaio por Ultrassom. ABENDI.** Associação Brasileira de ensaios não destrutivos, 2014.
- 3 Helier, C. **Handbook of Nondestructive Evaluation.** McGraw-Hill, 2003.
- 4 Berke, M. **Nondestructive Material Testing with Ultrasonics.** Site: www.ndt.net/article/v05n09/berke/berke.pdf . Acessado em: 23-Jan-17.
- 5 Mix, P. E. - **Introduction to nondestructive testing: a training guide.** 2nd. Hoboken, N.J.: Wiley, 2005.
- 6 Lima, A. **Manual de formação ultrassons, Medição de Espessuras.** Nivel 2, 2010.
- 7 OLYMPUS. **Ultrasonic Transducers Technical Notes.** www.olympus-imc.com, 2011
- 8 Nunes, R. M. et al. **Metal Handbook Vol.17.** ASTM, 1989.
- 9 Santin, J. L. **Ultra-Som Técnicas e Aplicação.** Pró END Consultoria Ltda. Curitiba, 2003.
- 10 Tech, R. **Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications.** RD Tech Guideline. Canadá, 2004.
- 11 Wilcox, P. D. Drinkwater, B. **Ultrasonic array for non-destructive evaluation: A review, NDT&E international.** Março de 2006.
- 12 Cerqueira, A. S. **Avaliação da técnica de Phased Array na inspeção de juntas soldadas dissimilares e cladeadas com diferentes espessuras de amantejamento.** Universidade Federal

- do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Minas, Metalúrgica e de Materiais, 2009.
- 13 Krautkramer. **Nondestructive Material Testing - Introduction to the Basic Principles**. 24 de Outubro de 2003.
 - 14 Huan-qing C. et. al. **Study on Focusing Characteristics of Curved Phased Array Probe**, NDT&E Laboratory, Dalian University of Technology, 2015.
 - 15 Brito, S. H. B. <http://labcisico.blogspot.com.br/2013/03/o-espectro-eletromagnetico-na-natureza.html>. Blog LabCisco. acessado em: 16/02/2017.
 - 16 Andreucci, R. **Radiografia industrial**. ABENDI - Associação Brasileira de ensaios não destrutivos, 2014.
 - 17 Pick, L. Pincu, R. Lieberman, R. **Wall Thickness Measurement**. **Vidisco**, NDT.net
 - 18 NORMA PETROBRAS, **ENSAIO NÃO-DESTRUTIVO – RADIOGRAFIA REV.E, N-1595 d**, JAN/2004.
 - 19 Banco de dados, aços especiais para construção mecânica. http://www.acovisa.com.br/wp-content/uploads/2013/08/acosespeciais_construcaomecanica.pdf ; Acessado em 05/05/2017.
 - 20 Pereira, M. V. S. **Conversa particular**, 2016.
 - 21 Shigley, J. **Mechanical engineering design: 1st metric edition**, 1986.
 - 22 Fernandes, F. **Relatório de resultados experimentais**, 2017.
 - 23 Costa, A. C. Marriel, M. **Avaliação das técnicas de dimensionamento da altura das descontinuidades detectadas por ensaio ultrassônico e suas aplicações – ConaEND&IEV 2014**.
 - 24 **NDT Education resources**. Disponível em: <http://www.ndt-ed.org/EducationResources/educationresource.htm> (acessado em 23/01/17).
 - 25 Einav, I. et. al. **Non-destructive testing for plant life assessment**. IAEA - International Atomic Energy Agency. Vienna, 2005.
 - 26 Richter, M. **Uso das Técnicas de END: Ultra sons (TOFD e Phased Array), Radiografia, Partículas Magnéticas e ACFM na Avaliação**

de Juntas Soldadas com Trincas de Fadiga. IV Conferencia
Panamericana de END - Buenos Aires: NDT.net, Out/2007.

Anexos

Anexo 1:

Table 2 – Acoustic Properties of Materials					
Material	Longitudinal Velocity		Shear Velocity		Acoustic Impedance (Kg/m ² s x 10 ⁶)
	(in./μs)*	(m/s)	(in./μs)*	(m/s)	
Acrylic resin (Perspex)	0.107	2,730	0.056	1,430	3.22
Aluminum	0.249	6,320	0.123	3,130	17.06
Beryllium	0.508	12,900	0.350	8,880	23.5
Brass, naval	0.174	4,430	0.083	2,120	37.30
Cadmium	0.109	2,780	0.059	1,500	24.02
Columbium	0.194	4,920	0.083	2,100	42.16
Copper	0.183	4,660	0.089	2,260	41.61
Glycerine	0.076	1,920	—	—	2.42
Gold	0.128	3,240	0.047	1,200	62.60
Inconel	0.29	5,820	0.119	3,020	49.47
Iron	0.232	5,900	0.127	3,230	45.43
Iron, cast					
(slow)	0.138	3,500	0.087	2,200	25.00
(fast)	0.220	5,600	0.126	3,220	40.00
Lead	0.085	2,160	0.028	700	24.49
Manganese	0.183	4,660	0.093	2,350	34.44
Mercury	0.057	1,450	—	—	19.66
Molybdenum	0.246	6,250	0.132	3,350	63.75
Motor Oil (SAE 20 or 30)	0.069	1,740	—	—	1.51
Nickel, pure	0.222	5,630	0.117	2,960	49.99
Platinum	0.156	3,960	0.066	1,670	84.74
Polyamide, (nylon, Perlon)					
(slow)	0.087	2,200	0.043	1,100	.40
(fast)	0.102	2,600	0.047	1,200	3.10
Polystyrene	0.092	2,340	—	—	2.47
Polyvinylchloride, PVC, hard	0.094	2,395	0.042	1,060	3.35
Silver	0.142	3,600	0.063	1,590	37.76
Steel, 1020	0.232	5,890	0.128	3,240	45.63
Steel, 4340	0.230	5,850	0.128	3,240	45.63
Steel, 302	0.223	5,660	0.123	3,120	45.45
Austenitic stainless Steel, 347	0.226	5,740	0.122	3,090	45.40
Austenitic stainless Tin	0.131	3,320	0.066	1,670	24.20
Titanium, Ti 150A	0.240	6,100	0.123	3,120	27.69
Tungsten	0.204	5,180	0.113	2,870	99.72
Uranium	0.133	3,370	0.078	1,980	63.02
Water (20°C)	0.058	1,480	—	—	1.48
Zinc	0.164	4,170	0.095	2,410	29.61
Zirconium	0.183	4,650	0.089	2,250	30.13

* Conversion Factor: 1 m/s = 3.937 x 10⁻⁵ in/μs

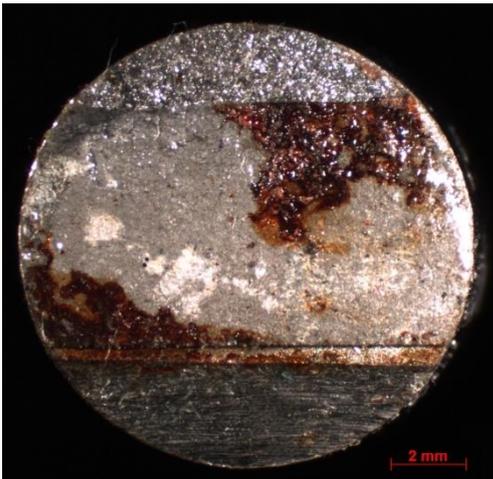
Source: Nondestructive Testing Handbook 2nd Edition Volume 7
Ultrasonic Testing ASNT 1991 ed Paul McIntire

Anexo 2:

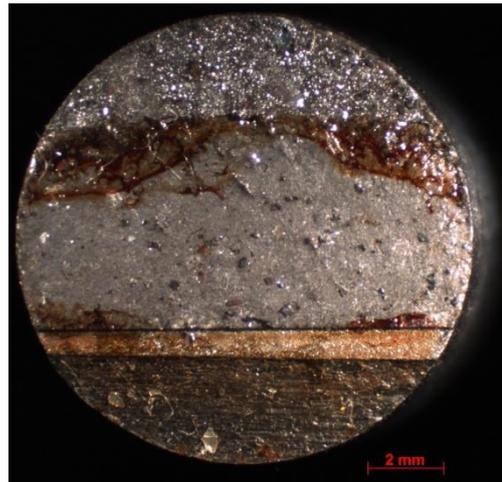
Tabela 12 - Características de diferentes materiais piezoelétricos [VIEIRA, 2013].

CARACTERÍSTICAS	MATERIAL	QUARZO	Receptor SULFATO DE LÍTIO	Bom	Emissor TITANATO DE BARIO	Bom	METANIÓBATO DE PLOMO	TITANATO ZIRCONATO DE PLOMO	Unidad
Densidad		2,65	2,06		5,7		5,8	7,5	10^3 kg/m ³
Velocidad acústica		5760	4720		4400		2800	3000	m/s
Impedancia acústica		15,3	11,2		35		16	22,5	10^5 kg/m ² .s
Temperatura crítica		576	75		115÷150		550	190÷350	°C
Factor de acoplamiento electromecánico k		0,10	0,35		0,52		0,42	0,5÷0,6	
Módulo piezoelétrico d		2,3	15		190		80	150÷590	10^{-12} m/V
Constante de deformación piezoelétrica h		4,9	8,2		1,1		1,1	1,8÷4,6	10^8 V/m
Constante de presión piezoelétrica g		57	165		11		37	20÷40	10^{-5} m/N

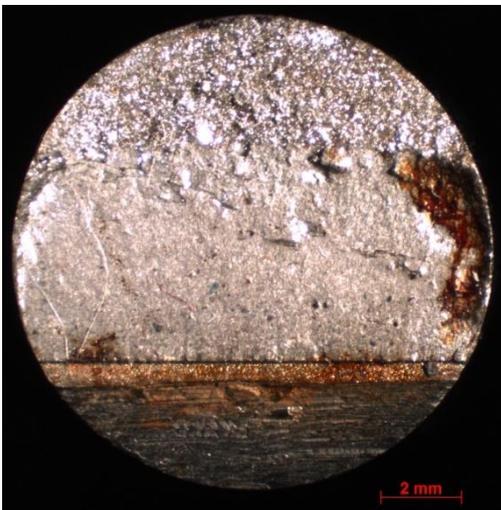
Anexo 3:



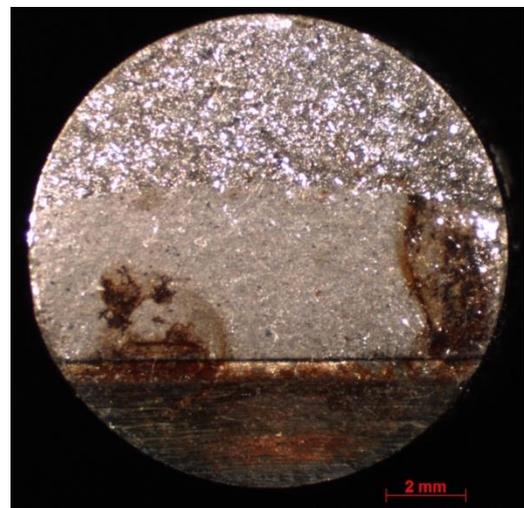
CP1



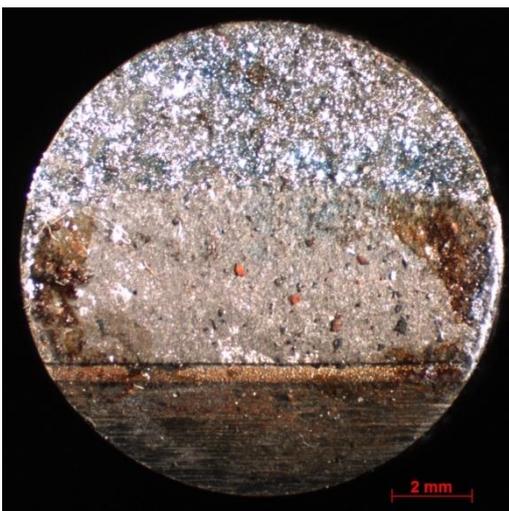
CP2



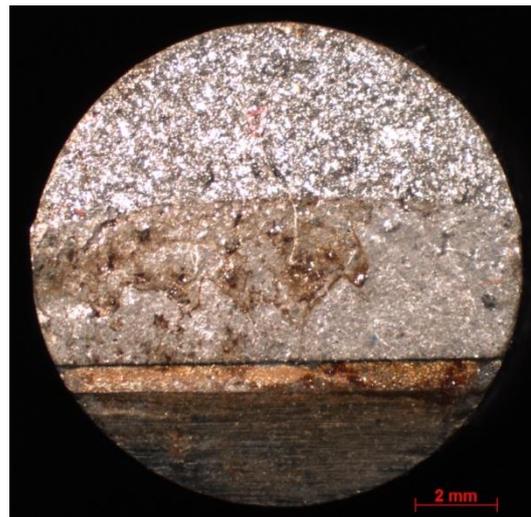
CP 3



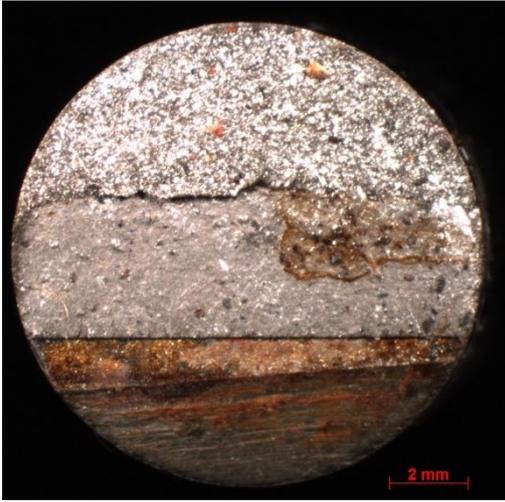
CP4



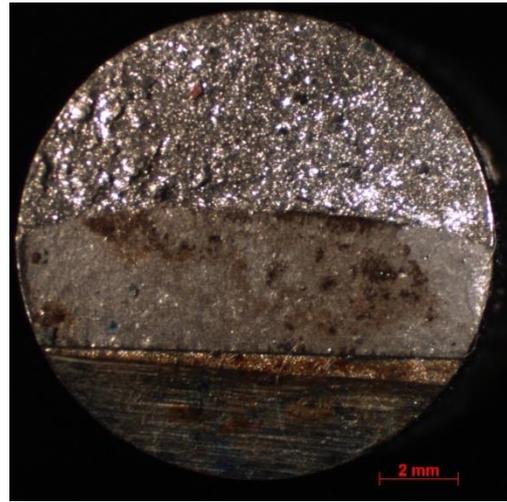
CP5



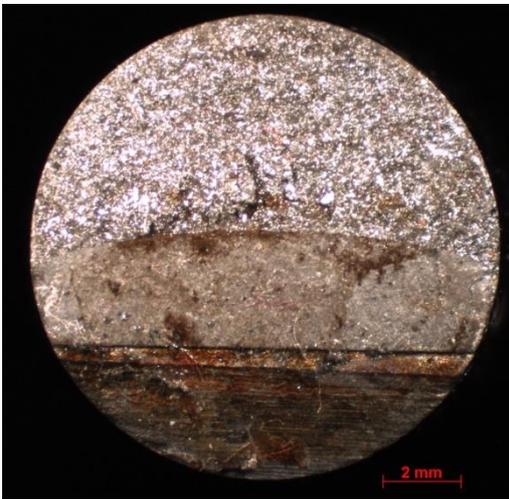
CP6



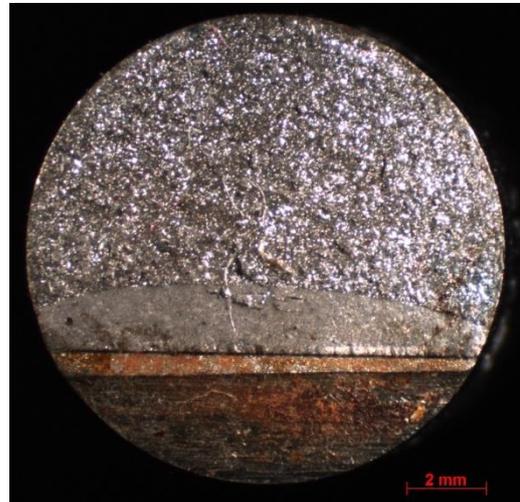
CP7



CP8

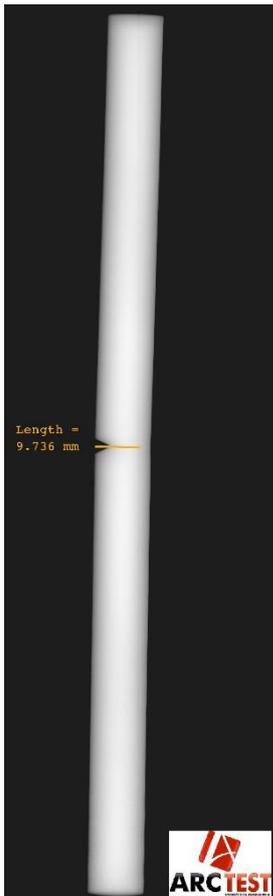


CP9

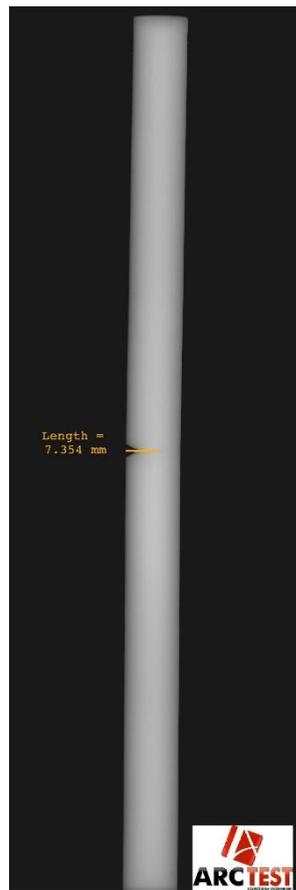


CP10

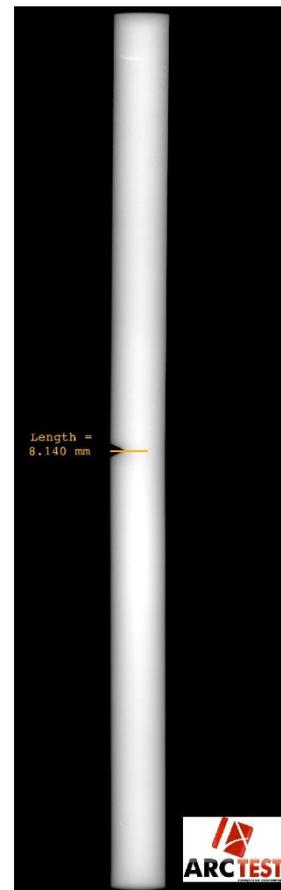
Anexo 4:



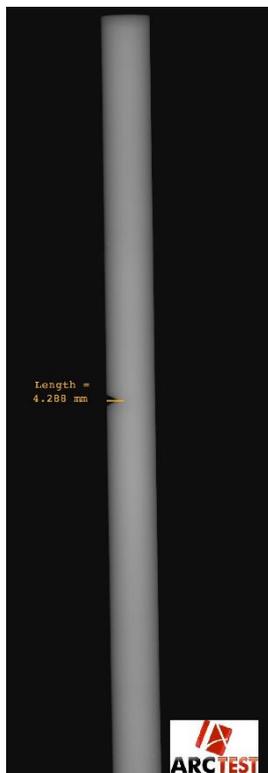
CP1



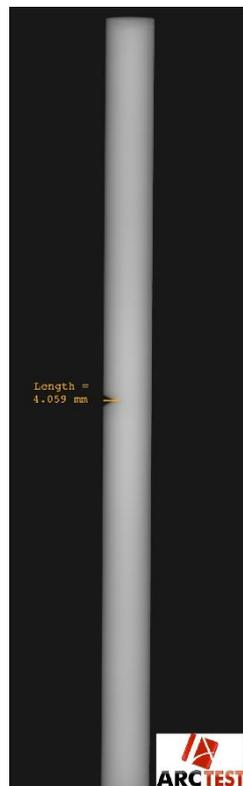
CP2



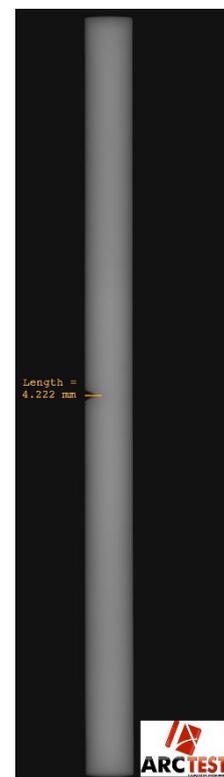
CP3



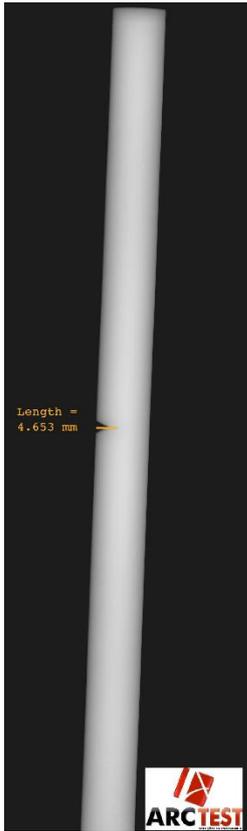
CP4



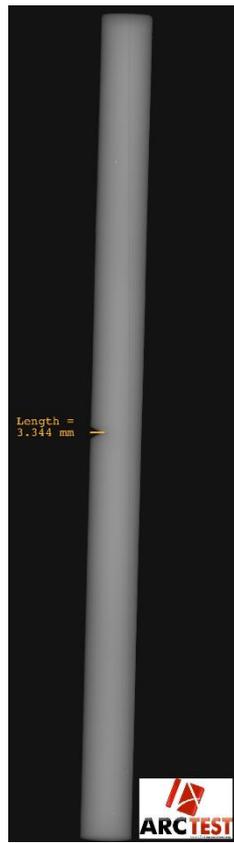
CP5



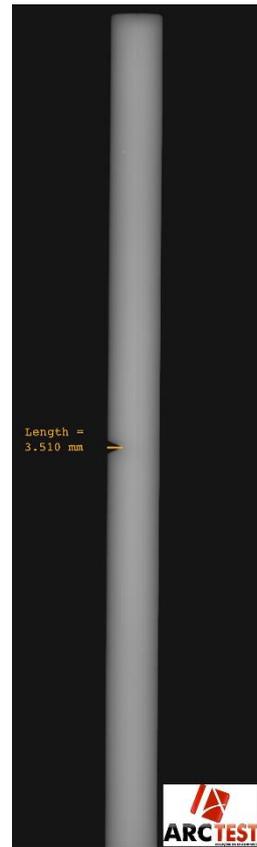
CP6



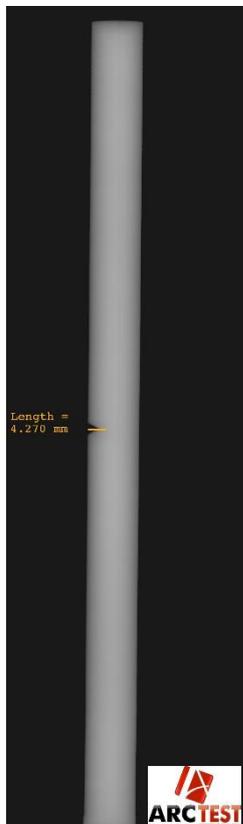
CP7



CP8



CP9



CP10

