



MAURICIO TROMBINI

**Avaliação da técnica de ultrassom *phased array*
para a otimização do controle de qualidade em
aços laminados e forjados.**

CAMPINAS
2015

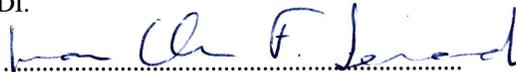
MAURICIO TROMBINI

**Avaliação da técnica de ultrassom *phased array*
para a otimização do controle de qualidade em
aços laminados e forjados.**

Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica, na Área de Materiais e processos de fabricação.

Orientador: Professora Dra. Maria Clara Fillipini Ierardi

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELO ALUNO MAURICIO TROMBINI, E ORIENTADO PELA PROF(A). DR(A) MARIA CLARA FILLIPINI IERARDI.



ASSINATURA DA ORIENTADORA

CAMPINAS
2015

Agência(s) de fomento e nº(s) de processo(s): Não se aplica.

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Luciana Pietrosanto Milla - CRB 8/8129

T75a Trombini, Mauricio, 1972-
Avaliação da técnica de ultrassom phased array para a otimização do controle de qualidade em aços laminados e forjados / Mauricio Trombini. – Campinas, SP : [s.n.], 2015.

Orientador: Maria Clara Fillipini Ierardi.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Ultrassom. 2. Aço. 3. Detectabilidade. 4. Otimização. I. Ierardi, Maria Clara Fillipini. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Evaluation of phased array ultrasonic technique to optimize the quality control in rolled and forged steel.

Palavras-chave em inglês:

Ultrasound

Steel

Detectability

Optimization

Área de concentração: Materiais e Processos de Fabricação

Titulação: Mestre em Engenharia Mecânica

Banca examinadora:

Maria Clara Fillipini Ierardi [Orientador]

Cecilia Amelia de Carvalho Zavaglia

Leonardo Taborda Sandor

Data de defesa: 09-11-2015

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Mecânica

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE MATERIAIS E PROCESSOS DE
FABRICAÇÃO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADEMICO

Avaliação da técnica de ultrassom *phased array*
para a otimização do controle de qualidade em
aços laminados e forjados.

Autor: Mauricio Trombini

Orientador: Maria Clara Fillipini Ierardi

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:



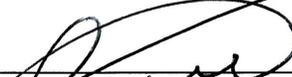
Profa. Dra. Maria Clara Fillipini Ierardi, Presidente.

Instituição: Universidade Estadual de Campinas



Profa. Dra. Cecilia Amélia de Carvalho Zavaglia

Instituição: Universidade Estadual de Campinas



Dr. Leonardo Tabor da Sandor

Instituição: Villares Metals S/A

Campinas, 09 de Novembro de 2015.

Dedicatória

Dedico este trabalho aos meus pais José Carlos Trombini e Maria Luisa Iovino Trombini pelo apoio constante e por sempre mostrarem durante minha vida que a educação, o respeito e o conhecimento são os bens mais importantes adquiridos pelo ser humano.

Agradecimentos

Primeiramente a Deus, pelo dom da vida, paz e saúde para concretizar nossos sonhos, estudos e projetos.

Aos meus pais José Carlos Trombini e Maria Luisa Iovino Trombini pelo incansável incentivo, apoio e contribuição para a minha formação e realização deste trabalho.

Ao colega de trabalho Leonardo Taborda Sandor que me direcionou desde o início até o final deste período de estudos.

A minha filha Ana Beatriz Pelloni Trombini e esposa Ana Carolina Pelloni Trombini por serem o motivo de inspiração, preparação para o futuro e muito cooperarem para a concretização deste trabalho.

A empresa que trabalho pela oportunidade de crescimento profissional e realização deste trabalho.

A minha orientadora Maria Clara Fillipini Ierardi, por sua presença e direcionamento dado a esta pesquisa.

*Como é feliz o homem que acha a sabedoria,
O homem que obtém o entendimento e conhecimento,
Pois a sabedoria é mais proveitosa do que a
Prata e rende mais do que o ouro.
Provérbios 3: 13,14.*

Resumo

TROMBINI, Mauricio. Avaliação da técnica de ultrassom *phased array* para a otimização do controle de qualidade em aços laminados e forjados, 2015 119p. Dissertação [Mestrado]. Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

A inspeção pelo método do ensaio não destrutivo por ultrassom em materiais para aplicação industrial tem o objetivo de controlar a qualidade dos produtos, constatar se os mesmos estão de acordo com as normas aplicáveis, prevenir acidentes, reduzir custos, preservar a vida e o meio ambiente. Atualmente, as inspeções realizadas pelo método do ensaio não destrutivo por ultrassom tem sido cada vez mais exigentes devido à aplicação pela qual o material inspecionado é submetido, podendo ser para áreas como aeroespacial, petrolífera, química, geração de energia, entre outras. Para atendimento dessas exigências crescentes, há uma necessidade de migração da inspeção manual por ultrassom conhecida como contato direto ou convencional, para a inspeção por ultrassom *phased array* automatizada. Os principais fatores que determinam essas necessidades são o aumento da detectabilidade de indicações, confiabilidade e velocidade de inspeção quando utilizamos a inspeção por ultrassom automatizada *phased array*. Esta técnica de inspeção por ultrassom conhecida por *phased array* já tem sido utilizada na indústria em vários tipos de materiais, considerando diferentes composições químicas de materiais, geometrias e perfis. A inspeção por ultrassom automatizada pela técnica de *phased array* tem características diferentes quando comparadas com a técnica do contato direto manual convencional. Essas características são apresentadas neste trabalho que tem por objetivo mostrar que no ultrassom *phased array* o nível de detectabilidade de indicações é 100%, atingindo maior produção de inspeção quando comparado com o ultrassom convencional que tem confiabilidade de aproximadamente 75%, sendo assim mais eficaz e consequentemente atendendo normas de inspeções mais rigorosas e mercados mais exigentes. Os materiais utilizados para obter essa conclusão são aços de perfil redondo maciços e processos de fabricação forjados e laminados.

Palavras Chave: Ultrassom, *phased array*, ensaios não destrutivos.

Abstract

The inspection by ultrasonic non-destructive testing in materials for industrial application has the goal to control products quality, verify if they are in accordance with applicable standards, prevent accidents, reduce costs, preserves life and environment. Nowadays, inspections performed by the method non-destructive testing of ultrasound have been more demanding due to the application that these materials are submitted, that can be to aerospace, petroleum, chemical, energy, and others. To satisfy these upraising demanding, there is a necessity to migrate from manual ultrasonic inspection, known as direct contact or conventional to the *phased array* automated ultrasonic inspection. The main factors that determine these necessities are the improvement in indications detectability, reliability and inspection speed when using the *phased array* automated ultrasonic inspection. The *phased array* automated ultrasonic inspection technique has been used in industries, considering different chemical compositions in materials, geometries e profiles. The automated ultrasonic inspection by *phased array* technique has different characteristics when compared to the conventional direct contact technique. These characteristics are presented in this work that has the goal to show that the *phased array* ultrasonic technique the detectability level reaches 100%, accomplishing higher inspection production when compared with conventional ultrasonic testing which reaches approximately 75% and therefore is more effective, meeting more rigorous standards and more demanding markets consequently. The materials used to accomplish this conclusion are steels in round profile and in rolled and forged manufacturing process.

Keywords: ultrasound, phased array, nondestructive testing.

Lista de Ilustrações

Figura 2.1- Espectro de frequência sonora [Andreucci, 2014].	23
Figura 2.2 - Ondas das águas de lagoas [www.aulas-fisica-quimica.com, 2015].	26
Figura 2.3 - Elementos de uma onda [Halliday et al, 2012].	28
Figura 2.4 - Diagrama do esquema do ensaio por ultrassom convencional [Santin, 2003].	31
Figura 2.5 - Foto do aparelho de ultrassom [Indústria siderúrgica, 2015].	32
Figura 2.6 - Classificação das zonas do campo ultrassônico [Marks, 2009].	34
Figura 2.7 - Cristal de um transdutor convencional de ultrassom.	35
Figura 2.8 - Esquema do ultrassom <i>phased array</i> [Bolten, 2014].	38
Figura 2.9 - Cristais de um transdutor <i>phased array</i> de ultrassom [Olympus NDT, 2012].	40
Figura 2.10 - A varredura eletrônica faseada [Bolten, 2014].	40
Figura 2.11 - Transdutor <i>phased array</i> [Ritcher et al, 2007].	41
Figura 2.12 - Aplicação do método de ultrassom manual convencional em uma peça de aço com espessura de 180 mm [Indústria siderúrgica, 2015].	43
Figura 2.13 - Inspeção de material forjado via ultrassom manual [Indústria siderúrgica, 2015].	44
Figura 2.14 - Técnica de imersão [Andreucci, 2014].	45
Figura 2.15 - Técnica da transparência [Andreucci, 2014].	45
Figura 2.16 - Vistas de apresentação do ultrassom <i>phased array</i> [Davis, 2006].	47
Figura 2.17 - O aparelho <i>phasor</i> de ultrassom <i>phased array</i> [Indústria Siderúrgica, 2015].	47
Figura 2.18 - O equipamento de inspeção <i>phased array</i> automatizado [Indústria Siderúrgica, 2015].	49
Figura 2.19 - A cobertura da inspeção automatizada <i>phased array</i> [Olympus NDT, 2012].	49
Figura 2.20 - O aparelho USN 60 com a curva DGS ligada [Indústria Siderúrgica, 2015].	51
Figura 2.21 - Configuração dos transdutores para a inspeção [Olympus NDT, 2012].	52
Figura 2.22 - Barra transportada em cada cassete [Indústria Siderúrgica, 2015].	53
Figura 2.23 - Os módulos de ultrassom [Indústria siderúrgica, 2015].	53
Figura 2.24 - O diagrama DGS [Krautkammer, 2001].	55
Figura 2.25 - Representação de tamanho equivalente [Krautkammer, 2001].	58
Figura 2.26 - Determinação do tamanho equivalente de uma descontinuidade [Krautkammer, 2001].	58

Figura 2.27 - Indicação típica de inclusão não metálica - micrografia realizada em laboratório [Indústria siderúrgica, 2014].....	60
Figura 2.28 - Indicação típica de dobra de laminação - micrografia realizada no Laboratório metalográfico [Indústria siderúrgica, 2014].	61
Figura 2.29 - O olho humano [Rais, 2015].....	63
Figura 2.30 - Sistema de visão para a segurança [Bertovic et al, 2013].....	65
Figura 2.31 - O modelo SHELL [Rais, 2015].....	66
Figura 2.32 - Acidente aéreo da Aloha Airlines [Rais, 2015].	67
Figura 2.33 - Acidente aéreo do voo 232 da United Airlines [Warren, 1990].	68
Figura 2.34 - Acidente com plataforma da British Petroleum [National, 2011].	69
Figura 2.35 - Resultados de inspeção manual x automatizado [Carvalho et al, 2006].....	71
Figura 2.36 - Típica curva de POD [Rummel, 2015].	73
Figura 3.1 - Demonstração da relação sinal ruído no equipamento USN 60 [Indústria siderúrgica, 2015].....	77
Figura 3.2 - Demonstração de relação sinal ruído no equipamento <i>phased array</i> , [Indústria Siderúrgica, 2015].	77
Figura 3.3 - Demonstração de repetitividade no equipamento <i>phased array</i> [Indústria siderúrgica, 2015].....	79
Figura 3.4 - Coberturas radial e axial [Bolten, 2014].	80
Figura 3.5 - Desenho do padrão de calibração estática de ultrassom - Procedimento interno F99.215 - Ensaio por ultrassom <i>phased array</i> em barras laminadas e forjadas [Indústria siderúrgica, 2014].	83
Figura 3.6 - Calibração das Sondas do Cassete C 105 [Indústria Siderúrgica, 2014].	84
Figura 3.7 - Calibração das Sondas do Cassete C 160 [Indústria Siderúrgica, 2014].	85
Figura 3.8 - Calibração das Sondas do Cassete C 215 [Indústria Siderúrgica, 2014].	85
Figura 3.9 - Desenho do padrão de calibração dinâmica de ultrassom - Procedimento interno F99.215 - ensaio por ultrassom <i>phased array</i> em barras laminadas e forjadas, [Indústria siderúrgica, 2014].	87
Figura 5.1 - Gráfico POD para indicações superficiais detectadas por ultrassom manual.....	93
Figura 5.2 - Gráfico POD para indicações superficiais detectadas por ultrassom automatizado..	94
Figura 5.3 - Gráfico POD para indicações internas detectadas por ultrassom manual	94

Figura 5.4 - Gráfico POD para indicações internas detectadas por ultrassom automatizado..... 95

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Principais diferenças entre o ultrassom convencional e o <i>phased array</i> automatizado	54
Tabela 4.1 - Identificações das medições das indicações pelo cassete C 105 E USN 60.....	90
Tabela 4.2 - Identificações das medições das indicações pelo cassete C 160 E USN 60.....	91
Tabela 4.3 - Identificações das medições das indicações pelo cassete C 215 e USN 60	92
Tabela 5.1 - Unificação dos resultados obtidos	96
Tabela 5.2 - Defeitos naturais internos X DGS	99

Lista de Abreviaturas e Siglas

Letras Gregas

ρ - Massa específica

[kg/m³]

μ - Microns

Abreviações

APD - *Axial pulse density*

CP - Correntes parasitas.

DAC - Correção da amplitude pela distância

DGS - Distância, ganho e tamanho.

END - Ensaio não destrutivo

FBH - *Flat bottom hole*

FFP - Furo de fundo plano

F- Frequência

GE - *General Electric*

LP - Líquido penetrante

MSA - *Measure system analyzes*

NDT - *Non destructive testing*

PA - *Phased array*

PM - Partículas magnéticas

POD - *Probability of detection*

PRF - *Pulse repetition frequency*

RPD - *Radial pulse density*

SDH - *Side drilled hole*

SNR - *Signal to noise ratio*

TOFD - *Time of flight diffraction*

USN 60 - *Aparelho de ultrassom*

V - *Velocidade do som*

Unidades de medidas

dB - *Decibel*

Hz - *Hertz*

mm - *Milímetros*

Siglas

AMS - *Aerospace material Specification*

ASTM - *American Society for Testing and Materials*

EN - *European Standard*

NASA - *National Aeronautics and Space Administration*

Sumário

1. INTRODUÇÃO.....	18
1.1. OBJETIVO.....	20
2. REVISÃO DA LITERATURA	21
2.1. OBJETIVO DO ENSAIO POR ULTRASSOM.....	23
2.2. VANTAGENS E DESVANTAGENS EM RELAÇÃO A OUTROS ENSAIOS.....	24
2.3. CONCEITOS BÁSICOS DO ENSAIO POR ULTRASSOM CONVENCIONAL.....	26
2.3.1. PRINCÍPIOS FÍSICOS.....	26
2.4. OS TRANSDUTORES DE ULTRASSOM.....	29
2.4.1. O TRANSDUTOR DE ULTRASSOM CONVENCIONAL.....	34
2.4.2. CONCEITOS BÁSICOS DO ULTRASSOM <i>PHASED ARRAY</i>	35
2.4.3. O TRANSDUTOR <i>PHASED ARRAY</i> DE ULTRASSOM.....	38
2.5. TÉCNICAS DE INSPEÇÃO.....	41
2.5.1. O ULTRASSOM CONVENCIONAL.....	42
2.5.2. O ULTRASSOM <i>PHASED ARRAY</i> AUTOMATIZADO.....	46
2.6. O FUNCIONAMENTO DO EQUIPAMENTO CONVENCIONAL DE ULTRASSOM.....	50
2.7. O FUNCIONAMENTO DO EQUIPAMENTO AUTOMATIZADO <i>PHASED ARRAY</i>	51
2.8. O DIAGRAMA DGS.....	54
2.8.1. O TAMANHO DO REFLETOR EQUIVALENTE.....	55
2.9. INDICAÇÕES ENCONTRADAS NO AÇO.....	59
2.9.1. INCLUSÕES.....	59
2.9.2. DOBRAS DE LAMINAÇÃO.....	61
2.10. PESQUISAS APLICADAS.....	62
2.10.1. PESQUISAS SOBRE OS FATORES HUMANOS APLICADOS AOS ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS.....	62
3. MODELAGEM TEÓRICA.....	73
3.1. A RELAÇÃO SINAL RUÍDO.....	75
3.2. A REPETITIVIDADE.....	78
3.3. VELOCIDADE MÁXIMA DE INSPEÇÃO.....	79

3.4.	O COMPRIMENTO DAS PONTAS NÃO TESTADAS.....	81
3.5.	PARÂMETROS DE CALIBRAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS UTILIZADOS.....	81
3.6.	PARÂMETROS DE CALIBRAÇÃO DINÂMICA DO EQUIPAMENTO PA.....	86
3.7.	EQUIPE OPERACIONAL.....	88
4.	ANÁLISE EXPERIMENTAL	88
5.	RESULTADOS E DICUSSÕES.....	93
6.	CONCLUSÃO.....	101
	Referências	103
	ANEXO A – FOTOS, METALOGRAFIA, AMPLITUDE DE SINAIS NAS TELAS DO ULTRASSOM AUTOMATIZADO E MANUAL PARA INDICAÇÕES SUPERFICIAIS NO CASSETE C 105	108
	ANEXO B – FOTOS, METALOGRAFIA, AMPLITUDE DE SINAIS NAS TELAS DO ULTRASSOM AUTOMATIZADO E MANUAL PARA INDICAÇÕES INTERNAS NO CASSETE C 105	110
	ANEXO C – FOTOS, METALOGRAFIA, AMPLITUDE DE SINAIS NAS TELAS DO ULTRASSOM AUTOMATIZADO E MANUAL PARA INDICAÇÕES SUPERFICIAIS NO CASSETE C 160.....	112
	ANEXO D – FOTOS, METALOGRAFIA, AMPLITUDE DE SINAIS NAS TELAS DO ULTRASSOM AUTOMATIZADO E MANUAL PARA INDICAÇÕES INTERNAS NO CASSETE C 160	114
	ANEXO E – FOTOS, METALOGRAFIA, AMPLITUDE DE SINAIS NAS TELAS DO ULTRASSOM AUTOMATIZADO E MANUAL PARA INDICAÇÕES SUPERFICIAIS NO CASSETE C 215	116
	ANEXO F – FOTOS, METALOGRAFIA, AMPLITUDE DE SINAIS NAS TELAS DO ULTRASSOM AUTOMATIZADO E MANUAL PARA INDICAÇÕES INTERNAS NO CASSETE C 215	118

1. INTRODUÇÃO

A inspeção por ensaios não destrutivos é muito utilizada na indústria siderúrgica, agropecuária, petrolífera, papel e celulose, geração de energia, química, medicina, limpeza e outras. Os Ensaios Não Destrutivos (END) são técnicas utilizadas para inspeção de produtos, diferentes materiais e equipamentos em suas etapas de fabricação, manutenção e em seu acabamento final. Os END são uma ferramenta importante utilizada no controle de qualidade dos itens supracitados, contribuindo para a competitividade e de acordo com a técnica utilizada e domínio sobre sua utilização, sendo um diferencial para quem os utiliza. Os END incluem métodos que tem capacidade de informar com precisão a quantidade de indicações ou defeitos de que um determinado material contém, bem como sua localização seja ela interna ou superficial em um determinado material [www.abendi.org.br, 2015]. Os END também têm capacidade de informar as características tecnológicas de um material, bem como realiza a monitoração da degradação, ou seja, corrosão através de medição de espessura de componentes, peças, equipamentos e estruturas que estejam em serviço. Ainda analisa as propriedades físicas de um determinado material, por exemplo, constantes elásticas, estruturas metalúrgicas, tamanhos de grão. Para os END obterem resultados satisfatórios e válidos, é fundamental a qualidade do equipamento utilizado para realizar a inspeção, além da qualificação e certificação do pessoal que os realiza e das normas e procedimentos utilizados para a calibração desses equipamentos e inspeção [www.abendi.org.br, 2015].

Os principais métodos de END utilizados para a inspeção de materiais e produtos são as de correntes parasitas, emissão acústica, ensaio visual, estanqueidade, líquido penetrante, partículas magnéticas, radiografia, termográfica e ultrassom [Moore, 2007]. Um dos métodos de END muito utilizados na indústria é o de ultrassom, que é um método que permite avaliar e inspecionar um determinado material ou produto sem danificá-lo ou destruí-lo, isto é, sem prejudicar seu uso posterior [Workman, 2007]. Para que o END de ultrassom apresente resultados eficazes e confiáveis para garantir a qualidade dos materiais, bem como a confiabilidade das inspeções é obrigatório que este ensaio seja realizado por pessoal treinado, qualificado e certificado. Além disso, é obrigatório que os equipamentos utilizados para inspeções manuais ou automatizadas por ultrassom sejam calibrados periodicamente para a garantia de resultados satisfatórios. O ensaio

não destrutivo por ultrassom também é muito utilizado na medicina, principalmente no controle pré-natal realizado durante o período de gestação de uma mulher grávida. Da mesma maneira que o controle utilizando o ultrassom é realizado no corpo humano avaliando a saúde de um feto, acompanhamento e desenvolvimento de seu crescimento e identificação do seu sexo sem prejudicar a sua saúde e de sua mãe, o ensaio não destrutivo por ultrassom é aplicado na indústria, porém para controlar a qualidade de materiais e produtos também sem prejudicar seu uso futuro e nem do inspetor que o realiza. Na indústria, o END de ultrassom, que conforme dito anteriormente é largamente utilizado, tem se desenvolvido ao longo dos anos. No Brasil, há aproximadamente 20 anos atrás a inspeção por ultrassom na indústria era realizada principalmente manualmente utilizando aparelhos de ultrassom portáteis [Santin, 2003]. As inspeções eram realizadas por inspetores experientes e qualificados e utilizavam equipamentos portáteis de ultrassom analógicos, que embora sejam cada vez menos utilizados e ainda existam, não fornecem um grau de confiabilidade de inspeção eficaz e dependem essencialmente do ser humano para a interpretação de resultados de inspeções. Ao longo dos últimos anos, as empresas perceberam a necessidade utilizar de aparelhos portáteis digitais de inspeção por ultrassom, pois os resultados de inspeção têm mais consistência, devido fundamentalmente ao sinal digital ter valores discretos, com números descontínuos no tempo e na amplitude diminuindo a faixa de frequência entre eles e a oscilação de resultados. Enquanto o sinal analógico apresenta variações infinitas entre cada um de seus valores. Os aparelhos de ultrassom digitais são muito utilizados atualmente e os inspetores que operam esses equipamentos também devem possuir experiência e qualificação e mesmo com melhores qualidades de resultados de inspeções, ainda dependem do ser humano para a interpretação de resultados de inspeções.

Diante do aumento de competitividade e globalização, as empresas buscaram eficiência para enfrentar os desafios da produtividade e confiabilidade de inspeção, por isso foi necessário o investimento em equipamentos automatizados aonde teoricamente é possível atingir alta produtividade e confiabilidade de inspeção. Assim, equipamentos automatizados de inspeção por ultrassom e outros métodos não destrutivos foram substituindo as inspeções manuais diminuindo a dependência humana em relação aos resultados de inspeção. No caso do ensaio por ultrassom, os equipamentos automatizados inicialmente desenvolvidos a partir dos anos 90 eram essencialmente conhecidos por convencionais. Porém, com a constante busca por melhorias, necessidade de atendimento de especificações de clientes cada vez mais exigentes e a própria

sobrevivência no mercado competitivo das indústrias, um diferencial importante ainda é a qualidade do produto fornecido. Para atendimento desta qualidade de produto, a qualidade de inspeção se torna essencial. Portanto, os investimentos em equipamentos de inspeções automatizadas por ultrassom continuam sendo importantes e a tecnologia mais atualizada é a conhecida por *phased array*, com disponibilidade tanto em equipamentos portáteis como automatizados. A indústria siderúrgica que tem aplicação de seus materiais na indústria automotiva, ferroviária, aeroespacial, geração de energia, óleo e gás, implantes cirúrgicos, entre outras vem buscando esses equipamentos devido a essas complexas aplicações para garantir a integridade de todo o aço produzido. E para garantir a integridade do aço produzido, o mesmo deve ser totalmente inspecionado pelo método não destrutivo de ultrassom, pois eventualmente durante o processo de fabricação destes materiais podem ocorrer descontinuidades nos mesmos. Se detectadas durante o processo de fabricação através do ensaio por ultrassom, essas descontinuidades podem ser aprovadas ou não conforme os critérios de especificação aplicáveis. Se as descontinuidades reprovadas conforme critérios de especificação não forem detectadas durante a etapa de fabricação, o material pode ir para a aplicação final e ocasionar danos de diversas ordens. Tendo em vista que esses danos podem ser de grande impacto, ou seja, acidentes fatais, ambientais, recalls, entre outros, este trabalho desenvolvido mostra a importância da inspeção pelo ensaio não destrutivo de ultrassom para controlar a qualidade dos materiais, constatar o atendimento de normas e especificações aplicáveis, prevenir acidentes, preservar a vida e o meio ambiente e reduzir custos.

1.1. Objetivo

O objetivo deste trabalho é mostrar as principais características do método não destrutivo de ultrassom e sua importância aplicada a materiais e peças na área industrial, especificamente o aço, utilizando equipamentos de inspeção por tal método. Em seguida, é realizada uma comparação entre resultados de inspeção por ultrassom pelas técnicas convencional manual e

automatizada *phased array*. Serão apresentadas as comparações entre os equipamentos de inspeção por ultrassom utilizados através de testes com aços de diferentes composições químicas e qualidades que contêm descontinuidades de ordem natural. Após a comparação, conclui-se qual é o nível de eficácia de cada técnica em relação à detectabilidade de indicações e outros parâmetros importantes para a prática eficiente da inspeção por ultrassom no aço.

A motivação para a realização deste trabalho é obter na prática quais são os níveis de mínima descontinuidade detectável por ultrassom pelas técnicas convencional manual e automatizada *phased array* para determinados equipamentos e material. Em seguida, difundir o assunto tanto para os responsáveis pelos ditos equipamentos, como para a área da tecnologia da Indústria Siderúrgica empresa que foi realizada este trabalho e que possui ambos os equipamentos de ultrassom.

Adicionalmente, poder contribuir para que elevar o estado atual de detectabilidade para outro mais desenvolvido e confiável. Também como motivação, a busca constante pelo conhecimento que entendemos ser cada vez mais necessário para nos adequarmos às constantes mudanças no mercado de trabalho e pessoais. Sabendo que o mercado mundial está em constante mudança e os responsáveis pelas mudanças são os seres humanos, então estes também devem se adequar, reciclar e buscar conhecer como manterem-se ativos e vivos tanto profissionalmente como pessoalmente. Para isso, acredita-se que deve-se estar em constante crescimento, pois este é infinito. E, a melhor maneira de se obter crescimento é a busca pelo conhecimento, seja o conhecimento profissional, pessoal, espiritual ou de qualquer outro campo.

2. REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo apresenta uma revisão bibliográfica da teoria de ultrassom bem como os artigos pesquisados sobre as comparações e aplicações das inspeções de ultrassom para as técnicas convencionais e automatizadas na indústria. Adicionalmente, apresenta uma nova aplicação de comparação das técnicas convencionais e automatizadas considerando o tipo de material e tecnologia utilizados.

Sons de origens graves ou agudos que são inaudíveis pelo ouvido humano, devido à sua frequência muito baixa ou muito alta formam a origem do entendimento do ensaio por ultrassom [Andreucci, 2014]. A figura 2.1 mostra o espectro de frequência audível pelo ser humano e demonstra as vibrações com frequências muito baixas denominadas infrassom que vão até 20 Hz e com frequências muito altas denominadas ultrassom que são acima de 20 kHz. Apesar das frequências ultrassônicas serem consideradas acima de 20 kHz, a faixa de frequência mais utilizada para o ensaio por ultrassom é acima de 500 kHz até 15 MHz para aplicações industriais. No caso de aplicações para a medicina as frequências utilizadas são da ordem de 20 a 25 MHz. Os sons produzidos ou emitidos em um determinado ambiente refletem nas paredes que o constituem podendo ser transmitidos a outros ambientes e são a base para o entendimento do ensaio por ultrassom em materiais [Andreucci, 2014]. Antigamente já se usava a diferença de sons gerados por materiais com a presença de defeitos para a avaliação da integridade de uma peça em serviço. Desde aquela época era necessária a detecção e caracterização de defeitos em materiais para verificar a condição de sua utilização ou substituição [Workman, 2007]. Um exemplo desta aplicação era a inspeção realizada em trilhos ferroviários e sinos de igrejas através do som produzido pelo impacto martelo no material que caracterizava a presença de indicações que podem ser defeitos ou trincas pelo tipo de som gerado. Desde então o princípio o método para identificação de defeitos através do som continua o mesmo [Andreucci, 2014]. O avanço foi tecnológico, ou seja, foi descoberto em 1880 pelos irmãos Curie que cristais produzem corrente elétrica quando submetidos à pressão da mesma maneira que o martelo quando impactava o sino devido ao efeito da piezo eletricidade que transforma energia elétrica em mecânica e vice versa, porém os cristais em uma frequência muito mais alta que é inaudível pelo ser humano [Miranda, 2014]. O avanço tecnológico continuou até atingir níveis aonde a instrumentação eletrônica e informática, através de aparelhos e acessórios de ultrassom, atualmente possibilitam a detecção, localização e interpretação de reflexões provenientes do interior de uma peça e prováveis falhas que possam existir com grande precisão [Marks, 2009].

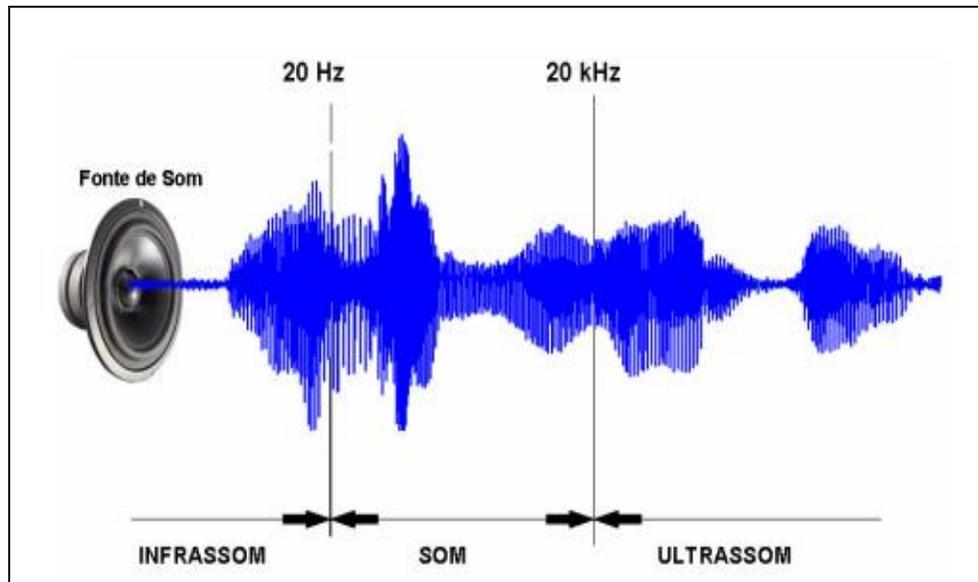


Figura 2.1- Espectro de frequência sonora [Andreucci, 2014].

2.1. Objetivo do ensaio por ultrassom

O objetivo do ensaio por ultrassom aplicado na indústria é detectar discontinuidades internas e em até certo grau superficiais e sub superficiais existentes em diferentes tipos ou formas de materiais ferrosos ou não ferrosos [Andreucci, 2014]. Tais discontinuidades são geradas no processo de fabricação do material caracterizados, por exemplo, por porosidade, escória, inclusões ou flocos em materiais forjados, dobras de laminação e micro trincas em materiais laminados [Colpaert, 2008]. Por isso, o ensaio por ultrassom, assim como qualquer ensaio não destrutivo tem o objetivo de garantir a qualidade e diminuir o grau de incerteza na utilização de materiais para aplicações industriais [Santin, 2003]. Atualmente o ensaio por ultrassom é muito realizado na área industrial aplicado a diversos tipos de materiais, conforme descrito anteriormente. O ensaio por ultrassom é aplicável no aço, alumínio, madeira, concreto, entre outros, principalmente para substituir o ensaio radiográfico, pois não é necessária a utilização de proteção radiológica para sua realização [Moore, 2007].

Para efeitos de definição, [Novais, 2010] descreve que uma descontinuidade também conhecida pelo nome de indicação, é uma interrupção na estrutura do material, ou seja, a falta de homogeneidade nas suas características metalúrgicas e não necessariamente é um defeito. Um defeito é uma falha ou conjunto de imperfeições, que torna o material ou parte dele, incapaz de atender aos requisitos mínimos de aceitação de sua norma de fabricação, denotando rejeição. Desta maneira, define-se que todo defeito é uma descontinuidade, mas nem toda descontinuidade é um defeito.

2.2. Vantagens e desvantagens em relação a outros ensaios

O ensaio não destrutivo por ultrassom tem um grande poder de penetração e alta sensibilidade para a detecção de pequenas indicações internas, superficiais e sub superficiais como trincas ou inclusões e outras indicações de difícil detecção, por exemplo, por radiografia ou qualquer outro método de ensaio não destrutivo [Miranda, 2014]. O ensaio por ultrassom não prejudica a saúde do ser humano ou inspetor que o realiza, pois não exige planos especiais de proteção radiológica e segurança para sua aplicação como, por exemplo, o método não destrutivo de radiografia [Conklin, 2009]. O ensaio por ultrassom é uma inspeção rápida, pois em caso de detecção de indicações, a sua interpretação dispensa processos intermediários e o registro de resultados é imediato. Para efeitos de comparação, no caso do uso do ensaio não destrutivo por radiografia ou gamagrafia aplicados à indústria, existe a necessidade da revelação do filme utilizado, que demanda tempo para informar e relatar os resultados. A localização, avaliação do tamanho e interpretação das descontinuidades encontradas em materiais pelo ensaio de ultrassom são fatores intrínsecos, pois o ensaio por ultrassom possui alta sensibilidade e grande poder de penetração [Marks, 2009]. Outros ensaios não destrutivos não possuem tais fatores. Por exemplo, um defeito mostrado num filme radiográfico define o tamanho, mas não sua profundidade [Moore, 2007]. No caso da detecção de uma indicação pelo ensaio não destrutivo de correntes parasitas ou partículas magnéticas também não é possível saber a que profundidade precisamente a indicação está, ao menos que a indicação seja destruída e sua profundidade caracterizada em laboratório [Udpa, 2004]. E em várias situações a localização de uma indicação é um fator

fundamental para realizar um reparo ou retrabalho do material inspecionado [Hellier, 2001]. O ensaio ultrassônico é limpo, ou seja, não utiliza de produtos químicos pesados para a sua realização, o que é favorável no sentido ambiental [Moore, 2007]. O único produto químico utilizado é o acoplante que tem sua composição química à base de água. Em outras situações, o ensaio por ultrassom utiliza óleo como acoplante, que pode ser reaproveitado por várias vezes.

Em relação às desvantagens do ensaio por ultrassom, este exige grande conhecimento teórico, prático e experiência do inspetor que o realiza, tanto para aplicação do ultrassom convencional como o *phased array*, pois o ultrassom envolve física aplicada a relação entre a teoria e a prática do ensaio é fundamental para a interpretação de resultados de inspeção [Andreucci, 2014]. No caso específico do ultrassom *phased array*, o conhecimento exigido é maior ainda, pois os parâmetros de calibração e inspeção são mais complexos. Faixas de espessuras muito finas são complexas para a aplicação do método devido ao fenômeno conhecido por campo próximo que é definido no item 2.4 deste trabalho. É mandatório o preparo da superfície para sua aplicação. Peças de geometria irregular são um agravante e limitante para a realização do ensaio. É necessário o uso de acoplante e de blocos padrões e referência ou para calibrações e ajustes de sensibilidade do ensaio [Miranda, 2014]. A tabela 2.1 mostra as principais diferenças entre os END de ultrassom, radiografia e líquido penetrante.

Tabela 2.1 – Comparação do ultrassom em relação a outros END.

Ultrassom	Radiografia	Líquido penetrante
Sensível	Sensível	Sensível somente na superfície
Não prejudica a saúde do operador	Prejudica a saúde do operador	Não prejudica a saúde do operador
Inspeção rápida	Inspeção lenta	Inspeção lenta
Permite a localização precisa de indicações	Não permite a localização precisa de indicações	Não permite a localização precisa de indicações
Limpo (favorável ao meio ambiente)	Não favorável ao meio ambiente	Não favorável ao meio ambiente

2.3. Conceitos básicos do ensaio por ultrassom convencional

2.3.1. Princípios Físicos

Para a compreensão do ensaio por ultrassom é necessário entender o que é uma onda. Onda é uma vibração periódica que se propaga através de um meio. Um exemplo prático para melhor entendimento da formação de uma onda é mostrado na figura 2.2 quando atiramos uma pedra nas águas de uma lagoa. No ponto em que a pedra atingir a água, ocorrerá uma movimentação na mesma [Halliday et al , 2012]. Essa movimentação se propagará em todas as direções da superfície. Se colocarmos uma rolha flutuando nessa lagoa e atirmos novamente a pedra, percebermos que esta rolha não sairá do lugar e oscilará, acompanhando o movimento da água, de cima para baixo quando a onda se movimenta horizontalmente. Assim concluímos que toda onda transmite energia, sem transportar matéria [Workman, 2012].

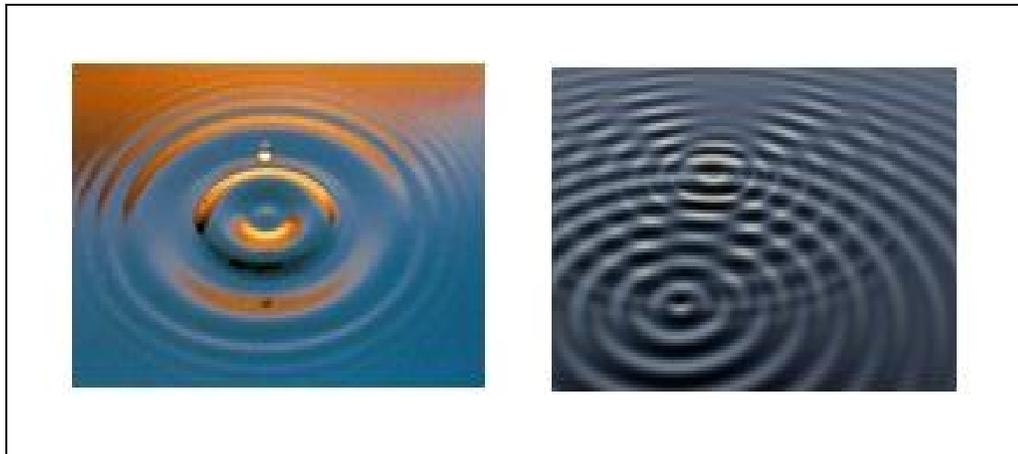


Figura 2.2 - Ondas das águas de lagoas [www.aulas-fisica-quimica.com, 2015].

As ondas são classificadas quanto à sua natureza e sentido de propagação. Quanto à natureza podem ser mecânicas ou eletromagnéticas [Miranda, 2014].

A onda mecânica é composta de oscilações de partículas no meio em que se propaga, ou seja, dependem de um meio material para se propagar, seja ele sólido, líquido ou gasoso.

Exemplo: As cordas do violão. A onda sonora propaga-se através do meio que é ar até atingir os ouvidos dos seres humanos. A onda eletromagnética não necessita de um meio material para se propagar. Por exemplo, ao ligarmos uma lâmpada no vácuo é possível ver sua iluminação. Exemplo: luz, ondas de rádio, televisão, raios x [Workman, 2007].

Para completar o princípio do comportamento de uma onda, temos ainda que definir o sentido de sua propagação. As ondas podem ser classificadas em quatro tipos: A primeira são as ondas longitudinais ou de compressão, cujas partículas do meio vibram na mesma direção da propagação da onda, podendo ser transmitidas através de meios sólidos, líquidos e gasosos. Devido ao seu processo de propagação, a velocidade desta onda é maior do que a de uma onda transversal [Halliday et al, 2012].

Em segundo lugar as ondas transversais, de corte ou cisalhamento, cujas partículas do meio vibram na direção perpendicular ao de propagação, aonde os planos das partículas movem-se apenas verticalmente, podendo ser transmitidas somente a sólidos. Essas ondas transversais não se propagam nos meios líquidos ou gasosos, pela característica das ligações entre as partículas destes meios. Em terceiro lugar são as ondas superficiais ou de Rayleigh que se propagam na superfície dos meios sólidos [Halliday et al, 2012].

Devido ao movimento oscilatório das partículas da superfície, a velocidade de propagação da onda superficial é de aproximadamente 10% inferior que a de uma onda transversal [Golis, 2013]. Para ondas superficiais que se propagam com comprimento de onda próxima a espessura do material testado por ultrassom, a inspeção não se restringe somente a superfície, mas a todo o material e para este caso denominamos o quarto tipo de onda chamado de ondas de “Lamb” que podem ser geradas a partir das ondas longitudinais incididas através de um ângulo de inclinação [Andreucci, 2104]. Porém, o ensaio por ultrassom de materiais com ondas superficiais tem aplicações restritas, pois detecta indicações somente superficiais e nestes casos existem outros métodos não destrutivos mais baratos e simples que podem ser utilizados e que são os de líquidos penetrantes, partículas magnéticas e correntes parasitas ou o próprio ensaio por ultrassom pela técnica de *phased array* [Golis, 2013].

Os elementos de uma onda: Para a geração de ondas de ultrassom é importante conhecermos os elementos básicos de uma onda que podem ser observados na figura 2.3.

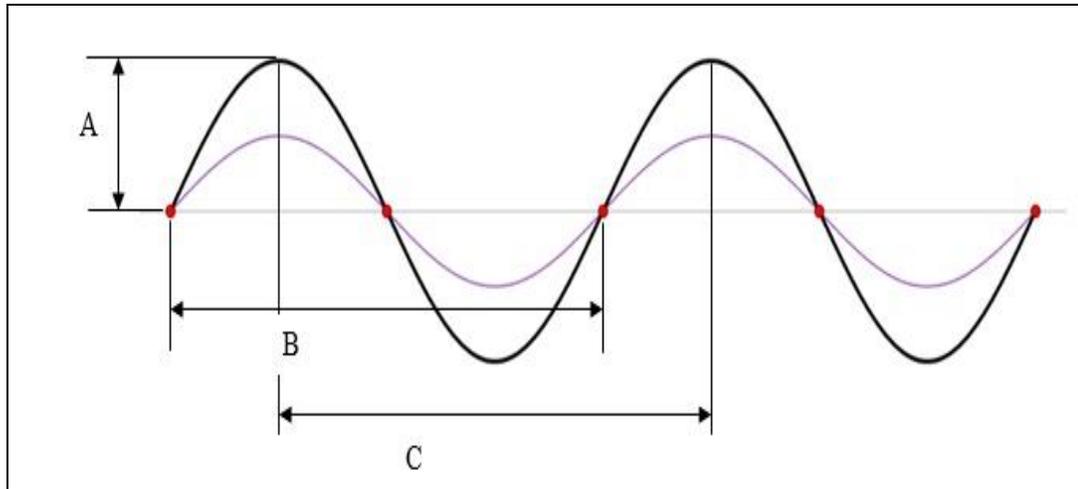


Figura 2.3 - Elementos de uma onda [Halliday et al, 2012].

A - Amplitude: é a altura da crista da onda, medida a partir da superfície.

B - Ciclo: movimento completo da onda, partindo de sua posição original e voltando a ela.

C - Comprimento de onda: é a distância de uma crista à outra.

Frequência: é o número de ciclos pela unidade de tempo e é dada em Hertz [Hz]

Velocidade de propagação: a velocidade de propagação de uma onda é relacionada com o meio que ela é propagada, ou seja, varia conforme o material. Por exemplo, a velocidade do som no ar é de aproximadamente 300 metros por segundo [Golis, 2013]. No caso da propagação do som em um meio sólido ou líquido a velocidade é maior, pois a estrutura que forma estes materiais é mais compacta, facilitando a propagação do som. No aço, a velocidade de propagação do som de uma onda longitudinal é de 5.920 metros por segundo. No caso da propagação de ondas transversais no aço a velocidade é de 3.230 metros por segundo. A velocidade de propagação do som via ondas longitudinais na água é de 1.480 metros por segundo [Golis, 2013]. Existe influência da temperatura em relação à velocidade do som, aonde a relação é inversa, isto é, como o aumento da temperatura do meio em que o som se propaga, há a diminuição da velocidade de propagação.

2.4. Os Transdutores de ultrassom

O transdutor de ultrassom é o componente ou acessório utilizado para emitir e receber a onda ou energia ultrassônica através do meio ou material inspecionado [Andreucci, 2014]. O transdutor é acoplado na superfície de um material através de um acoplante líquido que pode ser óleo, carboxi metil celulose, água ou quando se trabalha em temperaturas mais elevadas é possível a utilização de graxa. O sinal elétrico emitido pelo equipamento de ultrassom faz com que o cristal do transdutor vibre e envie o sinal que atravessa o material refletindo nas interfaces deste material os chamados ecos [Miranda, 2010]. A maneira mais comum de geração de ondas ultrassônicas é através do efeito piezométrico que é baseado no fato de que certos cristais geram corrente elétrica quando excitados mecanicamente à determinada frequência [Santin, 2003]. O elemento cristal de um transdutor que gera o efeito piezométrico pode ser construído através de vários tipos de materiais e existem elementos que emitem e recebem ondas ultrassônicas com diferentes qualidades. Os materiais piezométricos são, por exemplo, o quartzo, o sulfato de lítio, o Titanato de Bário, o Metaniobato de Chumbo e o Zirconato Titanato de Chumbo. O material piezométrico mais antigo é o quartzo que tem características de ser translúcido e duro como o vidro, podendo ser cortado a partir de cristais que podem ser encontrados no Brasil [Andreucci, 2014; Santin, 2003]. O Sulfato de Lítio é um cristal sensível à temperatura e pouco resistente. O Titanato de Bário e Zirconato Titanato de Chumbo são materiais cerâmicos que recebem o efeito piezométrico através de polarização. Esses dois cristais são os melhores emissores, produzindo impulsos ou ondas de grande energia, se comparadas com aquelas produzidas por cristais de quartzo. Para a inspeção ultrassônica é importante a qualidade de emissão e de recepção [Miranda, 2010]. A frequência ultrassônica gerada pelo cristal piezométrico dependerá da sua espessura que geralmente possui e quanto maior for a frequência utilizada, menor é a espessura do cristal. Por exemplo, a espessura de um cristal que gera uma frequência de 2 MHz é de aproximadamente 2 milímetros e de 1 milímetro para 4 MHz. [Andreucci, 2014]. Neste trabalho o tipo de cristal utilizado nos transdutores foi o Titanato de Bário tanto para a inspeção convencional como para a inspeção *phased array*. Este cristal é um material cerâmico e suas principais características são: boa eficiência como transmissor, regular eficiência como receptor, ótima sensibilidade, regular poder de resolução e mecanicamente frágil [Santin, 2003].

Conforme comentado anteriormente, a onda ou energia ultrassônica gerada é enviada e recebida pelo transdutor através do efeito conhecido por piezo eletricidade onde o transdutor é excitado a uma determinada frequência eletricamente através de vários volts e que produz vibrações mecânicas e vice-versa. As ondas ultrassônicas emitidas e transmitidas para um determinado material geram os chamados ecos. Esses ecos são provenientes das interfaces do material inspecionado que retornam ao transdutor e geram nele mesmo o sinal elétrico correspondente que pode ser visualizado na tela do equipamento de ultrassom [www.nde-ed.org, 2015]. O mesmo efeito direciona o resultado da inspeção para o equipamento de ultrassom através de um cabo coaxial em tempo real conforme figura 2.4 que mostra o diagrama do esquema do ensaio por ultrassom convencional. Da mesma maneira que o médico utiliza o transdutor de ultrassom para *scannear* ou varrer a barriga de uma mulher grávida para verificar a saúde do seu bebê, o inspetor de ultrassom utiliza o transdutor para varrer materiais e verificar a sua sanidade interna, isto é, verificar se o mesmo possui defeitos em seu interior. As diferenças entre as duas verificações citadas são relativas ao tipo de transdutor utilizado, ou seja, sua frequência, tamanho e geometria, porém o objetivo é o mesmo. Na figura 2.6 observa-se um transdutor de ultrassom acoplado com uma determinada substância a uma peça conhecida por Bloco nº1. Os dois tipos de verificação citadas necessitam conforme comentado utilizar um acoplante na interface do cristal do transdutor e do material ensaiado para permitir a passagem da energia ultrassônica e conseqüentemente receber as informações sobre as situações tanto do bebe como do material que são geradas na tela do aparelho de ultrassom. Caso contrário, ou seja, se não houver o acoplante, não ocorrerá transmissão da energia sônica para o material, pois é essencial que seja eliminado todo o ar existente na interface material e cabeçote. O acoplante forma uma camada fina entre o transdutor e a superfície do material a ser ensaiado, sendo que um fator relevante é a rugosidade superficial do material em ensaio e quanto maior for a rugosidade do material, mais viscoso deve ser o acoplante utilizado. Para uma inspeção adequada é essencial observar as relações entre os acoplantes e o material a ser inspecionado quanto à sua impedância acústica. A impedância acústica (Z) é definida como sendo o produto da densidade do meio (ρ) pela velocidade de propagação neste meio (V) e representa a quantidade de energia acústica que se reflete e transmite para o meio. A fórmula utilizada é expressa por:

$$Z = \rho \times V.$$

Para cada transdutor material existe um acoplante que possibilitará a melhor transmissão sônica e menor atenuação. Por isso, deve-se usar um acoplante que estabeleça uma minimização desta diferença e que permita a passagem das vibrações para o material a ser ensaiado por ultrassom. O acoplante é escolhido em função do acabamento superficial do material, isto é, sua rugosidade superficial, a condição da sua estrutura metalúrgica e seu o tipo.

Os sinais ou ecos provenientes das interfaces do Bloco nº1 podem ser visualizados na tela do equipamento de ultrassom pelos ecos correspondentes demonstrados na figura 2.5. A tela do aparelho de ultrassom mostra o eco de entrada que é o primeiro eco situado à esquerda da tela e outros quatro ecos que são provenientes da reflexão de fundo do Bloco nº 1, devido às ondas ultrassônicas emitidas e recebidas pelo transdutor em contato com o referido bloco.

Existem quatro tipos de transdutores que normalmente são utilizados para diversas aplicações: O reto ou normal, o angular, o duplo- cristal, e os transdutores *phased array* que são explicados nos itens 2.4.1 e 2.4.2.

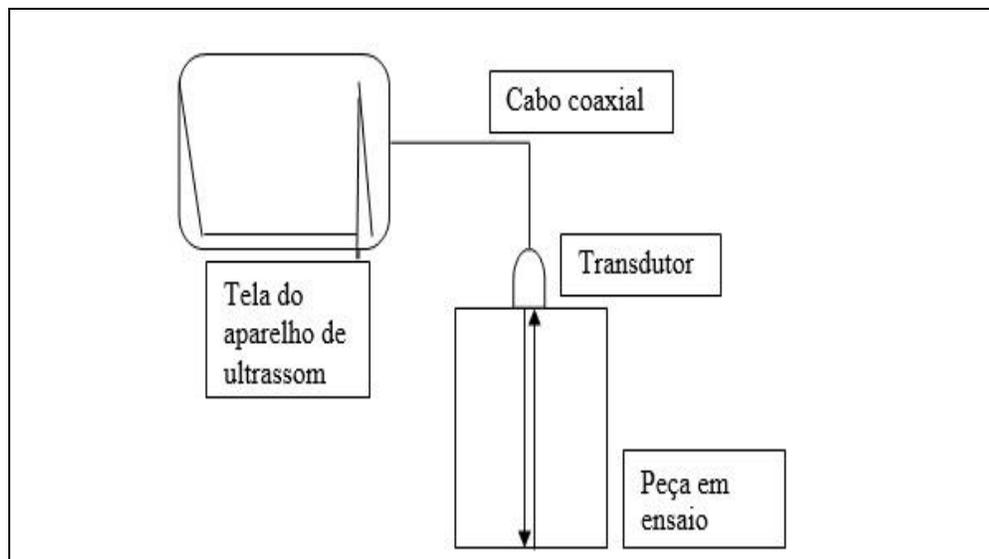


Figura 2.4 - Diagrama do esquema do ensaio por ultrassom convencional [Santin, 2003].

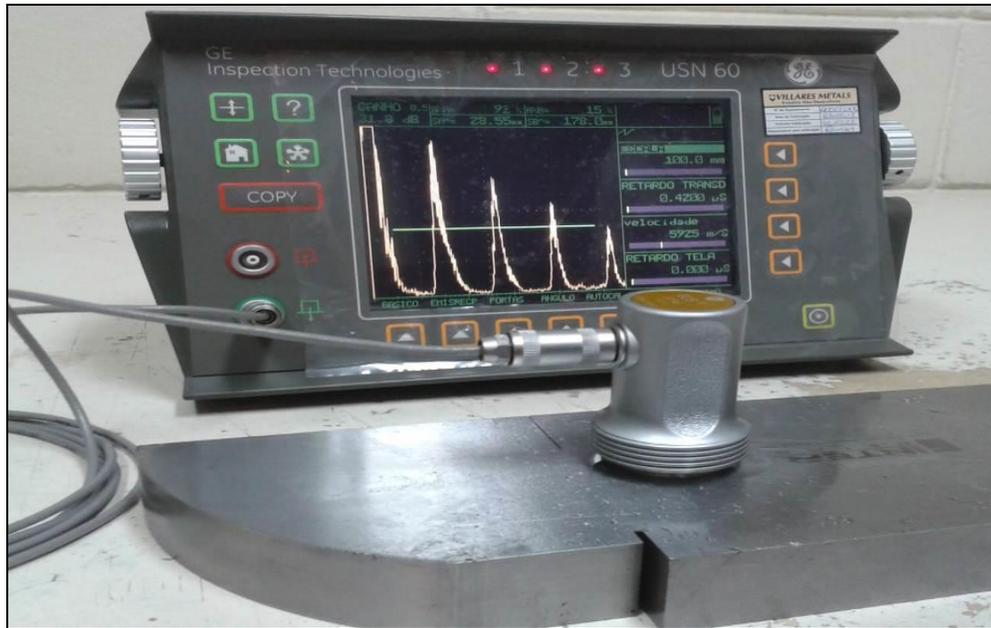


Figura 2.5 - Foto do aparelho de ultrassom [Indústria siderúrgica, 2015].

Outras duas características importantes que todo transdutor de ultrassom possui e que são fundamentais na escolha para a inspeção de um material são o campo próximo e campo distante [www.nde-ed.org, 2015], demonstrado na figura 2.6.

O campo próximo também conhecido por zona de Fresnel é uma área existente nas proximidades de todo cristal característico por possuir uma interferência ondulatória muito grande entre as ondas. A medida que a onda se afasta do cristal, as interferências vão diminuindo e desaparecendo, tornando uma única frente de onda [Marks, 2009]. A região próxima do cristal onde esse fenômeno se manifesta é de fundamental conhecimento por parte de inspetores de ultrassom, pois nesta região, se ocorrer qualquer tipo de descontinuidade é possível que haja a sua não detecção ou se houver sua detecção, é possível que a leitura de seu tamanho seja diferente do que realmente ela é. Isto se deve ao fato de que na proximidade do cristal existe uma interferência muito grande entre as ondas geradas. Conhecida também por *near field*, a região do campo próximo de um transdutor que depende da dimensão do cristal e do comprimento de onda pode ser calculado pelas fórmulas a seguir:

Cristal circular

$$N = \frac{\text{Def}^2 \times f}{4V} \quad (2.1)$$

Cristal quadrado ou retangular

$$N = 1,3 \frac{\text{Mef}^2 \times f}{V} \quad (2.2)$$

Onde:

N= campo próximo ou *near field*

V = Velocidade do som

f = frequência do transdutor

Def = Diâmetro efetivo do cristal

Mef = Metade do comprimento efetivo do maior lado do cristal retangular.

O campo distante conhecido por zona de *Fraunhofer* ou campo longínquo vem logo em seguida ao campo próximo onde o feixe sônico do transdutor passa a divergir e os efeitos do campo próximo já não são mais existentes. É a região que se caracteriza por ser adequada para a detecção de possíveis indicações que possam existir. Nesta região a onda sônica se diverge igual ao fecho de luz de uma lanterna em relação ao eixo central e sua intensidade diminui conforme o inverso do quadrado da distância [Santin, 2003; Andreucci, 2014]. A figura 2.6 mostra as duas zonas do campo próximo e campo distante de um transdutor.

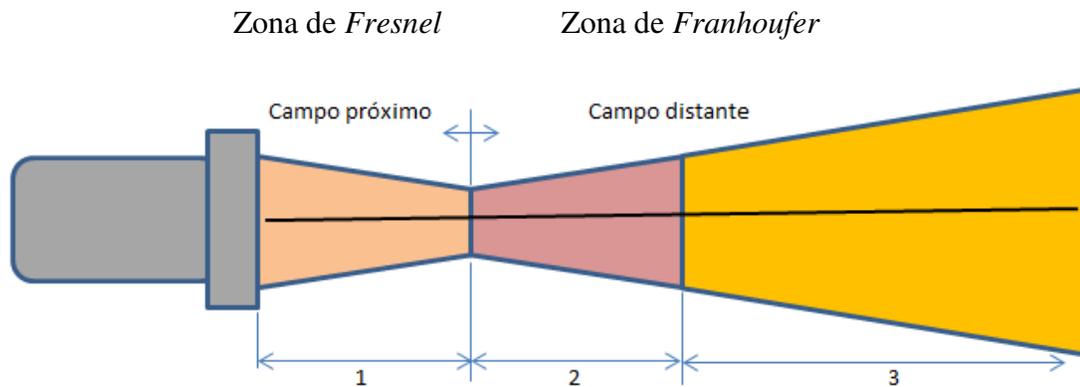


Figura 2.6 - Classificação das zonas do campo ultrassônico [Marks, 2009].

2.4.1. O Transdutor de ultrassom convencional

O transdutor ou transdutor convencional de ultrassom possui um único cristal piezelétrico ou no máximo dois. O transdutor convencional pode ser do tipo reto, normal ou 0° , angular de determinado ângulo ou duplo-cristal conforme ilustrado na figura 2.7. Os cabeçotes demonstrados na figura 2.7 são da direita para a esquerda do tipo normal B2S e do tipo angular WB 60-2, ambos do fabricante Krautkammer, atualmente GE *inspection technologies*. Porém existem vários outros tipos de transdutores que utilizam elementos cristais e ângulos diferentes que são utilizados em outras aplicações. A figura 2.7 mostra o transdutor e seu respectivo único cristal. O transdutor B2S possui um único elemento e ângulo que no caso é de 0° e o WB 60-2 também possui um único elemento cristal e ângulo de 60° . As dimensões físicas de seus cristais são respectivamente 24 mm e 20 x 22 mm respectivamente. Estes tipos de transdutores são muito utilizados na inspeção manual por ultrassom conhecida por inspeção por contato direto. O transdutor normal emite ondas longitudinais que são transmitidas para o material de maneira perpendicular à superfície. O transdutor angular também emite onda longitudinal, porém quando esta onda passa do transdutor para o material em ensaio, acontece a conversão de modo e a refração da onda passando a ser transmitida transversalmente ao material. Na necessidade de inspeção por ultrassom de um material utilizando mais de um ângulo, a inspeção deve ser

realizada separadamente utilizando o ângulo desejado como por exemplo também demonstrado na figura 2.6 através do transdutor de 60°, que neste caso é um transdutor angular. O tempo de excitação do cristal na inspeção por ultrassom convencional é determinado pelo aparelho ou unidade de ultrassom que envia os sinais elétricos para o transdutor que por sua vez converte esta energia elétrica em mecânica. Se o pulso encontrar uma interface com localização perpendicular à direção do feixe sônico, o som é refletido e retorna ao transdutor [Marks, 2009]. O pulso sônico que atinge o transdutor induz uma voltagem de intensidade da ordem de um volt e que retorna ao aparelho. Esta voltagem é amplificada para aproximadamente 100 Volts para que o sinal seja visualizado na tela do equipamento de ultrassom, através da vista *A-scan*.

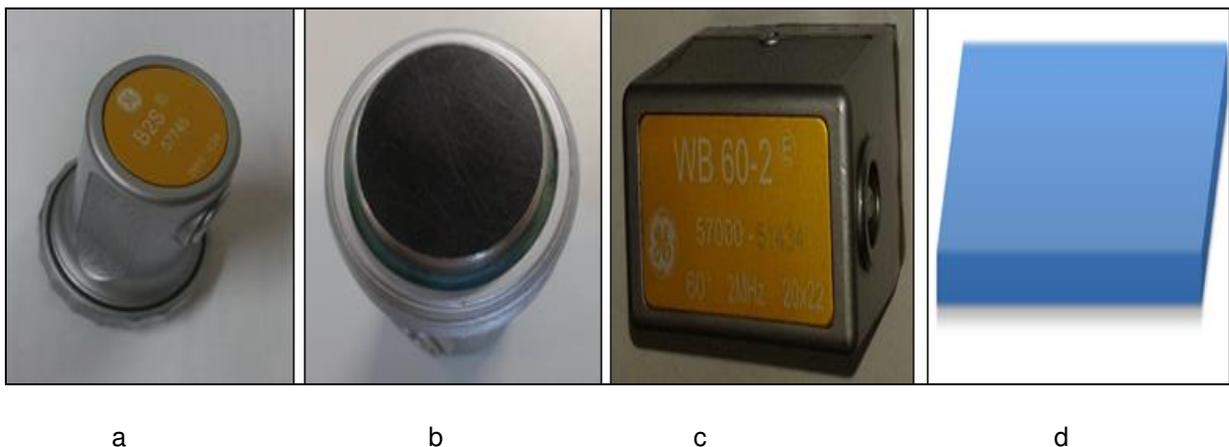


Figura 2.7 - Cristal de um transdutor convencional de ultrassom.

a e b- transdutor do tipo normal (B2S); c e d – transdutor do tipo angular (WB60-2).

2.4.2. Conceitos básicos do ultrassom *phased array*

Os princípios físicos do ultrassom *phased array* são os mesmos que os do ultrassom convencional, ou seja, as ondas ultrassônicas geradas e recebidas são as que definem o ensaio [Hellier, 2013]. A tecnologia *phased array* de ultrassom já é utilizada na área médica há muitos anos aonde ondas sonoras de alta frequência geralmente 25 MHz são usadas para criar imagens detalhadas de órgãos internos dos seres humanos. Atualmente sua aplicação está direcionada

também para a indústria, aonde a faixa de frequência utilizada geralmente é entre 3 a 15 MHz [www.nde-ed.org, 2015]. A técnica de inspeção de *phased array*, como o próprio nome diz, varreduras de fases, apesar de possuir os mesmos princípios físicos que o ultrassom convencional, tem várias diferenças [Hellier, 2013]. As características acústicas de uma onda ultrassônica via *phased array* são modificadas quando se utiliza a técnica pulso eco *phased array* [Bolten, 2014]. O controle dessas modificações é realizado eletronicamente na emissão e recepção dos sinais em cada elemento do transdutor de um transdutor *phased array* que possui múltiplos elementos cristais que vão de 8 a 256 elementos. Conforme dito anteriormente, os transdutores de ultrassom convencional possuem apenas um único cristal piezoelétrico ou no máximo dois enquanto os transdutores *phased array* possuem um arranjo de cristais que podem ser excitados isoladamente em tempos diferentes, permitindo que uma inspeção por esta técnica seja realizada por uma grande variedade de ângulos. Adicionalmente é possível o ajuste do ponto focal do feixe sônico do transdutor em um material e conseqüentemente podendo aumentar a energia do feixe em uma determinada região do material em ensaio o que conseqüentemente aumenta confiabilidade de inspeções e detecções de indicações com orientações diversas. Ao conjunto de cristais que formam o arranjo de cristais em um encapsulamento de um transdutor *phased array* atribui-se o nome de leis focais [Olympus NDT, 2012].

Outro ganho do PA em relação a uma inspeção convencional automatizada ou manual é a possibilidade de aumento de velocidade de inspeção e a detecção de indicações localizadas na superfície e sub superfície de um determinado material com orientações diversas. E conforme a especificação de inspeção, a inspeção automatizada *phased array* pode substituir a aplicação de outro ensaio não destrutivo complementar utilizado para verificar a superfície de um determinado material, por exemplo, o ensaio por partículas magnéticas, líquido penetrante ou correntes parasitas [Olympus NDT, 2012]. Geralmente as normas de ultrassom convencionais tanto manual quanto automatizado, como por exemplo, a ASTM A 388, AMS STD 2154, EN 10308 limitam a velocidade do ensaio a 150 milímetros por segundo. Este limite pode ser ultrapassado pelo sistema de ultrassom *phased array* justamente devido à quantidade de cristais existentes em um transdutor *phased array* e as possibilidades de angulação e faseamento dos mesmos. De uma maneira esquemática conforme figura 2.8, o ultrassom *phased array* é representado. A unidade de ultrassom ou aquisição transmite energia através de um pulso para a unidade de ultrassom *phased array*. Há então uma transformação do pulso de gatilho conhecido por trigger para um

pulso de tensão ou voltagem para cada elemento simples do transdutor *phased array* com um atraso específico e amplitude ou energia pré-determinada pela lei focal formada por alguns elementos cristais [Hellier, 2013]. Cada elemento do transdutor recebe um pulso com energia, tempo, profundidade e ângulo específicos [Davis, 2006]. O recebimento das reflexões das ondas pelos elementos é enviado para a unidade de ultrassom *phased array* que computa os sinais da respectiva lei focal, aonde finalmente a soma de todos os sinais são transformados em um sinal ultrassônico comum [Bolten, 2014]. Assim como no ultrassom convencional, as formas de representação de uma inspeção realizada via *phased array* podem ser do tipo *A-scan*, *B-scan* e *C-scan*. Porém é possível adicionar a vista *S-scan* que neste caso é proveniente somente da inspeção via ultrassom *phased array*. A representação do tipo *A-scan* mostra a forma tradicional de visualização da tela, ou seja, na forma de ecos de reflexão e é muito usada na inspeção convencional por ultrassom. A representação *B-scan* mostra a seção transversal do material em ensaio peça, ou seja, a visualização do material é feita em corte. Esta apresentação não é comum, isto é, somente aparelhos que possuem funções especiais em seu software são capazes de mostrar esta forma de apresentação. A representação *C-scan* mostra a peça no sentido "planta", isto é, a vista de cima da peça. Na representação *S-scan* o feixe sônico é setorial produzido em ângulo pelo transdutor mostrando na tela a posição das indicações a partir do centro do transdutor. Já a forma de apresentação *S-scan* para varredura setorial angular por *phased array* também não é comum e somente aparelhos que possuem funções especiais *phased array* são capazes de mostrar esta forma de representação de sinais.

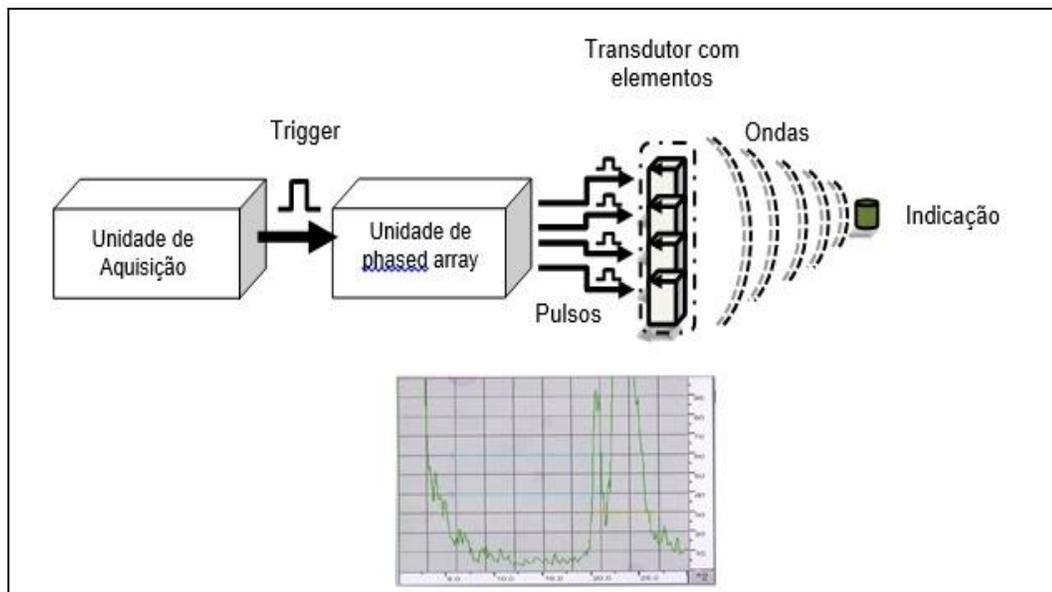


Figura 2.8 - Esquema do ultrassom *phased array* [Bolten, 2014].

2.4.3. O transdutor *phased array* de ultrassom

Com o avanço da tecnologia dos computadores, softwares, processadores e circuitos eletrônicos mais ágeis, e principalmente de materiais piezelétricos ou piezo compostos para fabricação de novos cristais de ultrassom, a partir do final dos anos 90 houve o desenvolvimento de uma tecnologia diferenciada em relação à convencional, sendo que um único transdutor opera utilizando de 8 a 256 elementos de pequenos cristais cada um ligado a circuitos independentes capazes de controlar o tempo de excitação independentemente um dos outros cristais [Bolten, 2014; www.nde-ed.org; Hellier, 2013]. O resultado é a modificação do comportamento do feixe sônico emitido pelo conjunto de cristais ou pela lei focal do transdutor. A figura 2.9 mostra um transdutor *phased array* do fabricante Olympus NDT de formato côncavo. Este transdutor possui 128 elementos cristais que opera conforme a pré definição e ajuste de suas leis focais em fase, isto é, o aparelho de ultrassom executa a excitação das leis focais em tempo defasado entre elas e o resultado é uma onda perpendicular transmitida para a peça em ensaio ao plano da superfície [Eufrásio, 2015]. A figura 2.10 mostra que o aparelho de ultrassom executa a excitação dos

cristais de forma defasada, isto é, o tempo em que cada cristal é excitado é retardado no tempo, e o resultado é uma frente de onda angular à superfície.

As vantagens principais dos transdutores *phased array* em relação aos transdutores convencionais são a variedade de pontos focais para um mesmo transdutor, a diversidade de ângulos de incidência para um mesmo transdutor, a varredura do material de forma eletrônica do feixe sônico, a variedade dos modos de inspeção e maior flexibilidade para inspeção de juntas complexas [Hellier, 2013]. Além disso, as aberturas dos ângulos proporcionam na teoria uma capacidade maior de detecção de indicações de geometrias que podem não ser favoráveis para a detecção por técnicas que utilizam ângulos fixos como o caso da técnica pulso eco de ultrassom convencional ou até mesmo da técnica de transparência tanto manuais como automatizadas [Davis, 2006]. O faseamento é outra característica importante, pois o tempo de excitação de cada elemento que é faseado pode também ser ajustado para emitir ângulos diferentes em tempos diferentes. Desta maneira, cada lei focal pode trabalhar de uma forma defasada uma da outra, com ângulos diferentes e ponto focal ajustado para a profundidade desejada, proporcionando uma varredura e cobertura completa conforme demonstrado na figura 2.11. No caso de inspeção de um material no formato de uma barra redonda com um determinado diâmetro e comprimento, é possível a cobertura total em relação à posição radial e axial do material com sobreposição perfeita entre pistas de inspeção e, portanto sem risco de não ficar regiões do material sem ensaio. Os cristais do transdutor *phased array* da figura 2.10 são de Titanato de Bário. A suas dimensões físicas são 128 mm x 15 mm e o raio de curvatura é de 105 mm. Este raio de curvatura côncavo acopla-se perfeitamente ao material convexo. O encapsulamento deste conjunto de transdutores é de aço inoxidável, pois o transdutor é preparado para operar pelo sistema de imersão. A frequência de operação deste conjunto de transdutores é de 5 MHz e a distância entre os cristais conhecida pelo nome de *pitch* é de 1mm.



Figura 2.9 - Cristais de um transdutor *phased array* de ultrassom [Olympus NDT, 2012].

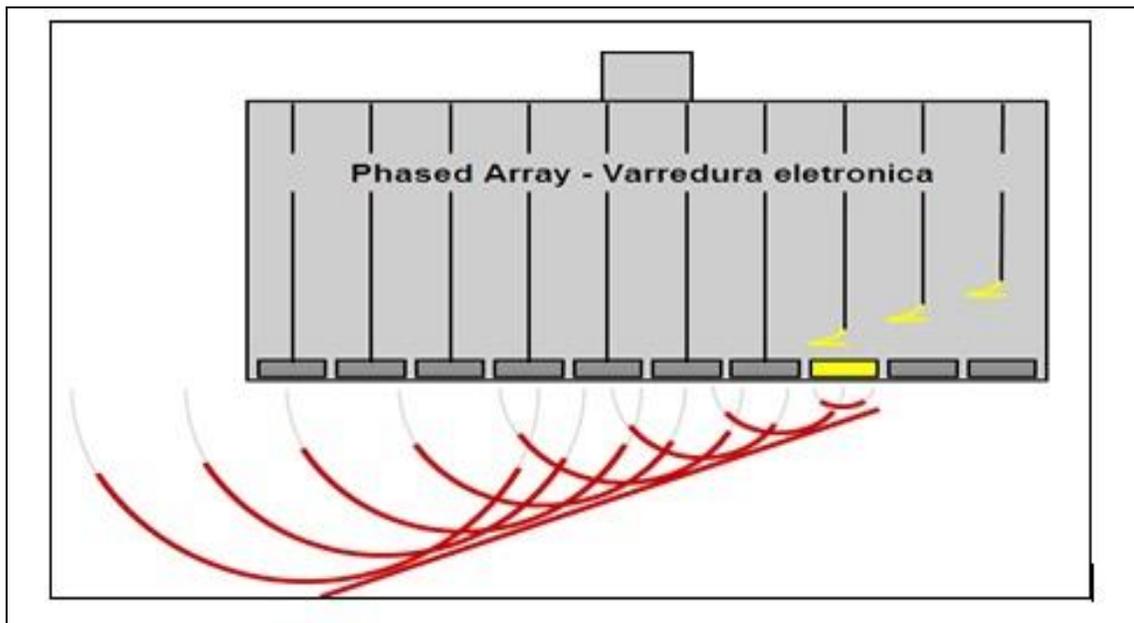


Figura 2.10 - A varredura eletrônica faseada [Bolten, 2014].

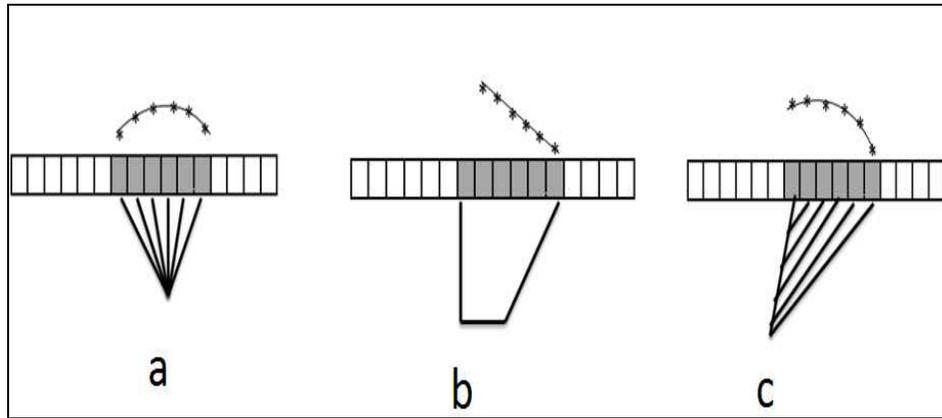


Figura 2.11 - Transdutor *phased array* [Ritcher et al, 2007].

- a - Inspeção com feixe sônico focado a uma determinada profundidade.
- b - Inspeção com feixe sônico em ângulo.
- c - Inspeção com angulação e focalização do feixe sônico.

2.5. Técnicas de inspeção

A inspeção de materiais por ultrassom pode ser realizada através de duas técnicas. A técnica de impulso-eco ou simplesmente pulso eco ou a técnica de transparência. Através da técnica do pulso eco utiliza-se um único transdutor no caso de inspeções convencionais ou um transdutor com vários elementos cristais que sejam responsáveis por enviar e receber as ondas de ultrassom que se propagam no material, seja o transdutor reto, angular, duplo-cristal ou *phased array* [www.nde-ed.org, 2015]. A técnica de pulso eco é muito utilizada na indústria, pois é de simples aplicação e exige poucos dispositivos para sua aplicação. Assim, o transdutor é acoplado na superfície do material que é submetido a uma varredura através da mão do inspetor conforme demonstrado na figura 2.12 e 2.13. Ou através da fixação do transdutor à determinada distância da superfície do material via coluna de água conhecido por técnica de imersão para a verificação de sua integridade e possíveis descontinuidades conforme figura 2.14. Se houverem descontinuidades localizadas internamente ou na superfície do material em inspeção é possível detectar sua profundidade, comprimento, refletividade de seu tamanho e localização na peça.

A outra técnica é conhecida pela técnica de transparência conforme demonstrado na figura 2.15 que utiliza dois transdutores separados acoplados em lados opostos do material, um transmitindo e outro recebendo as ondas de ultrassom [www.nde-ed.org, 2015]. Portanto, é necessário acoplar os transdutores nos dois lados da peça em ensaio e os transdutores devem estar alinhados um de frente para o outro. Através desta técnica não é possível determinar a posição da descontinuidade, comprimento, refletividade ou localização na peça, ou seja, é um ensaio do tipo passa não passa [www.nde-ed.org, 2015]. Esta técnica pode ser aplicada na inspeção de chapas, juntas soldadas, barras e outros materiais e o objetivo dela é avaliar o sinal da altura do eco na tela recebido [Santin, 2013]. A altura do sinal recebido na técnica de transparência varia em função da quantidade e tamanho das descontinuidades presentes no material em inspeção, isto é, não é possível analisar as características das indicações. É possível utilizar esta técnica em sistemas automatizados de ultrassom utilizando transdutores próprios para a inspeção por imersão. Esta técnica é conhecida por técnica de transparência via imersão e os transdutores podem se movimentar na posição radial ou axial, dependendo do sistema que as barras são transportadas em relação ao local dos transdutores. Na técnica de imersão a peça em inspeção é transportada através de um tanque com água, aonde o acoplamento, pressão sônica e sobreposição de inspeção sobre o material são constantes.

2.5.1. O Ultrassom convencional

A figura 2.13 mostra a aplicação prática da inspeção pelo método manual convencional de ultrassom pela técnica do pulso eco através do contato direto na indústria siderúrgica onde um transdutor de ultrassom está acoplado em uma peça de aço forjado com espessura de 180 milímetros. O aparelho de ultrassom utilizado é portátil e conhecido por USN 60 do fabricante GE inspection technologies. Ele mostra o eco de fundo da peça, bem como a indicação encontrada na tela do referido equipamento. Os dois ecos existentes na tela do aparelho de ultrassom, um com sua amplitude a mais de 100% de altura, e outro com aproximadamente 50% de altura são provenientes da espessura da peça e da indicação respectivamente. Nota-se que o eco de fundo da peça está situado a um percurso sônico de 180 milímetros que é a espessura da

peça em ensaio e a indicação encontrada está situada a um percurso sônico de 169 milímetros. O eco de fundo mostrado na tela do aparelho ocorre através do envio do sinal ultrassônico pelo cristal piezoelétrico do transdutor que transmite à peça uma onda ou energia de ultrassom através de um único feixe perpendicular à superfície e que percorre a espessura total de 180 milímetros do metal inspecionado. A onda incide na interface no fundo da peça, retorna ao cristal piezoelétrico e este produz um sinal elétrico que será amplificado e registrado na tela do aparelho na forma do pulso ou eco. O percurso sônico percorreu a espessura de 180 milímetros de ida e mais 180 milímetros na volta. Isto ocorre na inspeção por ultrassom e os circuitos do aparelho compensam este fenômeno dividindo por dois os registros na tela. Portanto, os ecos na tela do aparelho representam os caminhos percorridos pelo som tanto em relação à descontinuidade detectada, no caso da inspeção mostrada na figura 2.12 a uma distância de 169 milímetros conforme indicado pela seta como ao eco de fundo da peça de 180 milímetros.

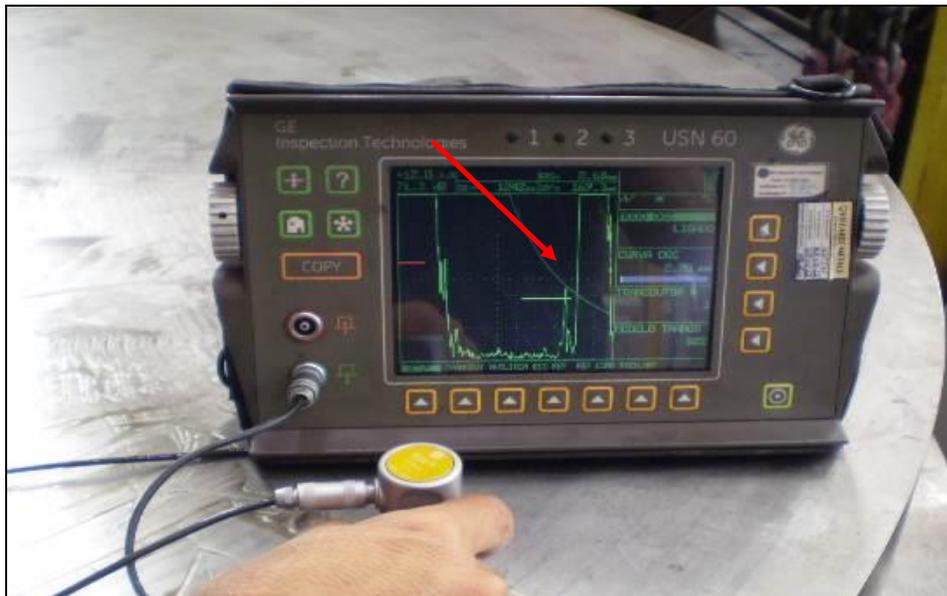


Figura 2.12 - Aplicação do método de ultrassom manual convencional em uma peça de aço com espessura de 180 mm [Indústria siderúrgica, 2015].

O ultrassom convencional manual, como o próprio nome diz, realizado manualmente que utiliza a técnica de pulso eco por contato direto geralmente utiliza a vista *A-scan* e ainda é muito utilizado na indústria principalmente para a inspeção em peças forjadas de aço de geometrias e

comprimentos longos aonde o peso dos materiais em inspeção são geralmente difíceis de serem inspecionadas por linhas automatizadas. Conforme exemplo na figura 2.13, é possível visualizar uma inspeção por ultrassom convencional manual em um disco forjado de aço.

O peso do material forjado de aço inspecionado na indústria siderúrgica é geralmente a partir de 500 kg, portanto conforme comentado anteriormente torna-se difícil sua inspeção automatizada devido à dificuldade de transporte da peça em uma linha de inspeção. Outro detalhe que limita a inspeção automatizada é a geometria da peça. Em materiais onde esta inspeção por ultrassom é realizada, os percursos sônicos são maiores atingindo de 400 a 1000 milímetros e dependendo da estrutura metalúrgica e condição superficial, é possível através de um único transdutor que possui um cristal piezolétrico atingir uma mínima indicação detectável que atende as normas aplicáveis de tamanho equivalente de aproximadamente 0,8 milímetros pelo método DGS.

Durante este trabalho, a inspeção manual por ultrassom utilizando o aparelho USN 60 foi realizada em várias barras de aço e as indicações detectadas e mensuradas pelo método DGS foram posteriormente submetidas à inspeção automatizada via ultrassom *phased array* utilizando o equipamento *Quick scan* para a realização das comparações e conclusões.



Figura 2.13 - Inspeção de material forjado via ultrassom manual [Indústria siderúrgica, 2015].

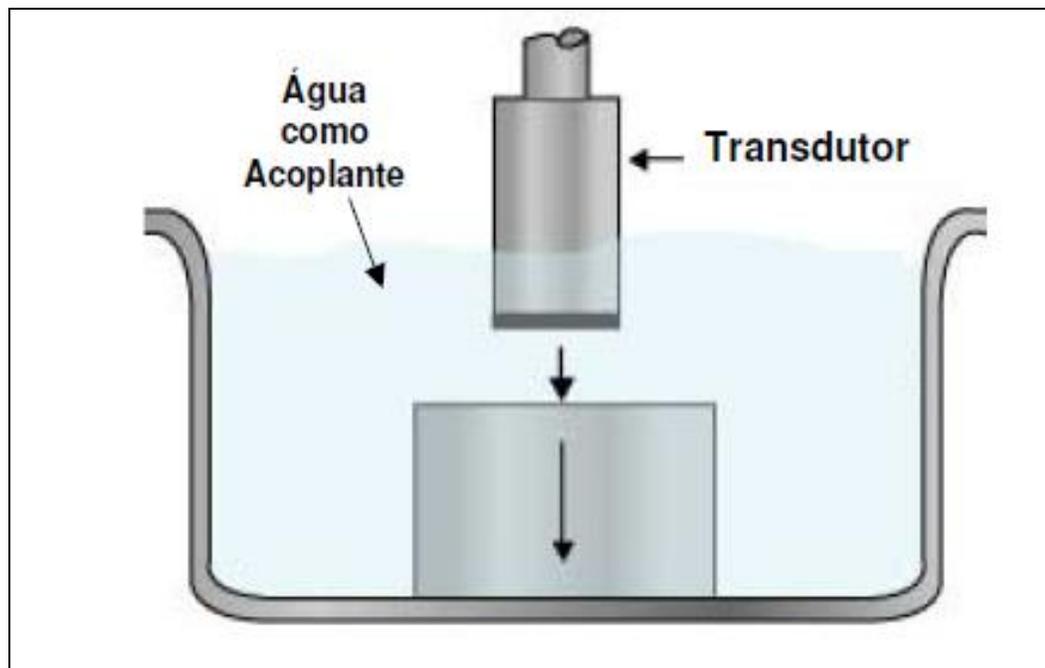


Figura 2.14 - Técnica de imersão [Andreucci, 2014]

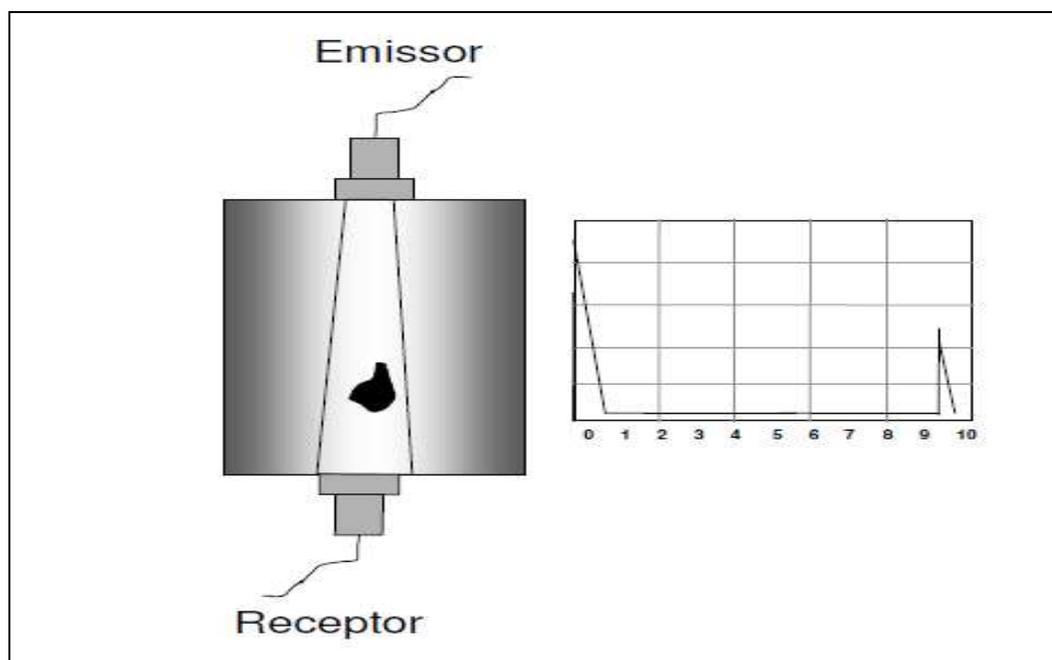


Figura 2.15 - Técnica da transparência [Andreucci, 2014]

2.5.2. O ultrassom *phased array* automatizado

A figura 2.16 representa uma vista complementar do *phased array* em relação ao ultrassom convencional que conforme mencionado anteriormente utiliza a vista *A-scan*. A vista é conhecida por *S-scan* ou *sectorial scan* aonde mostra a abertura do ângulo de inspeção em relação ao seu feixe central.

A figura 2.17 mostra um aparelho portátil de ultrassom da GE *inspection technologies*, o *Phasor XS* que é utilizado para a realização de ultrassom pela técnica de pulso eco via contato direto, ou seja, manual. O transdutor demonstrado na figura 2.18 acoplado à peça possui 16 elementos cristais e na tela do aparelho podemos ver a abertura do ângulo do transdutor que varia de -30 a $+30^\circ$. A inspeção manual utilizando aparelhos *phased array* é muito utilizada na indústria, pois tem capacidade de detecção de indicações com orientações que por ventura possam não ser detectadas pelo ultrassom manual convencional justamente pela condição de abertura de ângulos acima apresentada e por tais indicações possuírem orientações desfavoráveis à detecção via ultrassom manual convencional. Geralmente, quando utilizando o *phased array* manual, é possível a detecção de indicações com tamanhos equivalentes pelo método DGS menores quando comparados com o sistema convencional dependendo da estrutura metalúrgica do material em ensaio [Davis, 2006]. A ordem de detecção passa a ser de 0,7 a 0,75 milímetros de tamanho equivalente pelo método DGS, enquanto que no convencional o valor é da ordem de 1mm.

Porém ainda sob o controle do ser humano, a inspeção utilizando o equipamento portátil pela técnica *phased array* via contato direto mesmo trabalhando com transdutores que possuam mais do que um elemento cristal não permite uma cobertura de inspeção adequada. Não é possível garantir e manter uma pressão sônica constante, sobreposição adequada de pistas de inspeção e principalmente garantir a varredura de 100% da área do material devido à operação ser manual. Por exemplo, no caso de materiais de seção redonda com comprimentos longos, não é possível ter certeza de que 360° da circunferência e comprimento do material foram totalmente cobertos ou varridos, ou seja, é incerta a varredura de uma barra de seção redonda na posição radial e axial com sobreposição e pressão sônica constante. Portanto, mesmo utilizando a técnica *phased array* de ultrassom portátil via contato direto que teoricamente tem possibilidade de

detecção de indicações com valores de tamanhos equivalentes menores do que os convencionais, a confiabilidade desta inspeção pode não ser totalmente alcançada, pois ainda é operada manualmente, dependendo do ser humano no que se diz respeito à cobertura de inspeção [Davis, 2006].

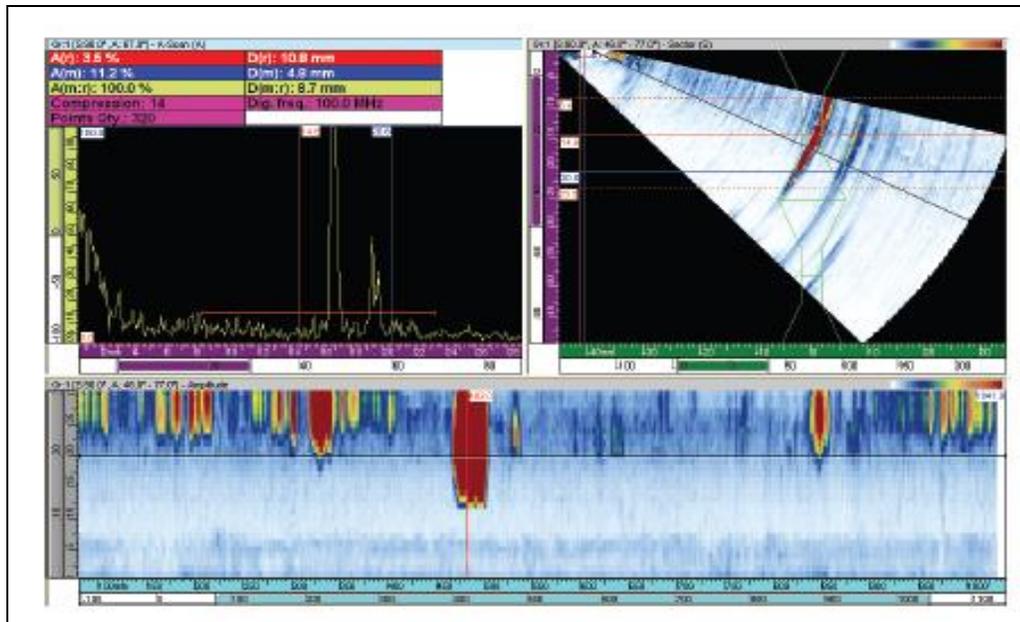


Figura 2.16 - Vistas de apresentação do ultrassom *phased array* [Davis, 2006].

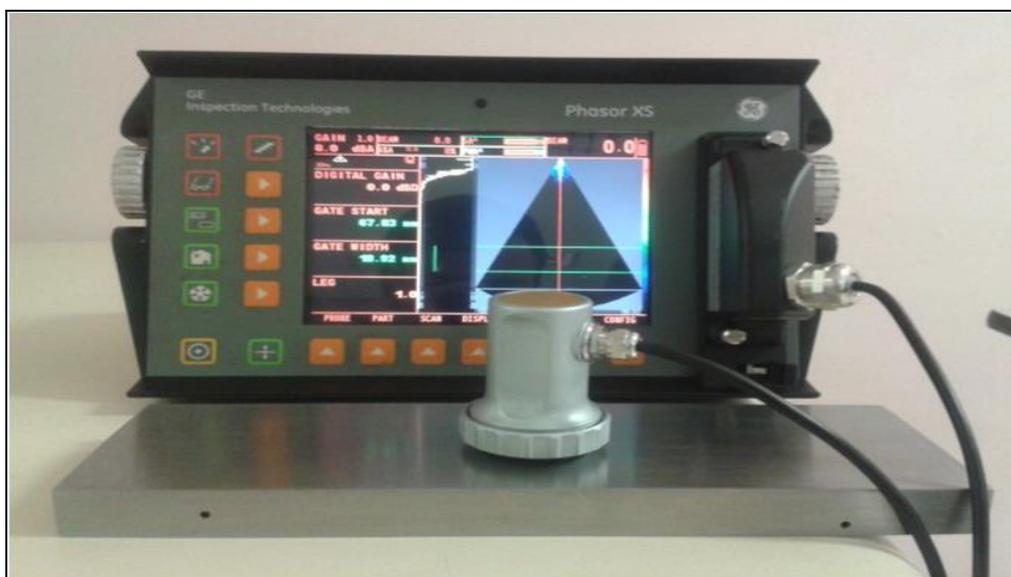


Figura 2.17 - O aparelho *phasor* de ultrassom *phased array* [Indústria Siderúrgica, 2015].

Em seguida, mostramos o equipamento de ultrassom automatizado *phased array* que na teoria, utiliza da mesma capacidade de detecção de indicações pela técnica *phased array* portátil manual via contato direto. Porém, possuindo configurações de ultrassom avançadas, com possibilidade do controle eletrônico e faseado de varredura com ângulos diferentes e adicionando velocidade de inspeção, controle de pressão sônica constante, sobreposição ideal de pistas de inspeção, acoplamento perfeito, sem contato manual do inspetor e maior capacidade de inspeção de diâmetros. Adicionando o acoplamento via imersão, o aumento de módulos de equipamentos de ultrassom e números de transdutores com elementos cristais diferenciados, aumenta-se o poder de detecção de indicações de comprimentos menores com orientações variadas e aumento de produção de inspeção com confiabilidade 100%. Além disso, os registros ou relatórios de inspeção podem ser emitidos instantaneamente após a inspeção com possibilidade de consultar os dados dos relatórios que contém todas as configurações de ultrassom. É possível consultar dados importantes relativos a inspeções realizadas não somente em relação à ultrassom, mas também em relação ao transporte das barras, *encoders*, entre outras. A única desvantagem da utilização desse equipamento é que o sistema de inspeção deve ser robusto, ou seja, os inspetores que calibram e realizam as inspeções neste equipamento devem ter conhecimento de vários anos de inspeção convencional por ultrassom, além da técnica *phased array* e domínio do equipamento em questão. Porém se houverem treinamentos adequados, ou seja, treinamentos em procedimentos de calibração e verificação do desempenho do equipamento, acessórios e treinamentos em operação do equipamento, ao longo de aproximadamente um ano é possível que um inspetor esteja apto a inspecionar materiais com domínio completo do sistema *phased array* automatizado de inspeção. A figura 2.18 mostra alguns detalhes do equipamento *phased array* automatizado do fabricante Olympus, nomeado *quick scan*. Pode se ter uma ideia principalmente da diferença de tamanho deste equipamento em relação aos equipamentos portáteis de ultrassom convencional e até mesmo *phased array* mostrados nas figuras anteriores. A figura 2.19 mostra a cobertura radial e axial da inspeção de uma barra de seção redonda que contém aproximadamente 150 milímetros de diâmetro e cinco metros de comprimento.



Figura 2.18 - O equipamento de inspeção *phased array* automatizado [Indústria Siderúrgica, 2015].

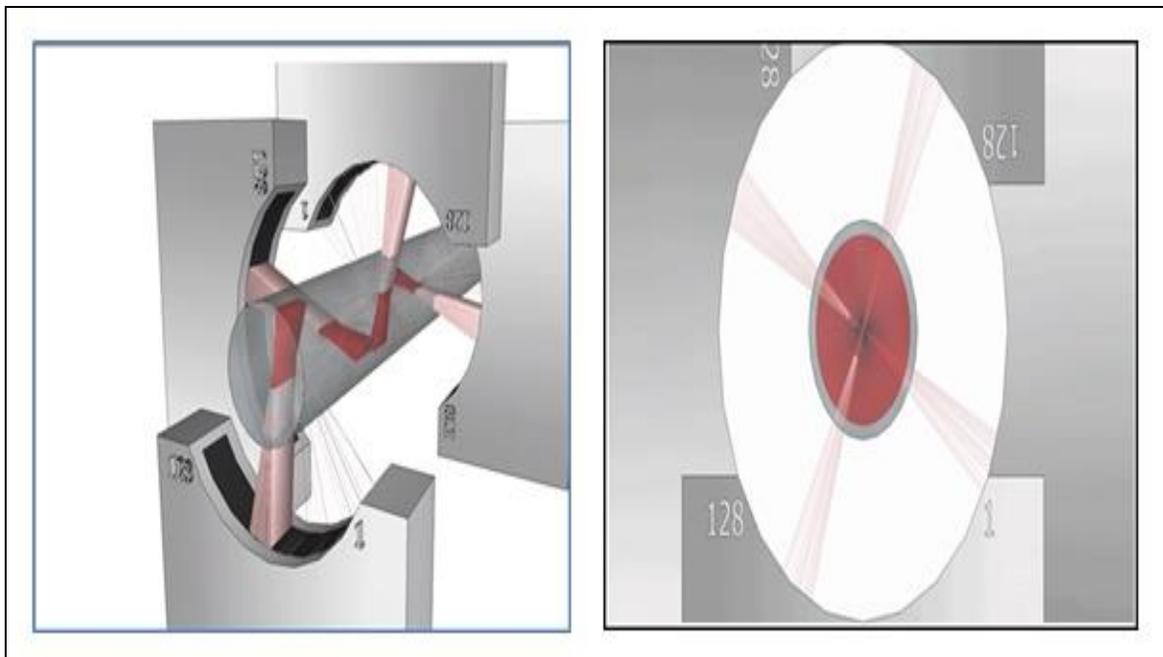


Figura 2.19 - A cobertura da inspeção automatizada *phased array* [Olympus NDT, 2012].

2.6. O Funcionamento do equipamento convencional de ultrassom

O equipamento opera pela técnica de inspeção pulso eco via contato direto e apresenta a vista *A-scan* e pode inspecionar qualquer tipo de perfil desde que seja possível o acoplamento do transdutor que neste caso utiliza somente um transdutor para a inspeção, seja ele do tipo reto, angular ou SE [GE inspection, 2013]. O equipamento utilizado é o USN 60 da GE *inspection technologies* e é totalmente operado por um ser humano. Todas as suas configurações são ajustadas por um inspetor, desde a calibração até a inspeção. O inspetor calibra o equipamento utilizando um bloco conhecido por Bloco nº 1 que possui medidas exatas e permitem ao equipamento o ajuste da velocidade sônica. Posteriormente o inspetor ajusta a sensibilidade do ensaio desejada através do método especificado. A sensibilidade para casos de inspeção por transdutores retos é realizada na própria peça que será ensaiada. No caso de coleta de dados para comparações posteriores com a técnica *phased array*, o método DGS de calibração de sensibilidade foi utilizado e que segue explicado no item 2.8 deste trabalho. O inspetor registra o sinal do eco de fundo da peça a 80% de altura da tela do equipamento USN 60 e seleciona o transdutor que será utilizado na inspeção através do software do equipamento. Em seguida, liga a curva DGS e a sensibilidade está traçada através da curva que pode ser observada através da figura 2.20. Assim a inspeção pode ser iniciada e se houverem detecções de indicações, mesmo abaixo da curva, é possível saber seu tamanho equivalente na unidade de milímetros através da tela do equipamento USN60.



Figura 2.20 - O aparelho USN 60 com a curva DGS ligada [Indústria Siderúrgica, 2015].

2.7. O Funcionamento do equipamento automatizado *Phased array*

O equipamento opera pela técnica de inspeção pulso eco via imersão apresentando as vistas A e C-scan. No tanque de água há uma capacidade de armazenamento de 13.000 litros. São inspecionados somente materiais com perfil redondo em condição superficial descascada ou retificada utilizando transdutores com 128 elementos cristais como mostrado na figura 2.10 [Olympus NDT, 2012]. Os transdutores têm o formato côncavo e as inspeções dos diâmetros são divididas por três cassetes. A primeira faixa inspecionada pelo cassete denominado C 105 tem capacidade de inspeção de diâmetros entre 50 a 119 milímetros. Em sequencia o cassete C 160 inspeciona diâmetros 120 a 169 milímetros e o cassete C 215 inspeciona diâmetros entre 170 a 254 milímetros de diâmetro. Cada um dos três cassetes possui um arranjo de transdutores conforme figura 2.21. O cassete C 105 possui seis transdutores dispostos de forma fixa aonde um cobre a faixa de inspeção da seção inspecionada do outro. O cassete C 160 possui oito transdutores também fixos para a cobertura da inspeção. O cassete C 215 possui doze transdutores. Notamos que quanto maior é a faixa de inspeção, o número de transdutores aumenta. A figura 2.22 mostra que a barra a ser inspecionada é deslocada através da linha de

transporte e entra no sub tanque de água, passando em determinada velocidade pelos transdutores fixos.

Após a calibração da sensibilidade que será posteriormente explicada, a inspeção pode ser realizada. Se houver qualquer indicação detectada, as pistolas de pinturas localizadas na saída da linha de transporte pintam fisicamente a barra e esta é direcionada para o lado esquerdo da mesa de inspeção. Se não houver detecção de indicações, a barra segue para outro destino localizado à frente. Após a inspeção de cada barra é possível visualizar os registros dos resultados uma a uma. Em seguida a figura 2.23 que mostra lado a lado os seis equipamentos *quick scan* de ultrassom que formam o conjunto detector de indicações. Os conectores plugados nos equipamentos de ultrassom estão também conectados do outro lado aos transdutores *phased array* mergulhados no tanque de água.

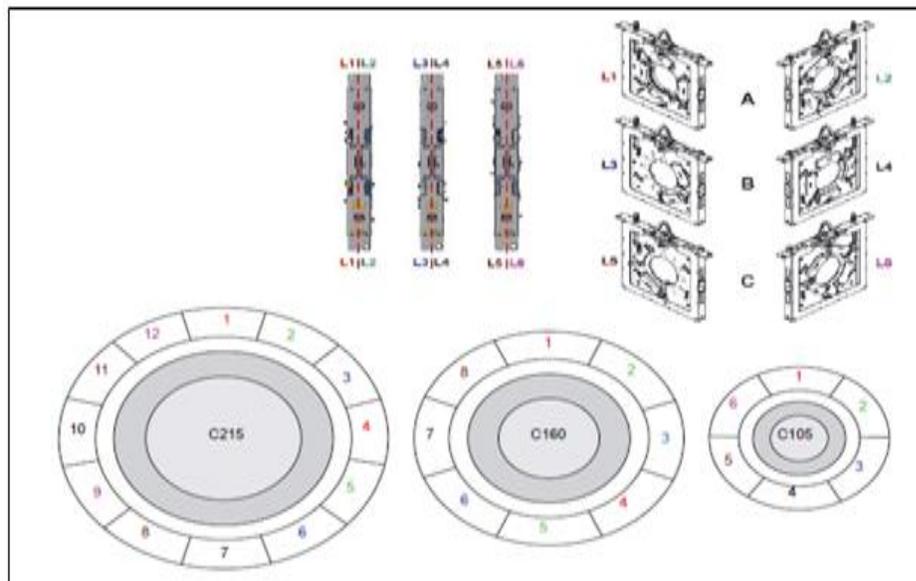


Figura 2.21 - Configuração dos transdutores para a inspeção [Olympus NDT, 2012].



Figura 2.22 - Barra transportada em cada cassette [Indústria Siderúrgica, 2015].



Figura 2.23 - Os módulos de ultrassom [Indústria siderúrgica, 2015].

A tabela 2.1 demonstra as principais diferenças entre os equipamentos de ultrassom utilizados para a inspeção dos materiais durante este trabalho.

Tabela 2.1 - Principais diferenças entre o ultrassom convencional e o *phased array* automatizado

Tipo do equipamento de ultrassom	Convencional manual	Phased Array automatizado
Marca	GE inspection	Olympus NDT
Modelo	USN 60	Quick scan
Quantidade de equipamentos	1	6
Nº de elementos dos transdutores	1	128
Área ativa de transdutor	24mm	160x18mm
Formato do cristal do transdutor	reto	côncavo
Técnica de inspeção	Pulso eco via Contato direto convencional	Pulso eco via imersão Phased Array
Velocidade de inspeção	150mm/s máxima	250mm/s
Sobreposição	manual	encoder
Varredura	manual	automatizada
Custo	R\$ 60.000,00	R\$ 3.000.000,00
Confiabilidade	75%	100%

2.8. O Diagrama DGS

Proveniente do Alemão AVG, *Abstand Verstärkung Grösse* e traduzindo para o Inglês de maneira simples, via sigla DGS, isto é, *Distance Gain Size* e para o Português, Distância, Ganho e Tamanho. O diagrama DGS é utilizado largamente no Brasil e no mundo para a realização de calibração da sensibilidade do ensaio por ultrassom seja ele convencional ou *phased array* [Krautkammer, 2001]. O diagrama DGS é especificamente utilizado na indústria para determinação de tamanhos de indicações equivalentes detectadas por ultrassom, seja pela técnica manual ou automatizada.

A base para calibração de sensibilidade do ensaio por ultrassom e a determinação dos tamanhos de indicações detectadas por ultrassom vem das curvas do diagrama DGS que cada transdutor possui distintamente um do outro. A figura 2.24 mostra um diagrama DGS de um transdutor do tipo MB5S fabricado pela Krautkammer. Observa-se que a distância $[D]$, dada por S é expressa na unidade de milímetros ou em polegadas [inch], V é a diferença em ganho em decibéis [dB] e D_f é o tamanho do refletor equivalente também na unidade de milímetros. O diagrama DGS descreve a lei das distancias onde existe uma relação entre o formato do feixe sônico do transdutor e de seus refletores.

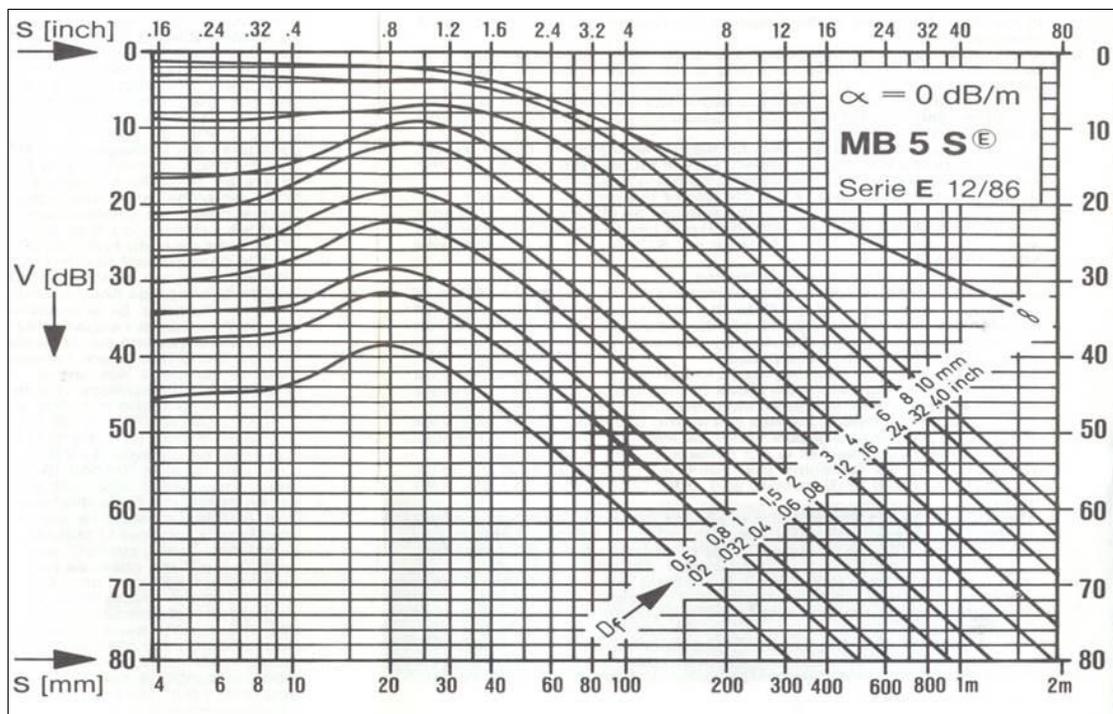


Figura 2.24 - O diagrama DGS [Krautkammer, 2001].

2.8.1. O tamanho do refletor equivalente

O diagrama DGS que permite a determinação do tamanho de uma indicação é muito importante por dois fatores: devido à necessidade de conhecer o tamanho de uma indicação detectada pelo ensaio de ultrassom em uma peça para verificar a possibilidade de seu uso

posterior e saber se essa indicação é aceitável por critérios de aceitações e normas e devido à dificuldade de determinar o tamanho equivalente de uma indicação sem destruir a peça ensaiada por ultrassom. A utilização do método DGS para determinação de tamanhos de indicações se tornou uma maneira simples de divulgá-las para pessoas que não tem o domínio técnico no assunto de ultrassom, tornando a linguagem padronizada e compreensível para todas as pessoas que se utilizam do ensaio ultrassônico para tomada de decisões. Este método dispensa a utilização de blocos de referencia o que minimiza custos e controle de qualidade sobre os mesmos.

O termo tamanho equivalente do refletor simplesmente notifica o tamanho de uma indicação natural em relação ao seu formato, posição e reflexão característica. O tamanho do refletor equivalente conforme o método DGS é um refletor no formato de um disco que conforme figura 2.25 é atingido perpendicularmente no seu centro por um feixe sônico e que reflete a onda ultrassônica incidida 100%.

Determinar o tamanho equivalente de uma indicação pelo método DGS significa que o tamanho do disco refletor no local da descontinuidade deve ser determinado através do eco que reflita a amplitude em termos de tamanho equivalente. A quantidade do tamanho do disco refletor é o diâmetro do próprio disco dado na unidade de milímetros [Krautkammer, 2001]. Existem duas maneiras de determinar o tamanho refletor de uma indicação. Uma delas é comparar a amplitude do sinal da indicação com o eco de um refletor conhecido ou com o eco de fundo do material inspecionado. Neste caso é necessário que sejam utilizados transdutores que possuam as curvas DGS que são fornecidas pelo seu fabricante.

Considerando a figura 2.26, segue um exemplo de como determinar o tamanho equivalente (TE) de uma indicação utilizando um transdutor normal nomeado B2S e um material com espessura de 200 mm que contenha uma descontinuidade a uma profundidade de 150mm.

Os passos para a determinação do TE são:

- a) O eco de fundo da espessura do material deve ser ajustado a uma altura de 80% da tela do aparelho de ultrassom utilizado em uma região do material isenta de descontinuidades.
- b) O transdutor deve ser posicionado sobre a descontinuidade, e o eco correspondente deve ser maximizado.

c) Utilizando-se o controle de ganho, realizar a leitura em dB da diferença entre o eco da descontinuidade e o eco de fundo a 80% de altura da tela. Considera-se a título de exemplo +22 dB;

d) No diagrama AVG do transdutor B2S levanta-se uma reta na profundidade de 200 mm indicada na cor amarela até encontrar a curva do eco de fundo no diagrama. Ao atingir a curva de eco de fundo (∞), na mesma reta, reduz-se 22 dB e direciona-se no sentido paralelo ao eixo da distancia (eixo x) indicada na cor vermelha até cruzar com a reta referente à profundidade da descontinuidade que está a 150mm indicada na cor preta. A partir do ponto de cruzamento, realiza-se a leitura da curva do refletor equivalente que estiver mais próxima e que no caso é de 4mm. Este deve ser considerado o tamanho do refletor equivalente encontrado. Outra maneira muito utilizada é através da determinação pelo próprio aparelho utilizado na inspeção. O aparelho de ultrassom USN 60 do fabricante GE tem em seu software instalado o diagrama DGS o que muito auxilia na agilidade da determinação de uma inspeção. Se houver a detecção de uma indicação quando utilizando este aparelho, o valor de seu tamanho equivalente é mostrado na própria tela do equipamento.

O método DGS foi utilizado neste trabalho como base para determinação do tamanho equivalente das indicações detectadas para posterior comparação com o seu tamanho real quando estas indicações foram submetidas ao laboratório metalográfico para sua caracterização.

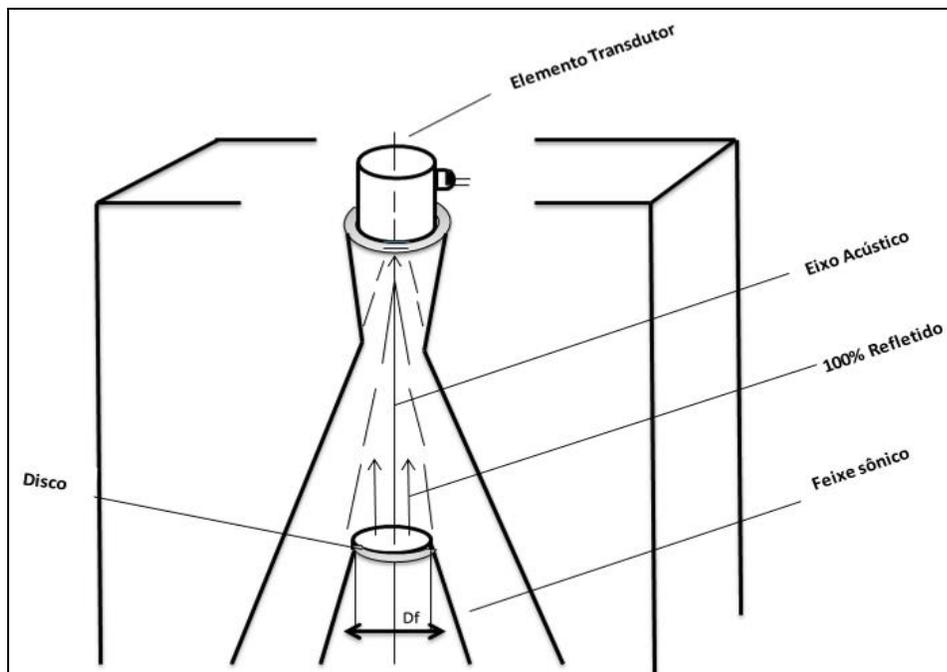


Figura 2.25 - Representação de tamanho equivalente [Krautkammer, 2001].

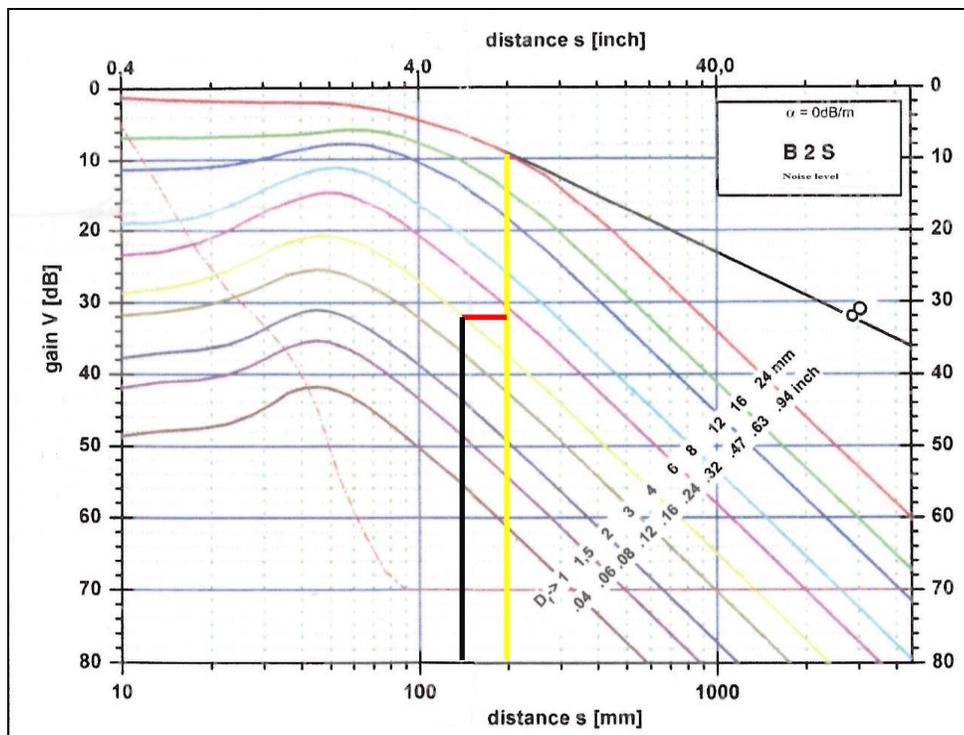


Figura 26 - Determinação do tamanho equivalente de uma descontinuidade [Krautkammer, 2001].

2.9. Indicações encontradas no aço

Na Indústria siderúrgica durante o processo de fusão, laminação, forjamento e tratamento térmico para a fabricação de barras e peças laminadas e forjadas, muitas indicações podem ser geradas. Em outros processos de fabricação de outras empresas siderúrgicas ou metalúrgicas, por exemplo, de juntas soldadas de perfis retos e circunferenciais, ferro fundido, madeira, compósitos, entre outros, indicações de diferentes tipos também podem ocorrer durante o processo de fabricação que podem ser detectados pelo método não destrutivo de ultrassom, seja ele pelo técnico pulso eco convencional ou *phased array*. O ensaio por ultrassom na Indústria Siderúrgica começa a ser realizado dependendo da aplicação do material, já nas etapas iniciais de fabricação, pois se houverem detecções de indicações, o material não segue o processo, evitando perdas e custos desnecessários. Algumas indicações geradas no processo de fabricação de aços laminados e forjados que foram utilizadas na realização deste trabalho são conhecidas por inclusões e dobras de laminação que foram as indicações utilizadas para o desenvolvimento experimental deste trabalho. Essas indicações foram utilizadas por serem as indicações que mais ocorreram nos materiais testados por ultrassom durante o processo de fabricação e de transformação de aços laminados e forjados.

2.9.1. Inclusões

Conforme [Mei et al. 2006] a grande maioria das inclusões não metálicas no aço é constituída de óxidos e sulfetos, portanto o controle do oxigênio e do enxofre do aço é essencial para evitar ou minimizar inclusões. As inclusões são inevitáveis em aços fabricados por processos convencionais e o controle da forma, quantidade e distribuição das inclusões é essencial para o controle de qualidade dos aços. Os aços possuem vários elementos não metálicos em solução. A maior parte delas reage entre si ou com outros elementos não metálicos como o oxigênio e nitrogênio, formando as chamadas “inclusões não metálicas Conforme [Colpaert, 2008; Mei et al. 2006] o oxigênio, enxofre e nitrogênio são os solutos mais comuns. Por isso

define-se que as inclusões são provenientes de impurezas no material que são o fósforo, o enxofre, o manganês, o silício e o alumínio. O surgimento de inclusões ocorre durante a desoxidação dos aços. Um dos exemplos de elementos que causam inclusões é o Fósforo porque devido à fragilidade de trabalho a frio que confere aos aços é considerado um elemento nocivo e por isso suas especificações são rigorosas [Colpaert, 2008]. As inclusões são prejudiciais principalmente quanto à sua quantidade e dimensões durante à exposição do material à esforços cíclicos e alternados. Nos aços-liga, o fósforo é especificado com máximo de 0,04% em certos casos e com 0,025% no máximo em outros casos. As inclusões ocorrem normalmente em faixas de dimensões que podem influenciar propriedades do aço como a ductilidade, resistência à fadiga, resistência à corrosão e outras [Colpaert, 2008]. O conhecimento do efeito das inclusões não metálicas sobre várias propriedades dos produtos de aço fez surgir a chamada engenharia das inclusões e por isso dependendo da aplicação do material, o processo é ajustado para a obtenção de inclusões menos prejudiciais às propriedades do aço [Colpaert, 2008]. A figura 2.27 mostra um exemplo típico de inclusão detectada em um exame micrográfico.

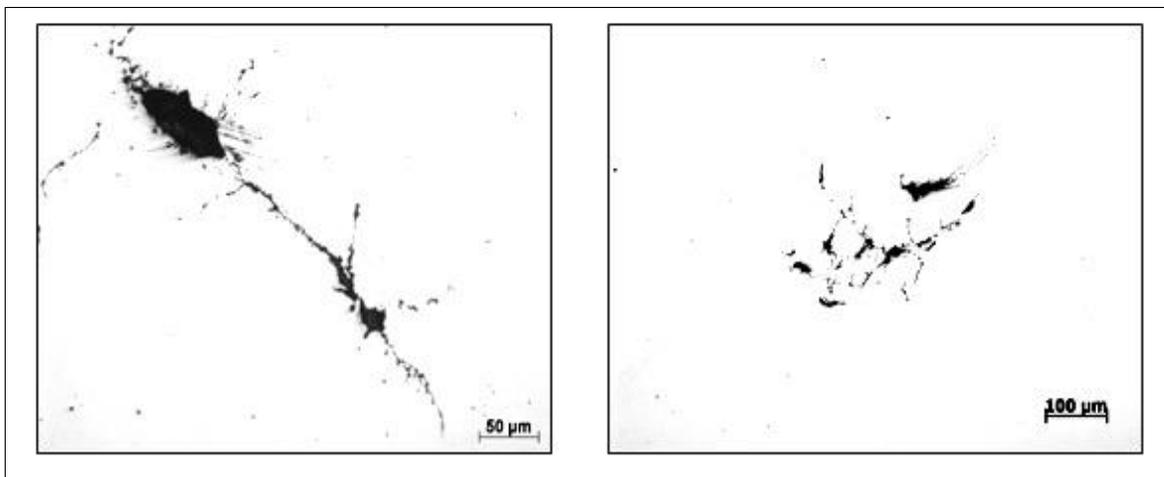


Figura 2.27 - Indicação típica de inclusão não metálica - micrografia realizada em laboratório [Indústria siderúrgica, 2014].

2.9.2. Dobras de laminação

Durante o trabalho a quente, podem acontecer defeitos mecânicos conhecidos por dobras que por sua vez, se não corretamente identificados e removidos, podem originar descontinuidades nos aços durante os processos posteriores ou utilização do material [Colpaert, 2008]. As dobras de laminação ocorridas no aço são depressões oxidadas na superfície do produto localizadas no sentido da laminação, em geral com profundidades consideráveis [Mei et al., 2006]. Essas dobras são constantemente preenchidas de óxidos e apresentam superfície descabornetada. Uma das origens das dobras de laminação ocorre por um alargamento lateral do material submetido a passadas pelo laminador com reduções elevadas e sucessivamente provocando a descontinuidade em ambos os lados do material. Outra possível origem deste tipo de descontinuidade podem ser os cantos vivos em produtos semi acabados gerados por canais reconicionados, descalibrados ou ainda através do forjamento ou laminação incorretos. A figura 2.28 mostra a metalografia de uma dobra de laminação realizada no laboratório da Indústria siderúrgica com profundidade de $612,48\mu\text{m}$.



Figura 2.28 - Indicação típica de dobra de laminação - micrografia realizada no Laboratório metalográfico [Indústria siderúrgica, 2014].

2.10. Pesquisas aplicadas

Conforme mencionado anteriormente o ensaio por ultrassom pode ser aplicado em peças com tamanhos, geometrias e acabamentos superficiais variados. Devido aos critérios de aceitação de normas aplicáveis ao ensaio por ultrassom, à exigência de qualificação do pessoal que o realiza e ao tempo que se leva para inspecionar e relatar os dados de uma inspeção, o custo para realizá-lo é alto. E como durante o processo de fabricação destes diversos tipos de materiais, podem ocorrer descontinuidades que devem ser detectadas durante a inspeção e antes da expedição do material ao cliente, é que este ensaio é considerado importante e deve ser realizado minuciosamente. Esta parte do trabalho mostra a revisão de pesquisas realizadas relativas à aplicação prática do ensaio por ultrassom. A base das pesquisas realizadas sobre os assuntos foram artigos, publicações técnicas e materiais acadêmicos do mundo todo. Inicialmente são apresentadas revisões sobre a confiabilidade de inspeção por END considerando os fatores humanos e casos de não detecção de indicações por esses motivos, bem como suas consequências. Em sequência serão apresentadas comparações de inspeção manual e automatizada por ultrassom em diferentes áreas utilizando corpos de prova de diferentes processos de fabricação e técnicas de inspeção.

2.10.1. Pesquisas sobre os fatores humanos aplicados aos ensaios não destrutivos.

Os fatores humanos influenciam a realização e o resultado de uma inspeção por ensaio não destrutivo e que no passado eram considerados somente no ensaio não destrutivo conhecido por ensaio visual e suas influências da visão humana, pois como o próprio nome diz somente utiliza-se os olhos do inspetor para realizá-lo em materiais. É mostrado brevemente como a visão do ser humano funciona sob diferentes condições: A figura 2.29 mostra parte do olho de um ser humano. A cornea funciona como um acessório que foca a luz e que possui 70 a 80% de habilidade total de foco. O Cílios controla a quantidade de luz que entra nos olhos de acordo com o tamanho da pupila. A retina contém dois tipos de células visuais: os cones, responsáveis pela

visão de cores e pela nitidez, e os bastonetes, encarregados da visão a preto e branco e da visão noturna. Há uma área chamada fovea e quando saudável é a chave da leitura, direção e outras atividades que precisam de habilidades detalhadas. Outra área conhecida como ponto cego, aonde não existem células visuais em uma pequena área da retina onde o nervo óptico penetra o olho e normalmente ocorre em todos os olhos. [Rais, 2015]

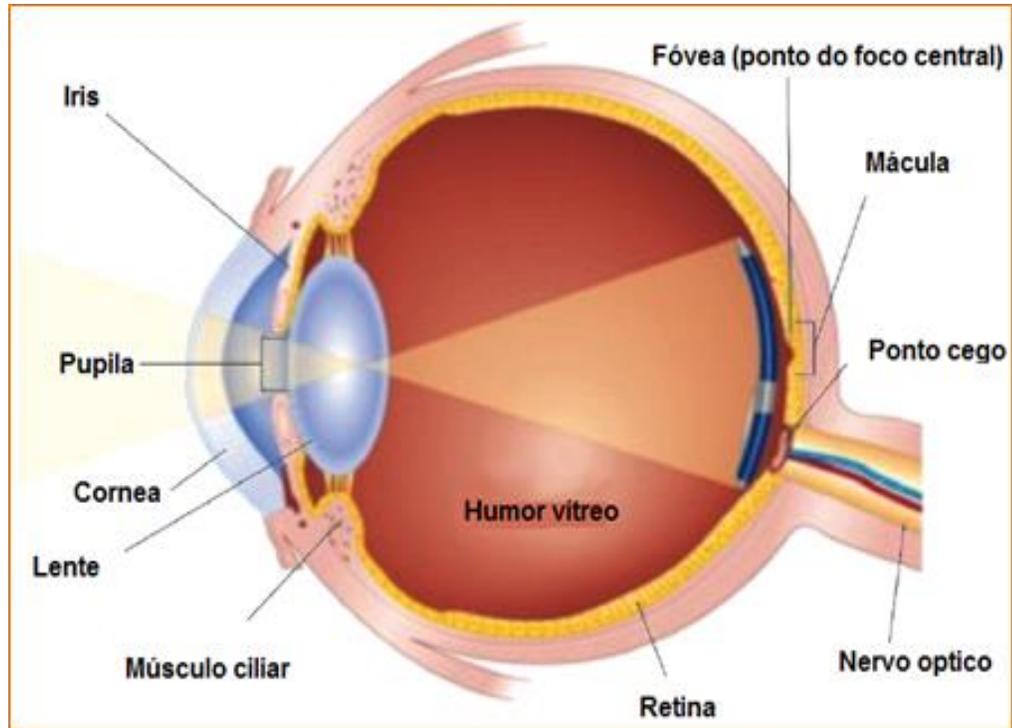


Figura 2.29 - O olho humano [Rais, 2015].

Este trabalho ainda comenta que os fatores como acuidade visual imperfeita em ambos ou um dos olhos, idade avançada, cansaço, substâncias ingeridas como remédios, álcool e cigarros e outros fatores como quantidade de luz, fumaça, temperatura alta, fatores associados à objetos, ou seja, seu tamanho, contorno, contraste com o meio exterior, distância em relação ao mesmo e ângulo de visão pelo observador afetam a capacidade de inspeção e o número de itens que o inspetor pode realizar antes de cair na fadiga. Mesmo que o inspetor possua perfeita acuidade visual perante as normas aplicáveis e que o inspetor tenha grande experiência ele está sujeito a cometer erros ou falhas. Sob algumas condições uma descontinuidade pode não ser detectada devido à fadiga da visão ou devido a ter caído no ponto cego. As condições físicas do inspetor

como saúde, sono, influências externas, psicológicas também devem ser considerados. A motivação leva o inspetor a realizar seu trabalho da melhor maneira possível, e quando motivado o nível de resultados é ótimo. Caso contrário, pode ser ruim, ou seja, o número de probabilidade de detecção pode chegar a números cada vez mais baixos. [Rais,2015].

Outra pesquisa realizada apresentou um trabalho no *5th European American Workshop on Reliability of NDE* sobre prevenção de riscos abordando a utilização de sistemas automatizados e procedimentos de inspeção. A consideração sobre fatores humanos em END requer não somente olhar para o inspetor e atribuí-lo a culpa dos erros cometidos, mas abordar multidisciplinarmente com foco não somente no inspetor, mas também na equipe, tecnologia, organização e ambiente de inspeção. Na pesquisa pelas causas das variáveis de resultados de inspeção, temos que olhar profundamente no sistema e não somente no inspetor. Frequentemente as causas de erros são escondidas nas organizações. Substituir inspeção manual por automatizada pode levar a diminuição de erros. Porém, devemos estar conscientes que toda nova aplicação traz novos erros que devem ser sistematicamente investigadas e controladas. Como visto por vários estudos, a automatização de sistemas de inspeção por END não são livres de erros. O procedimento de inspeção é uma ferramenta importante que deve ser desenvolvido utilizando princípios de fatores humanos e escrito de acordo com requerimentos de especificações e por pessoal qualificado em END. Neste trabalho Bertovic mostrou que o formato do procedimento de inspeção de END é o suporte para uma inspeção precisa por END seja este manual ou automatizada conforme figura 2.30. [Bertovic et al., 2013]

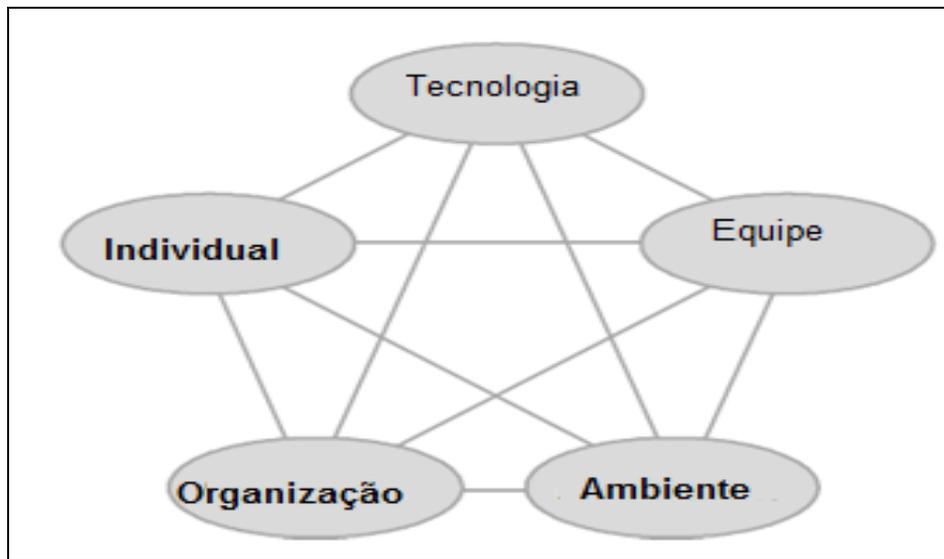


Figura 2.30 - Sistema de visão para a segurança [Bertovic et al, 2013].

Em outra pesquisa, [Rais, 2015] mostra que a indústria aeroespacial é uma das mais afetadas em caso de um erro humano em tempo real ou tempo passado, devido à um resultado de uma inspeção. Em seu trabalho, foi citado que um estudo realizado em 1940 mostrou que 70% dos acidentes aéreos foram atribuídos à fatores humanos ou performance humana. Após 35 anos o mesmo estudo realizado, mostrou que não houve redução nesta porcentagem e que em 12% dos casos dos acidentes, o erro foi atribuído à erros de manutenção de equipamentos aonde está incluído o resultado de inspeção por ensaios não destrutivos. Por exemplo, o acidente ocorrido em Abril de 1988 com a companhia aérea Alhoha Airlines, vôo 243 conforme figura 2.32 mostra a estrutura de uma cabine de uma avião que foi rompida devido à uma falha estrutural. A aeronave envolvida neste acidente foi examinada or inspetores de engenharia, um deles com 22 anos de experiencia e outro com 33 anos de experiencia. Nenhum deles encontrou trincas durante a inspeção que utilizou métodos diferentes de ensaios não destrutivos na fuselagem do avião. Investigações posteriores comprovaram que haviam 240 trincas na fuselagem do avião. Após essa ocorrência, várias considerações sobre fatores humanos foram levantadas sobre pessoal que realiza inspeção. Quando considerou fatores humanos os atributos foram a psicologia humana e funcionamento do corpo sob diferentes condições que inclui a percepção, cognição, memória, interação social e erro, condições ambientais, interface homem equipamento. A análise do acidente citado utilizou o modelo SHEL. Este modelo é utilizado na análise de causas de

problemas e o nome é derivado das iniciais de suas letras. S significa software, ou seja, procedimentos, simbologia, etc... H vem de hardware, isto é, equipamentos ou máquinas, E deriva de *environment* que significa o meio ambiente ou local aonde se desempenha o trabalho e L de liveware ou ser humano. Na figura 2.31 que mostra o modelo, o encaixe ou não das interfaces dos blocos é tão importante como suas características. Um desencaixe pode ser a fonte de um erro humano. Na análise do acidente do voo 243 da Aloha airlines, o modelo SHEL mostrou as seguintes conclusões: Escassez de pessoal, pressão relacionada à tempo para entrega do produto, erros ocorridos durante a noite, interrupção e retomada de inspeção, falha na aprovação do procedimento de inspeção, instruções de trabalho confusas e planos de inspeção inadequados.

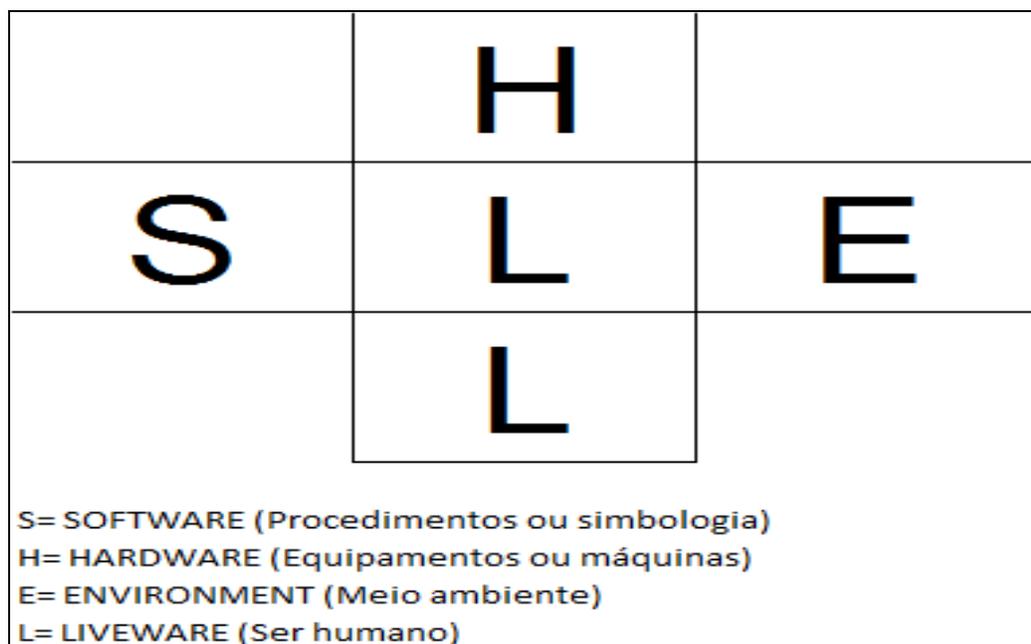


Figura 2.31 - O modelo SHEL [Rais, 2015]



Figura 2.32 - Acidente aéreo da Aloha Airlines [Rais, 2015].

O relatório da análise da causa do acidente do voo 232 da *United Airlines* ocorrida em 19 de Julho de 1989, com o avião *Mc Donnell Douglas DC-10* em *SIOUX, IOWA* realizado pelo [National transportation safety board, 1990] mostra que a causa provável foi a inadequada consideração dada aos limites dos fatores humanos na inspeção e procedimento de controle de qualidade usados pela *United Airlines* na revisão geral do motor que resultou na falha de detecção de uma trinca de fadiga originada por uma descontinuidade não detectada anteriormente em uma área crítica da área do primeiro estágio do disco de turbina fabricado pela *General Electric Aircraft Engines*. O relatório ainda tem o item sobre recomendação para intensificar pesquisas sobre tecnologias emergentes de automação na área de inspeção por ensaios não destrutivos ou para que seja aperfeiçoada a confiabilidade do processo de inspeção. É citado ainda no relatório que tal pesquisa deve encorajar o desenvolvimento e implementação de redundância [dupla checagem] em peças de aplicação crítica como, por exemplo, os componentes de rotação do motor. As figuras 2.33 mostram fotos do acidente referido.

A confiabilidade R de uma redundância de uma inspeção, por exemplo, pode ser determinada pela equação abaixo onde n é o número de inspetores e P é a probabilidade de detecção das falhas ou descontinuidades que o material em inspeção possa conter. Por exemplo, para $P=75\%$ para 1 e 2 inspetores temos:

$$R = 1 - (1 - P)^n$$

$$R_1 = 1 - (1 - 0,75)^1 = 0,75 \text{ ou } 75\%$$

$$R_2 = 1 - (1 - 0,75)^2 = 0,94 \text{ ou } 94\%.$$

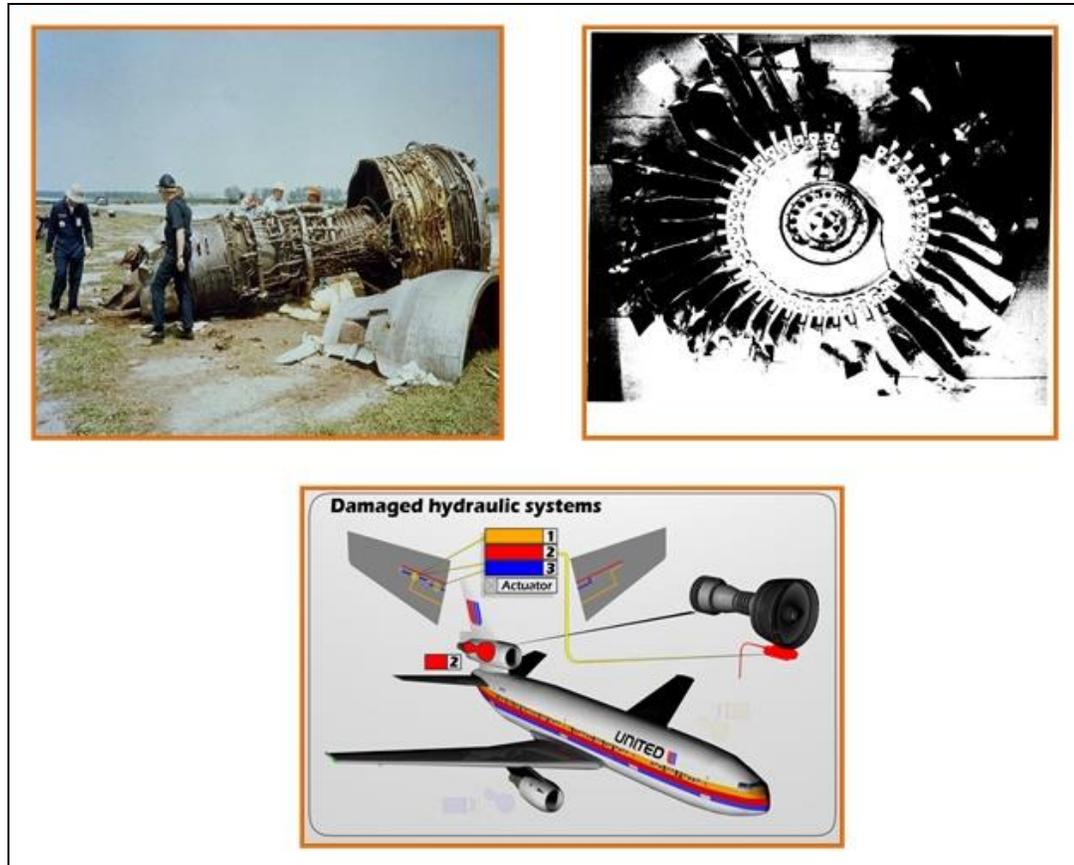


Figura 2.33 - Acidente aéreo do voo 232 da *United Airlines* [Warren, 1990].

O relatório da *National Commission on the BP Deepwater Horizon Oil Spill and Offshore Drilling* de janeiro de 2011, comenta sobre o maior acidente de trabalho e ambiental da história ocorrido no Golfo do México, com uma plataforma da British Petroleum em 20 de Abril de 2010 conforme figuras 2.34. O acidente provocou a morte de sete trabalhadores e o vazamento de cerca de 5 milhões de barris de petróleo no mar durante 87 dias. Para se ter uma ideia do tamanho do vazamento, esse número representa quase o dobro da produção diária brasileira. A investigação conclui que um dispositivo de segurança do submarino tinha várias falhas, não foi testado

corretamente e ainda representa um risco para muitas plataformas de perfuração hoje. Diversas investigações descobriram que a causa da explosão inicial envolveu problemas de gestão e má decisões de operadores. O relatório mostra que testes sugeridos pelo fabricante foram sugeridos mas a empresa BP, em vez disso, seguiu o padrão adotado pela indústria.



Figura 2.34 - Acidente com plataforma da British Petroleum [National, 2011].

Com a demonstração desses resultados, concluímos que a inspeção por técnicas manuais de END está sujeita a não detecção, sub ou super estimação de indicações, de que podem causar problemas no material em seu uso posterior, ou em caso de superestimação há a rejeição de uma peça de qualidade boa ser rejeitada causando aumento de refugo de material sem necessidade. O inspetor de END, no caso de ultrassom, depende fundamentalmente de sua visão, habilidade manual, senso de compilação de informações e seu processamento pelo cérebro este número pode diminuir . Os termos atenção, percepção, foco, memória juntos e utilizados por longo tempo em um ambiente de temperatura baixa, ruído, fumaça ou qualquer tipo de gas, requerem atenção alta. Se as condições forem inversas, há necessidade de atenção extra. Em certas condições de inspeção, principalmente aquelas que duram um longo tempo, o inspetor tem que agir praticamente como um “robô”, por isso os tempos de inspeção devem ter intervalos constantes. Outro método para garantir a qualidade de uma inspeção é aquela citada na pagina 47

deste trabalho que descreve sobre a redundância de inspeção onde existe o aumento da probabilidade de detecção de defeitos ou descontinuidades.

Segundo [Rheume, 2015] a atenção focada total da maioria dos adultos é limitada a 20 minutos, aí então se faz necessário um intervalo para refoque da atenção. Esta atenção pode variar dependendo do tipo de atividade e geralmente pessoas que realizam trabalhos manuais alcançam maiores tempos de atenção e com relação à trabalhos passivos como prestar atenção em uma aula, por exemplo, rapidamente seu foco de atenção é dispersado. Assim, podemos concluir que o pessoal que realiza END deve ter conhecimento além da técnica utilizada, que haja visto é complexa, ou seja, sobre os fatores humanos que afetam e limitam as capacidades de inspeção. E esses fatores devem ser incluídos no treinamento e entendimento das inspeções. Mesmo assim, os gaps ainda estão sujeitos à existir e falhas podem não ser detectadas.

Um método proposto por [Parrish ,2015] descreve soluções avançadas para desenvolvimento de pessoal nas técnicas *TOFD* que significa (*time of flight diffraction*), ou tempo de voo da onda difratada e *phased array* de ultrassom, pois são técnicas que cresceram em utilização tremendamente na última década e são muito complexas de utilizar. Essas técnicas são consideradas a evolução tecnológica do ultrassom convencional pois utilizam parâmetros de inspeção mais completos e complexos. Por isso é imperativo que o pessoal que o utiliza seja qualificado e no seu estudo ele comenta que já é sabido que o ensaio por ultrassom tem provado ser um desafio para muitos quanto à qualificação de todo sistema que o envolve. O método consiste em desenvolver práticas escritas com qualidade e treinar o pessoal em todas elas. Limitar os tipos de equipamentos utilizados, pois há inúmeras fabricantes, softwares, etc..., procurando a padronização. Limitar o desenvolvimento de planos de inspeção para haver padronização entre os mesmos. Qualificar seus procedimentos, revisando-os sempre.

Qualificar o pessoal de END além das provas de certificação, realizar reciclagens constantes. Realizar auditorias em dados de inspeção, em relatórios. Um registro auditável é o princípio de investigação para qualquer método de ultrassom, seja ele convencional, *TOFD* ou *Phased Array*. Realizar treinamentos continuados para ter certeza que seus técnicos estão atualizados nas técnicas de inspeção e aplicações do material que inspeciona. Realizar reuniões mensais de END para trazer os possíveis erros a bordo para realizar correção. Concluindo, Parrish descreve que deve ser colocado mais foco em aspectos de qualidade e nos inspetores de END esforçando para garantir a qualidade, fornecendo aos técnicos melhor formação possível.

As próximas pesquisas são relacionadas à comparações de inspeção por ultrassom pelas técnicas manual convencional e automatizadas, demonstrando os resultados.

Um trabalho desenvolvido por [Carvalho et al., 2006] mostra a confiabilidade em inspeção manual e automatizada para a detecção de indicações por ultrassom em juntas soldadas em tubos. Os defeitos utilizados para a comparação foram os conhecidos por falta de penetração e falta de fusão e foram inseridos intencionalmente nos tubos, ou seja, são artificiais. As técnicas de inspeção por ultrassom utilizadas foram a manual e a *TOFD*. A pesquisa trabalhou com indicações que representaram o limite inferior de detecção, mesmo porque defeitos menores que esses são quase impossíveis de serem introduzidos artificialmente nos cordões de solda. Os resultados de inspeção manual mostraram detecção de 63% para falta de fusão e 77% para a falta de penetração. Para a inspeção automatizada via *TOFD*, a detecção foi de 100% para ambos os tipos de indicações conforme figura 2.35.

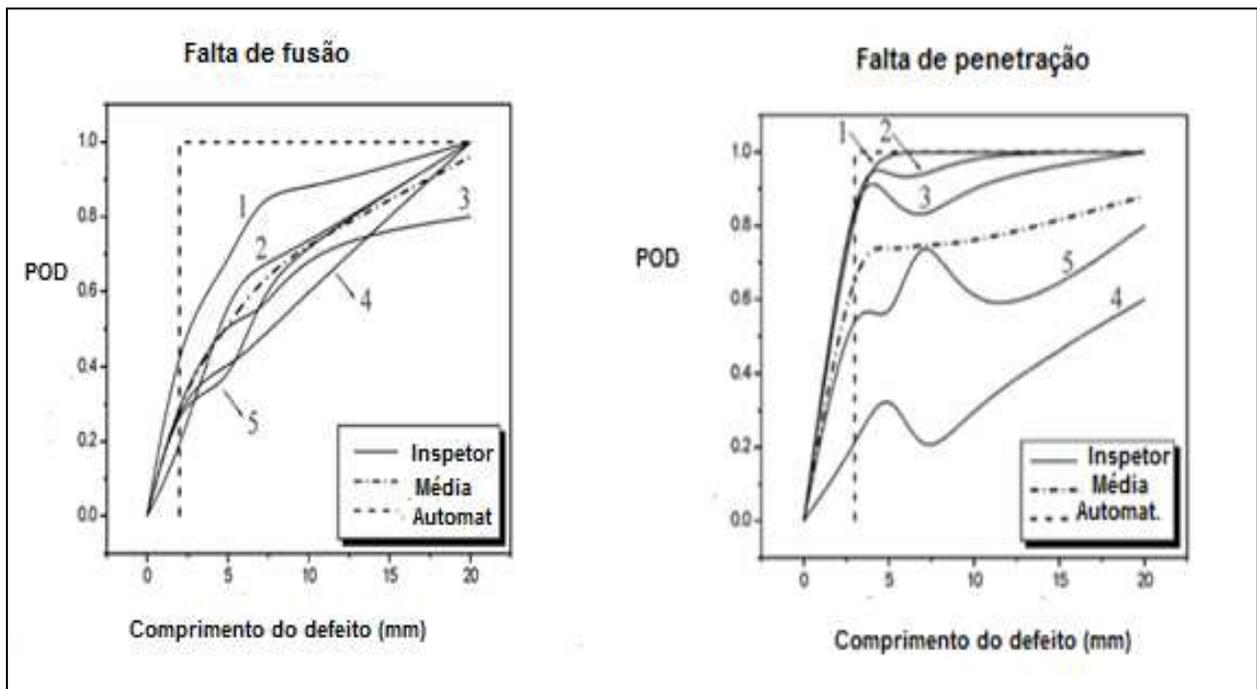


Figura 2.35 - Resultados de inspeção manual x automatizado [Carvalho et al, 2006].

Um artigo publicado por [Rummel, 2015] sobre desafios em confiabilidade em END. Ele desenvolveu um modelo de probabilidade de detecção de indicações onde cada uma delas foi

organizada do tamanho maior para o menor. Foi demonstrado um trabalho que a NASA realizou utilizando vinte e nove indicações conhecidas por trincas de fadiga com características de largura apertada em cordões de solda com condição superficial jateada em ligas de alumínio 2219-T6. Essas trincas foram testadas várias vezes pelos métodos de líquido penetrante, ultrassom via ondas transversais, correntes parasitas e radiografia através de Raios x. Várias avaliações independentes foram realizadas por três operadores habilitados nos diferentes métodos utilizando como referencia de ensaio procedimentos aeroespaciais de inspeção. OS resultados foram reportados por detecção ou não detecção. Todas as trincas foram destruídas e seus tamanhos reais medidos e documentados. Cada sequência de inspeção produziu um banco de dados para detecção em função do tamanho da trinca. Houve variação significativa para detecção de trincas do mesmo tamanho. Ficou claro que uma técnica de análise de dados probabilísticos era necessária.

Os resultados surpreenderam expectativas. No método de ultrassom manual o operador detectou 82 vezes a trinca com comprimento de 5,21 centímetros em 104 oportunidades de detecção conforme figura 2.36. O método utilizado para formatação de dados foi o POD (probabilidade de detecção) e seus resultados forneceram suporte com base em dados de detecção de indicações. As curvas POD são curvas matemáticas, descritas através de uma função cumulativa de probabilidades, nas quais o valor mínimo encontrado é referente a 0% e o valor máximo é referente a 100%.

Os resultados foram reportados para todos os interessados na área de END e serviram de bases de quantificação para validação de equipamentos e conhecimento de suas capacidades. A natureza das curvas POD desafia muitas empresas a praticarem o seu uso, pois vão além do conhecimento, experiência e habilidades sobre as técnicas de END. É muito aceito e usado em todo o mundo, porém Rummel concluiu que o que está faltando é disciplina na engenharia de END para conhecer as capacidades de detecções através de conhecer a mínima descontinuidade detectável a um risco baixo. Rummel descreveu que as áreas de END devem quantificar resultados utilizando dados estatísticos em todas as aplicações e as curvas POD são uma ferramenta que pode auxiliar muito, pois fornece um apoio visual que torna a técnica de END compreensível. Isto significa que além dos conhecimentos de END, alguns conhecimentos básicos sobre estatística podem auxiliar muito para tomada de decisões. Ou seja, quem conhece a área de END que é bastante complexa e tem habilidades sobre a utilização de estatística pode

quantificar os dados de END tornando-os compreensíveis aos que não entendem da técnica propriamente dita e auxiliar na questão de tomada de decisões.

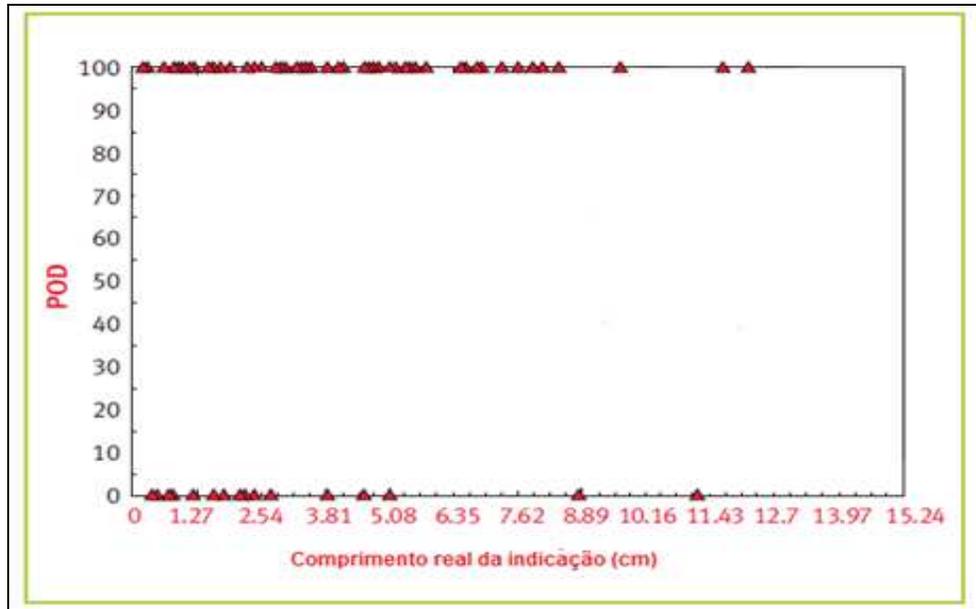


Figura 2.36 - Típica curva de POD [Rummel, 2015].

Após a visão adquirida através das análises sobre as pesquisas realizadas, a modelagem teórica a seguir apresenta os meios pelos quais este trabalho é direcionado para as etapas de análises experimentais, resultados e conclusões.

3.MODELAGEM TEÓRICA

As revisões das pesquisas realizadas descrevem a influência dos fatores humanos nos resultados de inspeção em ensaios não destrutivos, bem como a utilização de sistemas automatizados para garantir confiabilidade de inspeção. De acordo com as pesquisas, a inspeção manual por ultrassom tem confiabilidade menor do que a automatizada, conforme afirma [Annis, 2015], então o objetivo da parte experimental é comparar os níveis de capacidade de detecção de

indicações das técnicas utilizadas, ou seja, a convencional manual por contato direto e a automatizada *phased array* por imersão em barras redondas forjadas e laminadas de aço com acabamento superficial descascado. O equipamento Olympus é automatizado PA e o USN60 da GE inspection é manual operado pela técnica de contato direto e as comparações que serão realizadas utilizando indicações que serão definidas ao longo deste trabalho, gerarão quatro gráficos descrição conforme a seguir. Estes gráficos definirão a capacidade de cada sistema de inspeção e determinarão sua eficácia, isto é, sua capacidade de detecção de indicações.

- 1- Um gráfico representando a detecção de indicações superficiais via ultrassom manual de POD x profundidade [μm].
- 2- Um gráfico representando a detecção de indicações superficiais via ultrassom automatizado de POD x profundidade [μm].
- 3- Um gráfico representando a detecção de indicações internas via ultrassom manual de POD x tamanho equivalente [milímetros]
- 4- Um gráfico representando a detecção de indicações superficiais via ultrassom automatizado de POD x tamanho equivalente [milímetros].

Algumas definições prévias são necessárias e seguem:

O POD: Probabilidade de detecção das indicações será mensurado através de:

N° de detecções das indicações / n° total de oportunidades de detecções.

N° de falhas na detecção das indicações / n° total de oportunidades de falhas na detecção.

Simultaneamente foram medidos outros parâmetros que são fundamentais para a correta distinção e detecção das indicações, ou seja, se os valores pré-definidos destes parâmetros não forem alcançados, as detecções das indicações serão invalidadas. Estes valores foram anotados em uma tabela e expostos juntamente com os gráficos que expressam os resultados de cada tipo de inspeção referidos no início deste item.

Repetitividade em dB

Relação sinal ruído em dB

Mínimo comprimento e profundidade detectável das indicações superficiais.

Mínimo comprimento e tamanho equivalente das indicações localizadas internamente.

Velocidade máxima de inspeção de inspeção para ambos os equipamentos.

Além dos parâmetros descritos acima, outras considerações adicionais serão feitas sobre comprimento das pontas não testadas, calibrações estáticas e dinâmicas dos equipamentos utilizados e equipe operacional que realizou as medições.

3.1. A relação sinal ruído

Também conhecida por razão sinal-ruído, a SNR, do inglês, *signal to noise ratio* é, em termos técnicos, um conceito proveniente da área de telecomunicações. O termo é também utilizado em diversas outras áreas que envolvem medidas de um sinal em meio que contém ruído, definido como a razão da potência de um sinal e a potência do ruído sobreposto ao sinal. Em termos gerais, a relação sinal-ruído compara o nível de um sinal desejado [música, por exemplo] com o nível do ruído de fundo do ambiente onde está sendo tocada essa música [www.nde-ed.org, 2015]. Quanto mais alto for a relação sinal-ruído, menor é o efeito do ruído de fundo sobre a detecção ou medição do sinal. Em ultrassom, portanto, quanto maior a relação sinal ruído, melhor é a distinção de uma indicação detectada. O valor mínimo requerido por normas internacionais como a ASTM E 2375 e AMS 2154 é de 12dB.

A fórmula utilizada para a medição prática da relação sinal ruído é:

$$\Delta\text{dB} = 20 \log A1/A2$$

onde A é a amplitude dos sinais e ΔdB é a diferença de ganho alcançada.

As figura 3.1 e 3.2 mostram como são medidas as relações sinal ruído [Sharma et al, 2014]. Aplicando a fórmula teórica, a medição da relação sinal ruído foi realizada para cada indicação detectada e inicialmente uma medição padrão foi realizada para verificação dos equipamentos em relação à este parâmetro.

Tanto com o USN 60 como para o Olympus *phased array*, utilizou-se para a determinação da SNR inicial uma barra padrão de diâmetro de 180 milímetros na condição superficial descascada que contém três furos de fundo plano retos com diâmetros de 1,2 milímetros, sendo que o FBH utilizado para a medição da SNR via ângulo reto foi o de maior percurso sonico, com 170 milímetros. No caso de determinação via ângulos oblíquos, a mesma barra padrão contém 3

furos de fundo plano no ângulo de 45°, também foi utilizado FBH de maior percurso sônico, no caso de 117 milímetros. A razão pela qual utilizo-se os FBH's de maiores percursos sônicos é que se a SNR mínima requerida for atingida no caso de maior percurso sônico, consequentemente será também atingida nos percursos maiores. As medições com o aparelho USN 60 foram feitas manualmente pelo inspetor de ultrassom. No caso da medição pelo equipamento *phased array*, esta foi realizada dinamicamente através da passagem do padrão de calibração do ensaio de ultrassom. Assim o módulo do ultrassom *phased array* verificou se o sinal proveniente dos FBH's citados foi detectado e se o seu nível de amplitude e ruído apresentados na tela do equipamento estão dentro do especificado.

Podemos observar através da figura 3.1 que o ruído do equipamento USN 60 está a aproximadamente 3% da altura da tela conforme indicado pela linha de base preta na figura da tela do aparelho de ultrassom e o sinal detectado referentes ao FBH é de aproximadamente 13% conforme indicado pela seta à direita do aparelho de ultrassom. A diferença então é de $\Delta\text{dB} = 20 \log 13/3$, então é de 12,73dB, ou seja é maior que o especificado [12dB], portanto adequado.

A figura 3.2 ilustra que o ruído do equipamento automatizado da Olympus está a aproximadamente 5% da altura da tela conforme indicado pela linha de base preta na figura da tela do aparelho de ultrassom e o sinal detectado referentes ao FBH é de aproximadamente 20%. A diferença então é de $\Delta\text{dB} = 20 \log 20/5$, então é de 12,04dB, ou seja é maior que o especificado [12dB], portanto adequado.

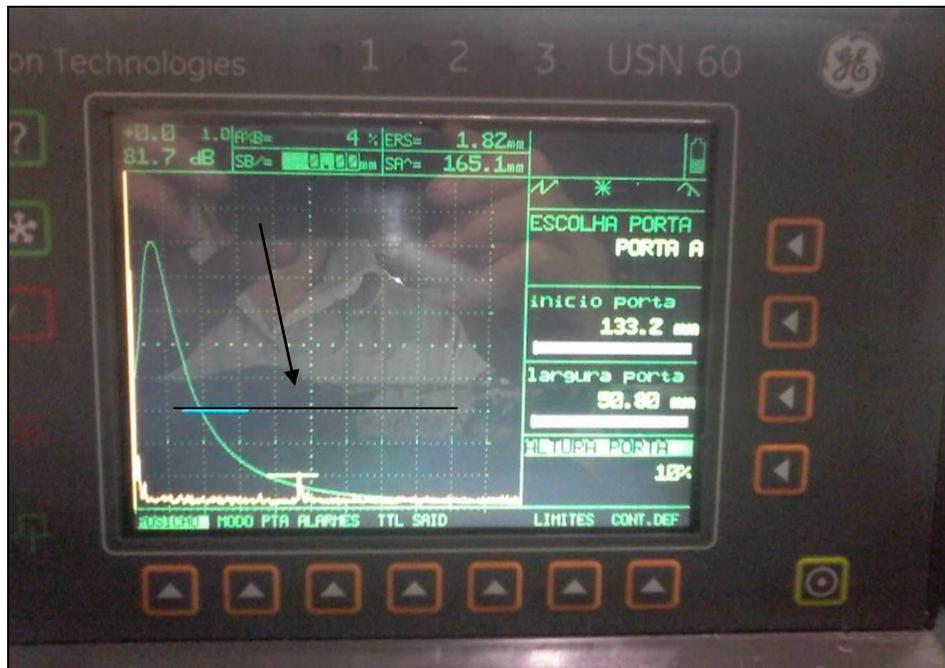


Figura 3.1 - Demonstração da relação sinal ruído no equipamento USN 60 [Indústria siderúrgica, 2015]

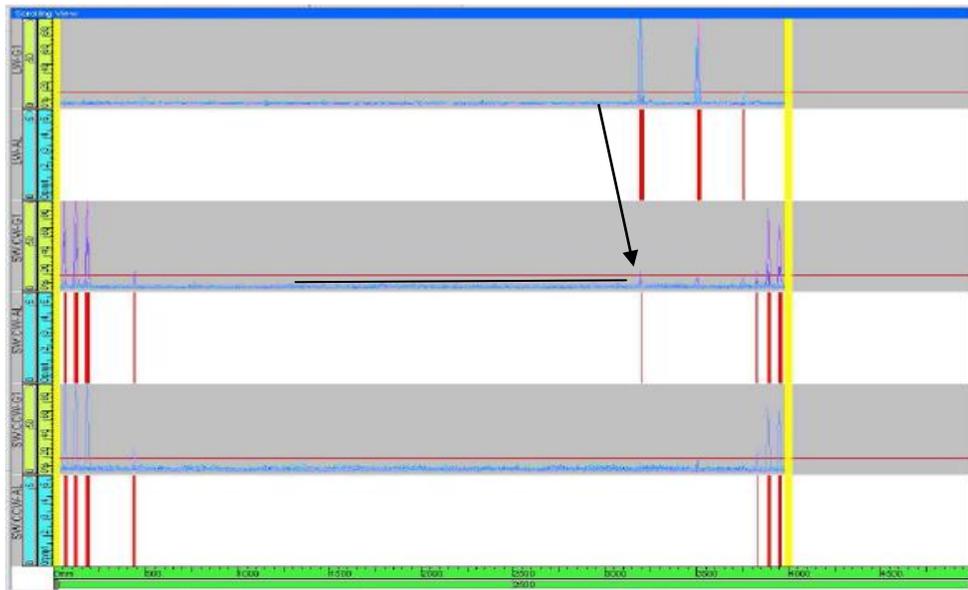


Figura 3.2 - Demonstração de relação sinal ruído no equipamento *phased array*, [Indústria Siderúrgica, 2015].

3.2. A repetitividade

A repetitividade no ensaio por ultrassom é adquirida através de uma medida prática que define qual é o valor na unidade de decibéis que um sinal de ultrassom pode variar em relação à sua amplitude [Sharma et al., 2015]. No caso de equipamentos automatizados, o fabricante do equipamento da Olympus descreve em seu manual que o valor que pode ser conseguido na prática do uso deste equipamento automatizado de PA é de $\pm 2,5\text{dB}$. Já no caso do ultrassom convencional via contato direto, o valor adotado como referencia será o mesmo, ou seja, $\pm 2,5\text{dB}$. Isto significa que um material que possui um sinal detectado por ultrassom quando submetido à um novo teste ou à vários testes, poderá variar em relação ao primeiro sinal em um valor de $\pm 2,5\text{dB}$ de amplitude de sinal desde que haja a reprovação em caso de detecções indicações com critério de aceitação reprovadas. Em termos práticos podemos visualizar na figura 3.3 como a repetitividade é medida e como é importante que este parâmetro esteja dentro do valor de variação permitida por normas internacionais de relação sinal ruído para o ensaio de ultrassom, seja ele convencional ou automatizado, manual ou *phased array*. Se medirmos todas as vezes que as indicações forem detectadas considerando a variação de amplitude de cada sinal detectado, e este sinal estiver acima do limiar de reprova e dentro de uma variação de $\pm 2,5\text{dB}$, então a repetitividade está dentro do especificado. No caso dos testes práticos, todas as amplitudes de cada sinal foram anotadas e as variações registradas em uma planilha. A repetitividade é considerada dentro do especificado tanto em relação à detecção do sinal proveniente da indicação variando dentro da amplitude de $\pm 2,5\text{dB}$ como da relação sinal ruído que deve estar sempre no mínimo de 4:1, ou seja, 12dB. A repetitividade é um parâmetro que só será válido se na presença de qualquer indicação, se esta for detectada. Todas as indicações tiveram suas amplitudes anotadas para verificação da repetitividade onde a 1º medição da amplitude do sinal da indicação detectada é considerada a referencia para para as próximas medições e suas variações.

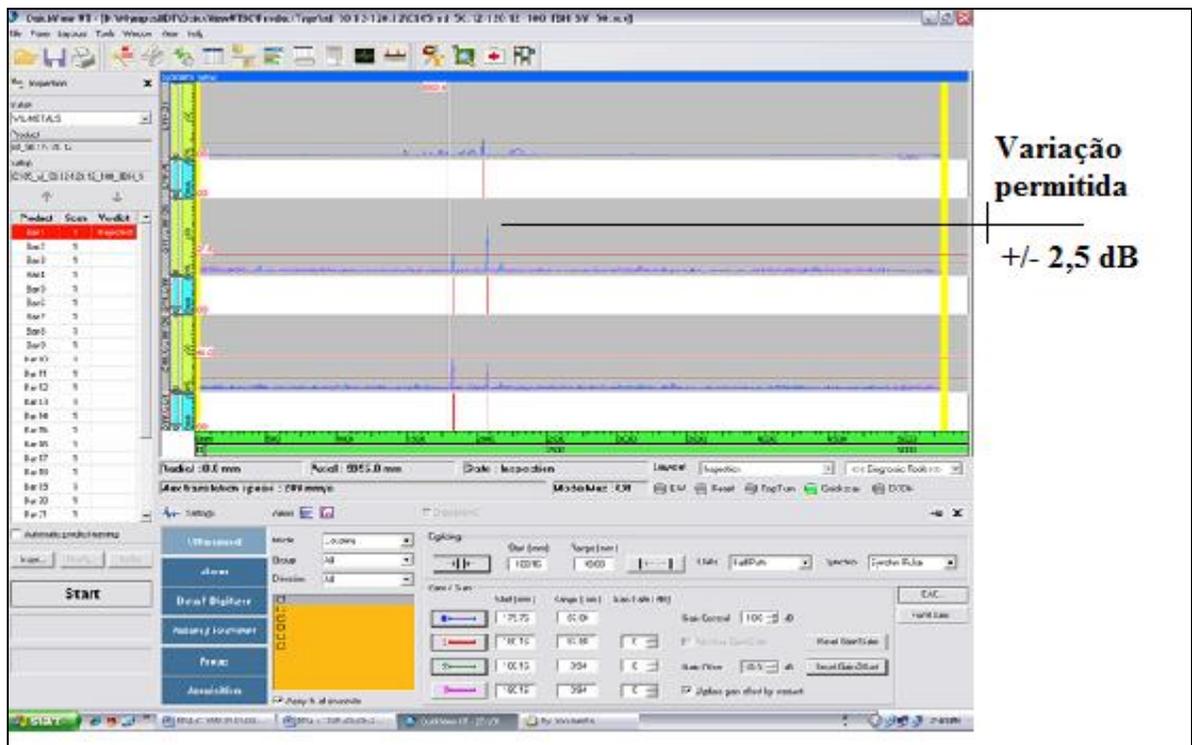


Figura 3.3 - Demonstração de repetitividade no equipamento *phased array* [Indústria siderúrgica, 2015].

3.3. Velocidade máxima de inspeção

As máximas velocidades a serem empregadas no ensaio convencional e automatizado dos equipamentos USN 60 e *quick scan phased array* por ultrassom são determinantes para a obtenção da mínima indicação detectável, pois são as máximas velocidades que foram empregadas nos testes práticos e que determinaram a capacidade de detecção dos equipamentos. Inicialmente as velocidades ajustadas para ambos os equipamentos foram de 150 milímetros por segundo pois é a velocidade máxima que pode ser empregada para inspeções via ultrassom convencional definidas por várias normas internacionais, como por exemplo a ASTM A 388, 2011. Se as velocidades forem ultrapassadas além dos valores determinados nos testes práticos, não é possível garantir o mínimo defeito detectável, significando que na prática se a velocidade for maior que a especificada, pode haver a não detecção de uma indicação.

Para o caso do equipamento automatizado da Olympus, é necessário entender que a máxima velocidade de inspeção deve levar em consideração os parâmetros conhecidos por APD e RPD que significam axial pulse density ou densidade axial de pulso e radial pulse density ou densidade radial de pulso respectivamente. Isto significa que o material inspecionado é varrido nestas duas posições e caso não sejam ajustadas adequadamente, pode não haver cobertura total de pistas de inspeção e sobreposição adequada durante o ensaio. A figura 3.4 mostra as distancias relacionadas com APD e RPD bem como a que distância radial e axial deve ser emitido um pulso ultrassonico de modo que haja a cobertura total das pistas de inspeção radiais e axiais a serem inspecionadas. Se não houver a emissão de um pulso dentro da distância necessária, é possível a não detecção de uma indicação [Eufrásio, 2015].

No caso do aparelho USN 60, a maxima velocidade, apesar de ser empregada manualmente pelo inspetor, está relacionada com o parametro taxa de repetição de pulso que significa o número destes pulsos transmitidos por segundo e também é conhecido por PRF ou frequência de repetição de pulsos. Quanto mais baixa a taxa de repetição de pulso, menor é velocidade de varredura que se consegue empregar. Para ambos os equipamentos a APD, RPD e taxa de repetição de pulso foram adequadas para as suas respectivas configurações de trabalho. No caso das inspeções manuais não existe a garantia de cobertura de pistas de inspeção e sobreposição ideal como existe no caso das inspeções automatizadas.

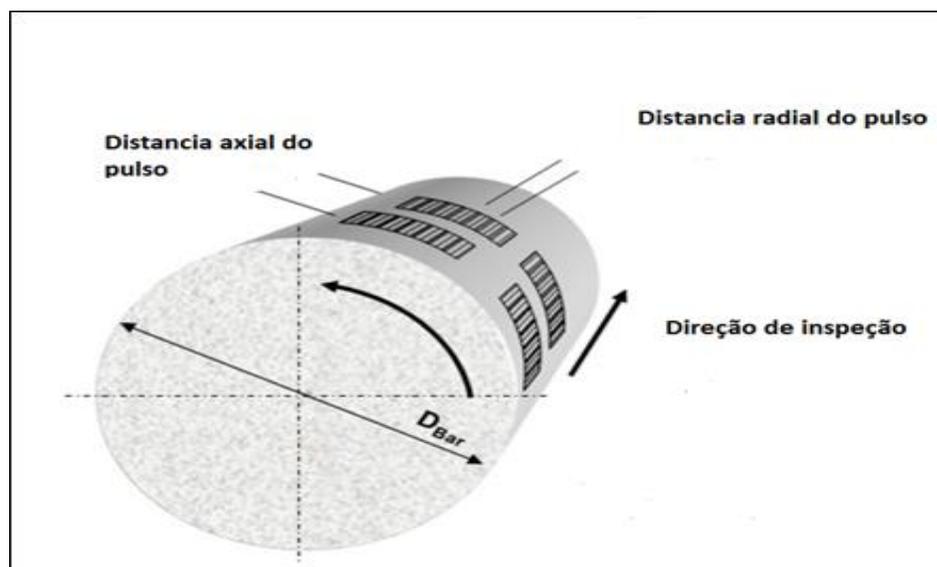


Figura 3.4 - Coberturas radial e axial [Bolten, 2014].

3.4. O comprimento das pontas não testadas

O comprimento das pontas não testadas é um fator intrínseco ao ensaio por ultrassom automatizado, significando que na entrada e saída de uma barra que é ensaiada por um sistema automatizado de ultrassom, uma determinada região não terá cobertura de inspeção. Isto se deve ao fato de que no momento da entrada e saída de uma barra em um sistema automatizado, existe um pico justamente causado pelo movimento de entrada e saída do material e este pico não permite a leitura de uma possível indicação nesta região. O comprimento das pontas não testadas foi determinado através de testes práticos utilizando os padrões de calibração que contém indicações artificiais e confirmando com as barras que continham indicações naturais que estavam localizadas próximas das pontas. O valor encontrado foi de 20 milímetros para cada ponta, ou seja as pontas dos materiais na entrada e na saída não são inspecionados nesta faixa de comprimento. Este valor é excelente quando falamos em inspeção automatizada. Normalmente os valores de pontas não testadas em equipamentos de inspeção automatizada tem valores em média de 100 milímetros para cada ponta. Sobre estes valores não testados, há duas possibilidades de disposição: Corte das pontas no valor de 20mm de cada lado ou ensaio manual por ultrassom. No caso do equipamento USN 60, é possível a cobertura das pontas somente pela varredura manual, porém sabendo que não é possível a garantia de sobreposição e varredura da área total.

3.5. Parâmetros de calibração dos equipamentos utilizados

Antes de qualquer inspeção de materiais por ultrassom, é realizada necessariamente a calibração de velocidade sônica e ajuste do *delay* de transdutores, bem como a verificação da sensibilidade dos equipamentos e acessórios a serem utilizados. O equipamento de ultrassom USN 60 que é o convencional manual operado por um inspetor nível II de ultrassom utiliza o método DGS de calibração e eletronicamente já possui as curvas em seu software. Inicialmente verifica-se a sensibilidade do transdutor, acoplado-o em uma superfície que contenha em seu

final um furo de fundo plano de tamanho conhecido. Se o transdutor detectar o furo de fundo plano indicando o tamanho do FFP, a sensibilidade é considerada aprovada e é possível ir para a próxima etapa. Ajustar a velocidade sônica do material a ser inspecionado que deve ser realizado através do parâmetro auto calibração existente no aparelho USN 60. A auto calibração pode também ser realizada utilizando um bloco conhecido por Bloco nº1. Após este ajuste utilizando o bloco nº 1 realiza-se novamente a auto calibração no material a ser ensaiado para correção da velocidade sônica. Em seguida seleciona-se o transdutor a ser utilizado. Posteriormente escolhe-se a sensibilidade desejada, registra-se o eco de fundo do material a ser inspecionado a uma altura, por exemplo, de 80 % na tela do aparelho de ultrassom, liga-se a curva DGS e então a mesma é automaticamente traçada e a sensibilidade desejada está pronta. O único cuidado que o inspetor deve considerar é o valor campo próximo do transdutor utilizado [GE inspection, 2013]. No caso das inspeções utilizando cabeçotes normais para detecção de defeitos internos a segunda etapa, ou seja, a auto calibração é realizada no próprio material a ser inspecionado. No caso de inspeções utilizando cabeçotes angulares para detecção de defeitos superficiais e sub superficiais a segunda etapa é realizada no Bloco nº1 e é adicionado um valor de 2 dB para correção de transferência para a inspeção do material desejado. Para o equipamento de ultrassom Olympus que é o *phased array* automatizado utiliza-se um sistema adicional em relação ao USN 60 que é o de alinhamento dos cassetes de transdutores. O alinhamento é manual e mecânico e tem o objetivo de ajustar os sinais das sondas para que seja possível a realização do próximo passo que é o ajuste dos sinais. Para o ajuste dos sinais, é utilizada para cada cassete uma barra padrão que contém indicações artificiais, que possuem furos de cilíndricos, conhecidos por SDH, furos de fundo plano, os FBH e os entalhes superficiais. Os três tipos de defeitos foram produzidos artificialmente pela Olympus que é o fabricante do equipamento conforme figura 3.5.

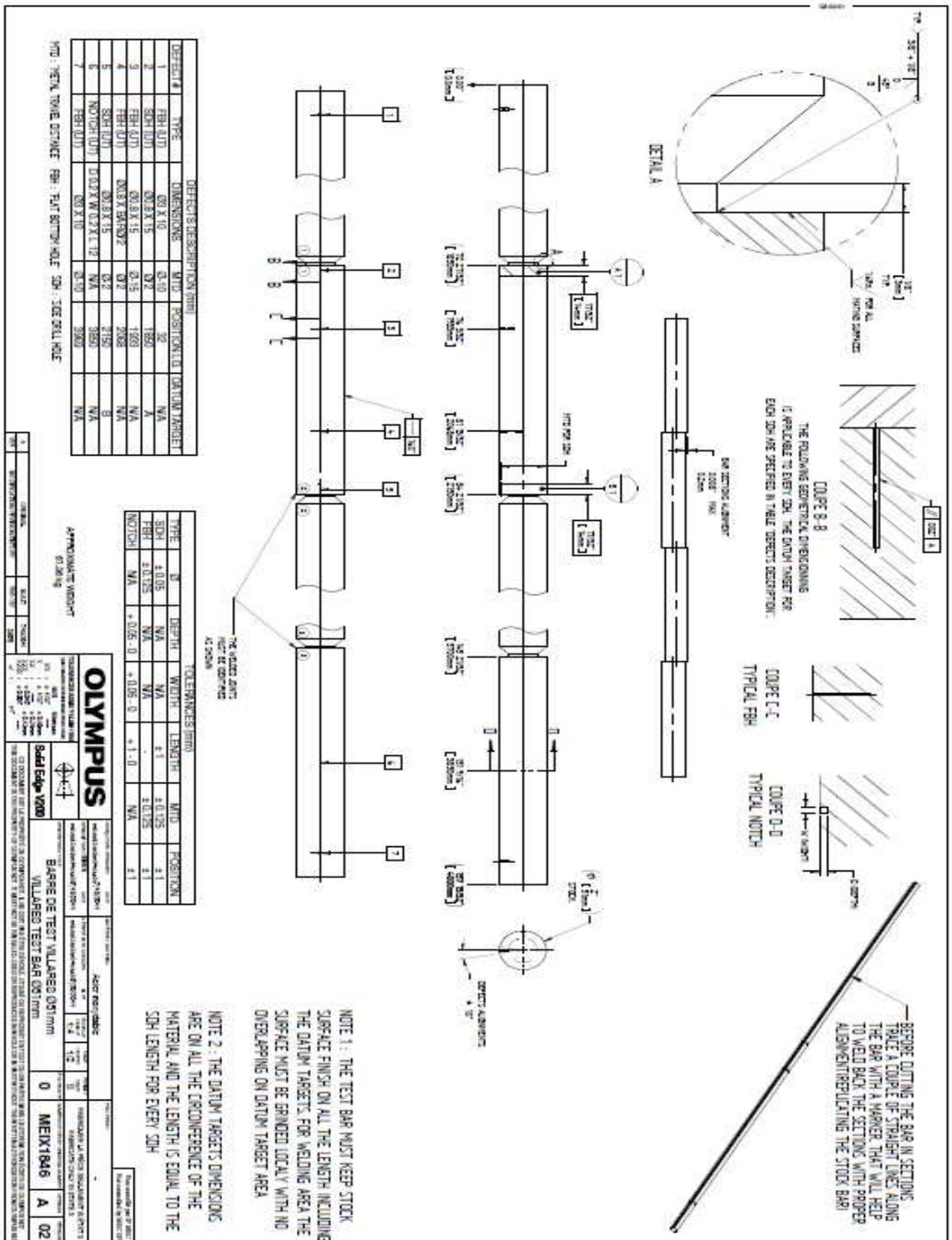


Figura 3.5 - Desenho do padrão de calibração estática de ultrassom - Procedimento interno F99.215 - Ensaio por ultrassom *phased array* em barras laminadas e forjadas [Indústria siderúrgica, 2014].

As indicações artificiais que são os FBH, SDH e entalhes superficiais devem ter suas amplitudes ajustadas para todos os elementos dos transdutores entre 70 a 90% da tela do equipamento. Esta calibração é realizada automaticamente pelo equipamento no modo off-line e tem o mesmo objetivo da calibração do USN 60.

A calibração do cassete C105 que inspeciona faixas de materiais entre 50 e 119 milímetros de diâmetro leva cerca de 20 minutos para calibrar todos os canais dentro da especificação [80% \pm 10%] de amplitude de sinal na tela do equipamento. A figura 3.6 ilustra o resultado de uma calibração utilizando o padrão da figura 3.6

Calibrate ?	Channel	Type	Detail	Law	Amp. found (%)	Amp. Var.
<input type="checkbox"/>	LW1	Gate 1	<input type="checkbox"/>	9	78.4%	1
<input type="checkbox"/>	LW2	Gate 1	<input type="checkbox"/>	9	83.1%	1
<input type="checkbox"/>	LW3	Gate 1	<input type="checkbox"/>	9	77.6%	2
<input type="checkbox"/>	LW4	Gate 1	<input type="checkbox"/>	9	83.5%	3
<input type="checkbox"/>	LW5	Gate 1	<input type="checkbox"/>	9	81.6%	1
<input type="checkbox"/>	LW6	Gate 1	<input type="checkbox"/>	9	77.3%	3
<input type="checkbox"/>	SW1.CDW	Gate 1	<input type="checkbox"/>	9	78.4%	2
<input type="checkbox"/>	SW1.CDW	Gate 1	<input type="checkbox"/>	9	81.6%	2
<input type="checkbox"/>	SW2.CDW	Gate 1	<input type="checkbox"/>	9	85.9%	7
<input type="checkbox"/>	SW2.CDW	Gate 1	<input type="checkbox"/>	9	81.2%	1
<input type="checkbox"/>	SW3.CDW	Gate 1	<input type="checkbox"/>	9	81.2%	1
<input type="checkbox"/>	SW3.CDW	Gate 1	<input type="checkbox"/>	9	81.6%	2
<input type="checkbox"/>	SW4.CDW	Gate 1	<input type="checkbox"/>	9	81.6%	2
<input type="checkbox"/>	SW4.CDW	Gate 1	<input type="checkbox"/>	9	81.2%	1
<input type="checkbox"/>	SW5.CDW	Gate 1	<input type="checkbox"/>	9	77.6%	3
<input type="checkbox"/>	SW5.CDW	Gate 1	<input type="checkbox"/>	9	82.0%	2
<input type="checkbox"/>	SW6.CDW	Gate 1	<input type="checkbox"/>	9	76.5%	3
<input type="checkbox"/>	SW6.CDW	Gate 1	<input type="checkbox"/>	9	77.6%	3

Figura 3.6 - Calibração das Sondas do Cassete C 105 [Indústria Siderúrgica, 2014].

A calibração do cassete C160, ilustrada na figura 3.7 que inspeciona faixas de materiais entre 120 e 170 milímetros de diâmetro leva cerca 40 minutos para calibrar todos os canais dentro da especificação [80% \pm 10%] de amplitude de sinal na tela do equipamento.

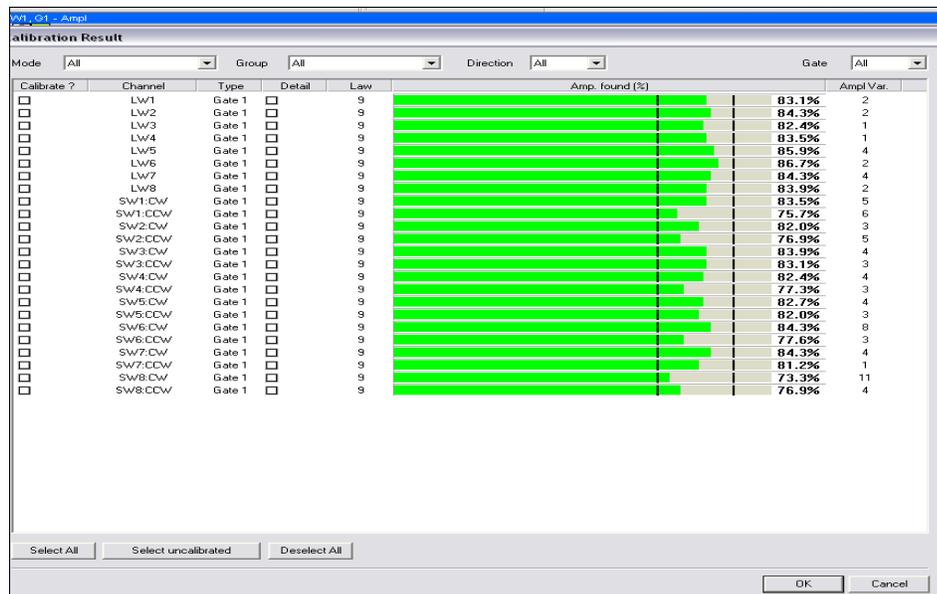


Figura 3.7 - Calibração das Sondas do Casette C 160 [Indústria Siderúrgica, 2014].

A calibração do cassette C215 ilustrada na figura 3.8 que inspeciona faixas de materiais entre 171 e 254 milímetros de diâmetro leva cerca 60 minutos para calibrar todos os canais dentro da especificação [80% ± 10%] de amplitude de sinal na tela do equipamento.

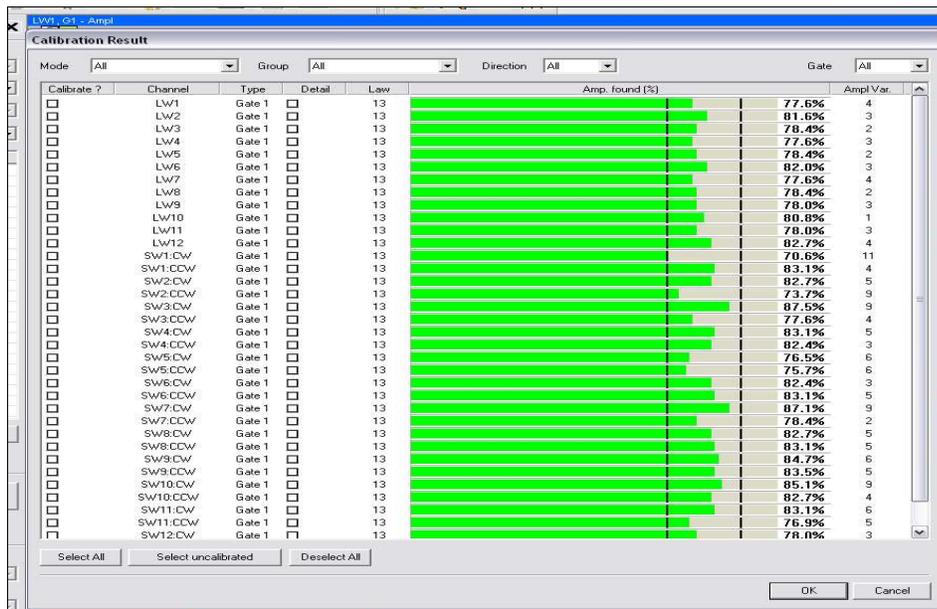


Figura 3.8 - Calibração das Sondas do Casette C 215 [Indústria Siderúrgica, 2014].

3.6. Parâmetros de calibração dinâmica do equipamento PA

Para o equipamento *phased array* da Olympus, após a calibração estática realizada, o próximo passo antes da realização da inspeção é a calibração dinâmica que consiste em passar uma barra conforme figura 3.9 que é do mesmo material e diâmetro do material a ser inspecionado. A barra padrão contém indicações artificiais com furos de fundo plano de diâmetros e profundidades conhecidas. O objetivo desta calibração dinâmica é ajustar a sensibilidade do ensaio para a realização da inspeção dos materiais. Antes do início das inspeções, o padrão é inserido na linha de transporte do equipamento e se as indicações artificiais que este padrão possui forem detectadas, a sensibilidade está ajustada e o alinhamento e a calibração estática foram bem-sucedidos. Verifica-se ainda a relação sinal ruído que deve ter mínimo de 12dB. Em caso de detecção das indicações artificiais dentro da relação sinal ruído especificada, a inspeção pode ser iniciada. Em caso de não detecção ou não atingimento da mínima relação sinal ruído especificada, a calibração estática, alinhamento e ajuste da suspensão do equipamento devem ser realizadas novamente até que se atinja o objetivo, ou seja, a detecção das indicações artificiais dentro da SNR requerida.

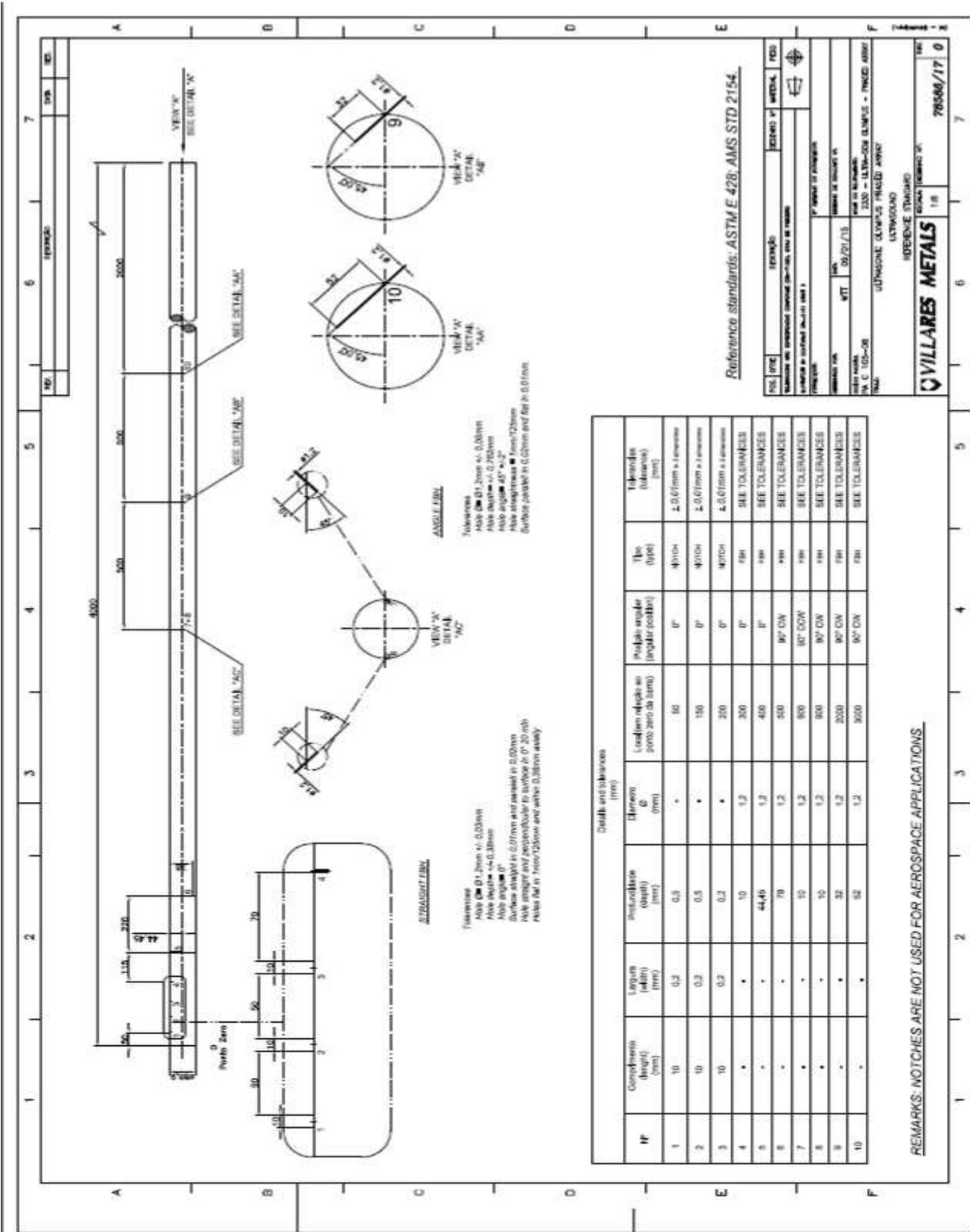


Figura 3.9 - Desenho do padrão de calibração dinâmica de ultrassom - Procedimento interno F99.215 - ensaio por ultrassom *phased array* em barras laminadas e forjadas, [Indústria siderúrgica, 2014].

Para uma calibração correta, o padrão de referencia de calibração do ensaio por ultrassom deve ser do mesmo material e condição superficial ou similar em relação ao material a ser ensaiado, possuir o mesmo tratamento térmico e processo de fusão e conformação plástica. A técnica da correção por transferência deve ser utilizada somente quando houver necessidade de compensações de ganho devido à utilização de padrões similares para a calibração tanto da inspeção manual quanto da convencional.

3.7. Equipe Operacional

Os inspetores operadores dos equipamentos USN 60 e *phased array* são qualificados e certificados como inspetores de ultrassom nível II na técnica de contato direto ou varredura manual e na técnica de *phased array* conforme a ASNT [American Society for Non Destructive Testing] e sua prática recomendada SNT-TC-1A, 2011 e a norma NAS 410 [National Aerospace Standard, 2008]. Esta necessidade demonstra o nível de exigência e capacitação do tipo de mão de obra envolvida nos ensaios não destrutivos.

4. ANÁLISE EXPERIMENTAL

Foram separadas barras de diferentes tipos de qualidade de materiais, como por exemplo inox austeníticos, martensíticos e ferríticos, além de aços para construção mecânica e ligas especiais de diâmetros entre 81 e 180 milímetros com condição superficial descascada. As barras foram identificadas e numeradas de acordo com a sua ordem de produção e corrida. As barras separadas têm em média 5 metros de comprimento e possuem indicações naturais em determinado local das mesmas. Todas as barras que contem indicações naturais sejam elas localizadas na superfície ou internamente foram inspecionadas pelo equipamento manual de

ultrassom USN 60 e inseridas na linha de transporte para inspeção por ultrassom *phased array* cada uma em média 20 vezes.

A sequência das inspeções por ultrassom tanto no equipamento PA como no USN 60 foi aleatória. A seção das barras ensaiadas teoricamente cobriu 360° no diâmetro e 100% do comprimento, ou seja, total cobertura radial e axial. Após as medições, as barras identificadas que continham indicações foram cortadas exatamente no local das mesmas e tiveram amostras cortadas para análise e caracterização no laboratório metalográfico para identificar e fazer fotos das profundidades máximas das indicações localizadas na superfície e de identificar e fazer fotos das indicações localizadas internamente nos materiais.

A parte complementar após a caracterização das indicações foi colocar lado a lado as fotos realizadas pelo laboratório com as suas respectivas amplitudes de sinais de ultrassom detectados por ambos os equipamentos de ultrassom. Assim, as descontinuidades naturais localizadas na superfície dos materiais possuem as fotos da indicação na superfície, micrografias, tela de amplitude do sinal do equipamento USN 60 e tela de amplitude do sinal do equipamento *phased array*. Já, as descontinuidades naturais localizadas internamente nos materiais possuem as micrografias, tela de amplitude do sinal do equipamento USN 60 e tela de amplitude do sinal do equipamento *phased array*, pois não é possível tirar fotos físicas do interior do material. Todas as fotos das indicações e dos sinais que as indicações são representadas nos equipamentos de ultrassom, bem como as micrografias podem ser visualizadas no anexo deste trabalho. O período dos testes foi de 11/2013 à 06/2014.

O número total de testes foi de 1506. Todas as medições foram registradas nos anexos 1,2, 3, 4, 5 e 6 conforme a detecção ou não da indicação, bem como os parâmetros descritos no referencial teórico deste trabalho e inseridas nas tabelas 4.1, 4.2 e 4.3 que identificam os materiais utilizados nos testes, o local das indicações encontradas, as profundidades e tamanhos equivalentes, as repetitividades, relação sinal ruído, e as porcentagens de detecção das indicações de cada material ensaiado. As três tabelas foram criadas devido à necessidade de separação dos diâmetros em três faixas diferentes. O motivo é que o equipamento PA possui um cassete para cada faixa de diâmetro conforme descrito no item 3.5 deste trabalho.

Tabela 4.1 - Identificações das medições das indicações pelo cassete C 105 E USN 60

Ordem de Serviço	Material	Ø	Local da indicação	PS	P	C	Rep. manual		Rep. automatizada		SNR manual	SNR automatizada	Detecção da indicação via manual	Detecção da indicação via automatizada	Velocidade de inspeção manual (mm/s)	Velocidade de inspeção automatizada (mm/s)	Nº de testes
1598955	VC 140	82,55	Superficial	55	366,19	15	-4	2	-2	2,5	8	18	50%	100%	150	250	20
1592459	VC 150	81,00	Superficial	80	781,53	27	-2	2	-2	2,5	12	19	100%	100%	150	250	20
1592459	VC 150	81,00	Superficial	79,3	569,45	20	-3	3	-2,1	2,5	13	19	89%	100%	150	250	20
1595264	V316XLUF	101,60	Superficial	100	477,43	18	-3,5	3	-2,23	2,5	10	18	90%	100%	150	250	20
1596996	VH13ISO	101,60	Superficial	98	1700	16	-2	2	-2,42	2	18	19	100%	100%	150	250	20
1592549	VC 150	81,00	Superficial	80	325,8	12	-4	2	-1,89	2,25	9	18	48%	100%	150	250	20
1608830	N2379BE	101,00	Superficial	99	872,12	15	-2	2	-2,4	1,8	16	19	100%	100%	150	250	20
1608830	N2379BE	101,00	Superficial	97	2400	29	-2	1,5	-2,75	2	20	20	100%	100%	150	250	20
1584962	N7734QA	101,00	Superficial	96	698,55	16	-2	1,8	-2,3	2,5	16	20	100%	100%	150	250	20
1584962	N7734QA	101,00	Superficial	99	445,83	19	-4	4	-2,25	2,05	14	18	70%	100%	150	250	20
1584962	N7734QA	101,00	Superficial	97	1200	24	-2	2	-2,5	2,1	18	18	100%	100%	150	250	20
1609845	VSM14	120,00	Superficial	118	389,52	15	-4	5	-2,48	2,4	11	20	65%	100%	150	250	20
1609845	VSM14	120,00	Superficial	116	433,35	26	-4	4	-2,3	2,3	11	21	72%	100%	150	250	20
1609845	VSM14	120,00	Superficial	117	531,43	19	-3	3	-2,34	2,5	12	20	75%	100%	150	250	20
1596996	VH13ISO	101,60	Superficial	63,92	256,31	8	-5	-	-2,35	2,1	6	17	30%	100%	150	250	20
1584962	N7734QA	100,00	Interna	45,9	1,04	13	2	2	-1,19	0,7	20	26	100%	100%	150	250	20
1583410	VM40QA	101,60	Interna	55,16	0,95	12	2	2	-1,15	1	20	25	100%	100%	150	250	20
1581270	N4540AQA	101,60	Interna	72,46	0,41	14	-5	-	-2,45	1,97	7	23	22%	100%	150	250	20
1583410	VM40QA	101,60	Interna	37,37	0,72	15	-3	2	-2,4	1,46	9	24	90%	100%	150	250	20
1581270	N4540AQA	101,60	Interna	76,89	0,81	10	-1	1	-1,9	1,79	10	23	100%	100%	150	250	20
1581270	N4540AQA	101,60	Interna	62,58	0,84	12	-1	1	-2	1,5	10	24	100%	100%	150	250	20
1581270	N4540AQA	101,60	Interna	29,96	0,67	15	-2	1	-1,8	2	9	25	82%	100%	150	250	20
1581270	N4540AQA	101,60	Interna	36,25	1,04	18	-1	1	-1,5	1,23	12	26	100%	100%	150	250	20
1581270	N4540AQA	101,60	Interna	43,92	0,78	15	-1	1	-1,6	1,05	10	28	88%	100%	150	250	20
1595264	V316XLUF	101,60	Interna	41,68	0,81	11	-1	1	-1	1,5	12	25	100%	100%	150	250	20
Total																	500

Ø - Diâmetro (mm)

PS - Percurso sónico (mm)

P - Profundidade (µm para defeitos superficiais) e Tamanho equivalente para defeitos internos (mm)

C - Comprimento (mm)

Rep - Repetitividade (dB's)

SNR - Razão sinal ruído (dB's)

Tabela 4.2 - Identificações das medições das indicações pelo cassete C 160 E USN 60

Ordem de Serviço	Material	Ø	Local da indicação	PS	P	C	Rep. manual		Rep. automatizada		SNR manual	SNR automatizada	Detecção da indicação via manual	Detecção da indicação via automatizada	Velocidade de inspeção manual (mm/s)	Velocidade de inspeção automatizada (mm/s)	Nº de testes
1600580	N 4534 QA	165,10	Superficial	94,14	882,69	25	-4	-3	-2,48	2,3	13	16	100%	100%	150	250	20
1600580	N 4534 QA	165,10	Superficial	120,4	741,15	32	-3	3	-2,3	2,4	12	16	100%	100%	150	250	20
1600580	N 4534 QA	165,10	Superficial	58,97	979,09	41	-3	3	-2,2	2,2	12	16	100%	100%	150	250	20
1600580	N 4534 QA	165,10	Superficial	97,01	559,54	18	-2	2,5	-2,3	2,2	12	16	89%	100%	150	250	20
1603571	V 304	130,00	Superficial	131,4	661,67	55	-2,5	2,5	-2	2,5	12	17	100%	100%	150	250	20
1603571	V 304	130,00	Superficial	93,87	1312,15	80	-3	2,3	-2,5	2,35	13	19	100%	100%	150	250	20
1601695	VH13ISO	145,00	Superficial	88,24	1529,38	77	-3	2	-2,4	2,05	14	16	100%	100%	150	250	20
1601695	VH13ISO	145,00	Superficial	90,99	1232,29	82	-2,5	2	-2,3	2,1	14	15	100%	100%	150	250	20
1601695	VH13ISO	145,00	Superficial	115,1	1508,61	35	-2,8	2	-2,25	2	15	15	100%	100%	150	250	20
1601695	VH13ISO	145,00	Superficial	88,5	1012,1	65	-2,7	3,5	-2,4	1,9	15	16	100%	100%	150	250	20
1600580	N 4534 QA	165,10	Superficial	86,46	207,12	15	-2,5	3	-2,5	2,1	0	16	0%	100%	150	250	20
1600570	N 4540AQA	152,40	Superficial	98,02	836,46	25	-2	1,5	-1,89	1,42	14	17	100%	100%	150	250	20
1603573	V304 VF	152,40	Superficial	97,43	1542,28	19	-2	1,9	-2,1	1,8	14	17	100%	100%	150	250	20
1603573	V304 VF	152,40	Superficial	99,76	1247,91	23	-2	1,9	-2,1	1,9	13	17	100%	100%	150	250	20
1603573	V304 VF	152,40	Superficial	114,9	1167,29	58	-2	3,1	-2	1,5	14	18	100%	100%	150	250	20
1603573	V304 VF	152,40	Interna	53,84	1,03	16	-2	1,5	-1,98	1,5	12	18	100%	100%	150	250	20
1580308	VC 131	127,00	Interna	57,15	1,22	12	-2	2	-1,95	1,23	12	17	100%	100%	150	250	20
1600570	N 4540AQA	152,40	Interna	57,69	0,99	11	-1,5	2	-1,7	1,3	11	16	100%	100%	150	250	20
1593851	VH13ISO	140,00	Interna	36,64	0,68	15	-	-	-1,9	1,8	12	16	70%	100%	150	250	20
1593838	N 4534 QA	127,00	Interna	70,98	0,78	18	-2	2	-1,87	1,95	12	17	80%	100%	150	250	20
1594105	VD 2	139,70	Interna	77,89	0,95	13	-1,8	2	-1,85	1,9	13	17	100%	100%	150	250	20
1594105	VD 2	139,70	Interna	79,37	1,75	15	-1,7	3	-1,71	2,2	11	16	100%	100%	150	250	20
1593838	N 4534 QA	127,00	Interna	100	0,38	10	-	-	-1,87	1,95	0	17	0%	100%	150	250	20
1594105	VD 2	139,70	Interna	61,25	0,7	15	-	-	-1,85	1,9	14	17	67%	100%	150	250	20
1594105	VD 2	139,70	Interna	54,21	0,64	14	-	-	-1,71	2,2	13	16	35%	100%	150	250	20
Total																500	
<p>Ø - Diâmetro (mm) PS - Percurso sônico (mm) P - Profundidade (µm para defeitos superficiais) e Tamanho equivalente para defeitos internos (mm) C - Comprimento (mm) Rep - Repetitividade (dB's) SNR - Razão sinal ruído (dB's)</p>																	

5. RESULTADOS E DICUSSÕES

Os gráficos na sequencia mostram os resultados das detecções das indicações e de uma maneira unificada, apresentamos todos os dados dos resultados das inpeções na tabela 5.1

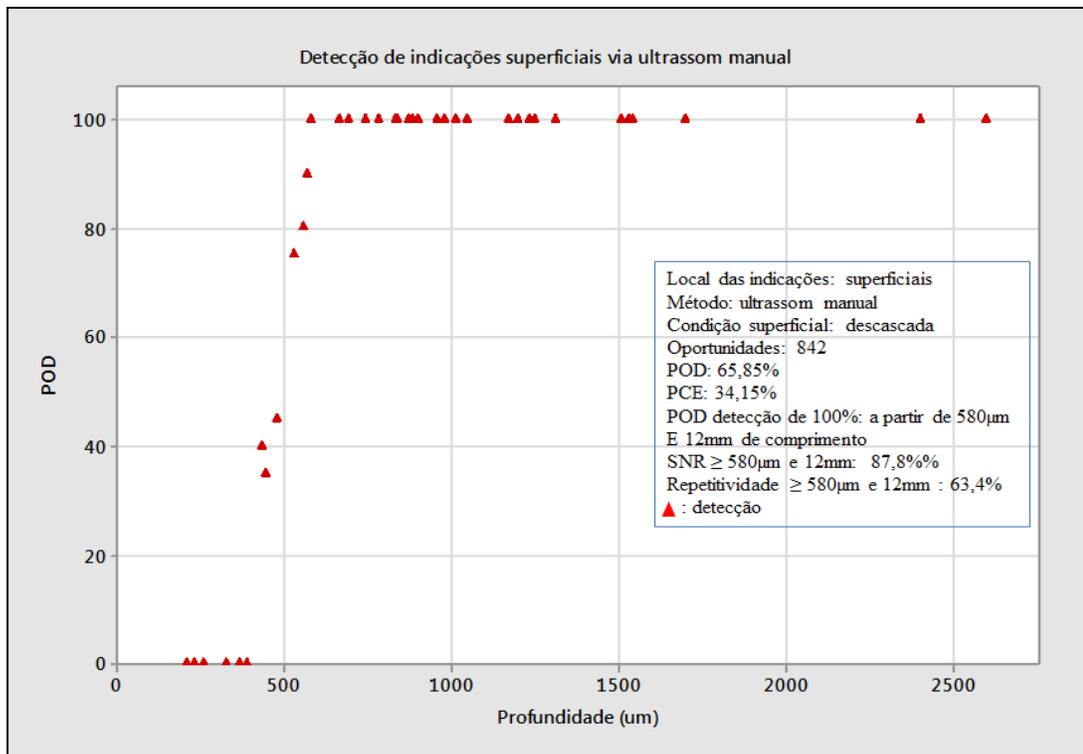


Figura 5.1 - Gráfico POD para indicações superficiais detectadas por ultrassom manual

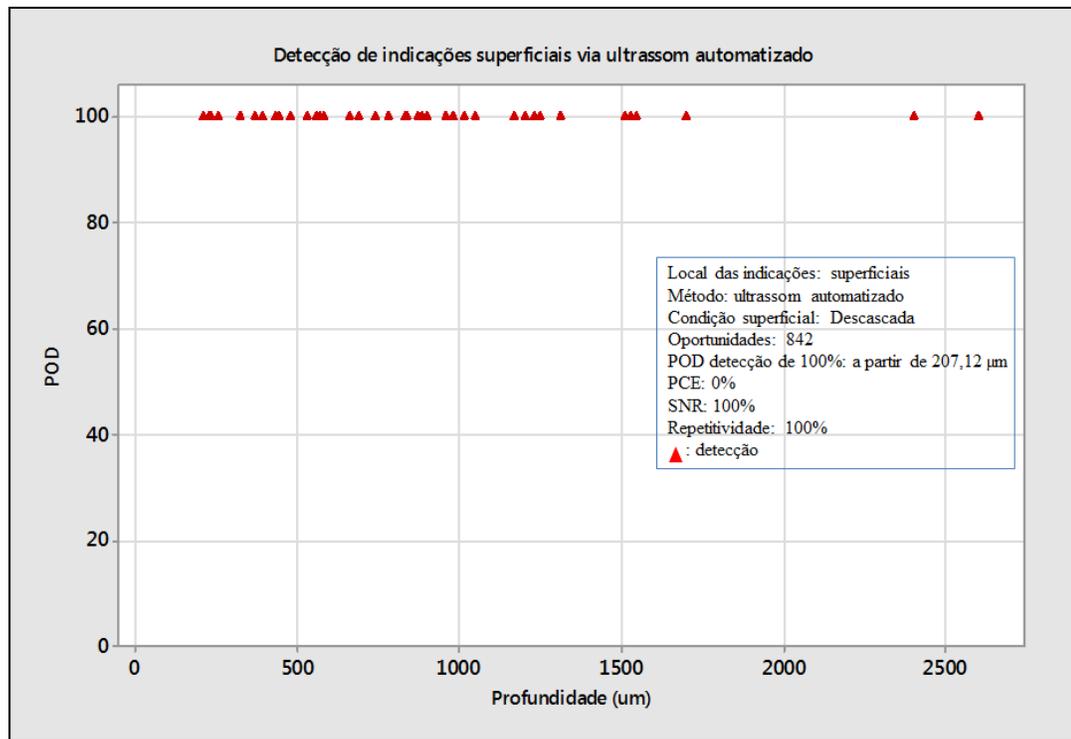


Figura 5.2 - Gráfico POD para indicações superficiais detectadas por ultrassom automatizado

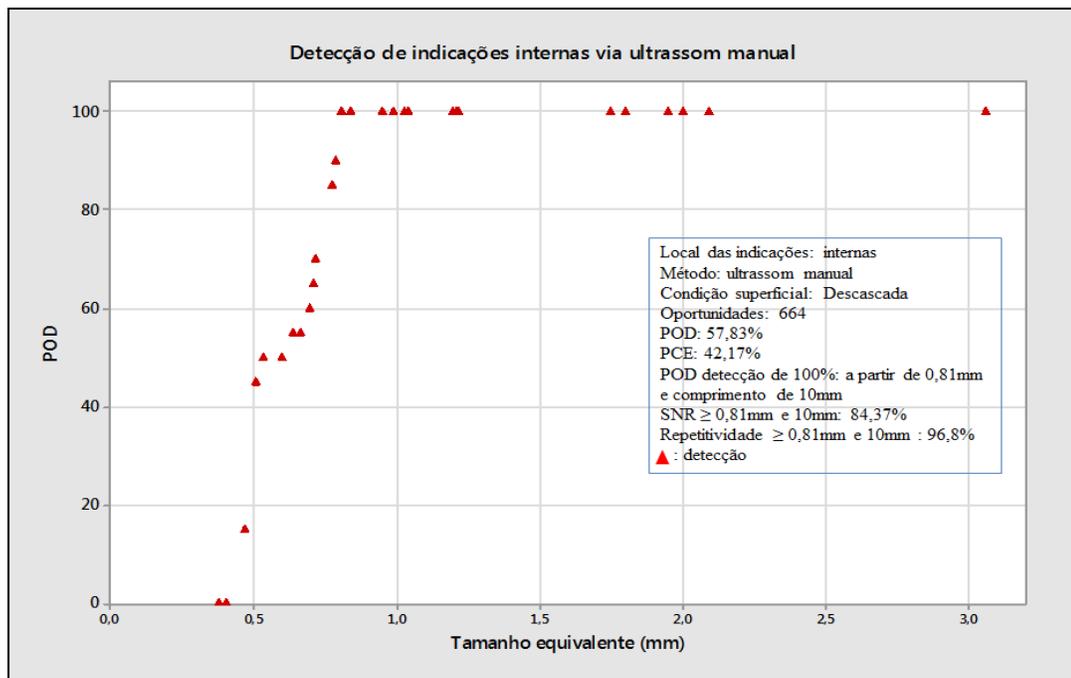


Figura 5.3 - Gráfico POD para indicações internas detectadas por ultrassom manual

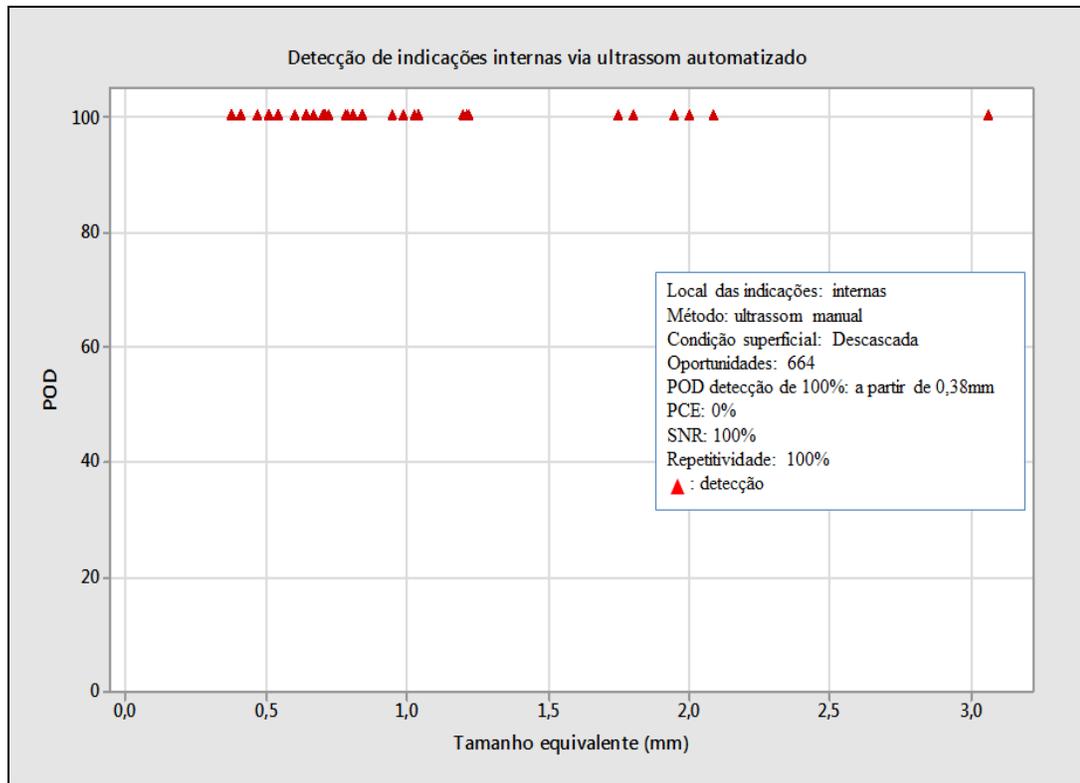


Figura 5.4 - Gráfico POD para indicações internas detectadas por ultrassom automatizado

Tabela 5.1 - Unificação dos resultados obtidos

Local das indicações	Valores alcançados			
	Manual		Automatizado	
Superficial	Oportunidades	842	Oportunidades	842
	POD de todas as indicações	65,85%	POD de todas as indicações	100%
	Mín. Profundidade [POD 100% a partir de]	580 μ m	Mín. Profundidade	207,12 μ m
	Mín. Comprimento [POD 100% a partir de]	12 mm	Mín. Comprimento	8 mm
	SNR [12dB] \geq 580 μ m e 12 mm	87,8%	SNR [12dB]	100%
	Repetitividade [\pm 2,5dB] \geq 580 μ m e 12mm	63,4%	Repetitividade [\pm 2,5dB]	100%
Interna	Oportunidades	664	Oportunidades	664
	POD de todas as indicações	57,83%	POD de todas as indicações	100%
	Mín. TE [POD 100% a partir de]	0,81mm	Mín. TE	0,38 mm
	Mín. Comprimento [POD 100% a partir de]	10 mm	Mín. Comprimento	7 mm
	SNR [12dB] \geq 580 μ m	84,37%	SNR [12dB]	100%
	Repetitividade [\pm 2,5dB] \geq 580 μ m	96,8%	Repetitividade [\pm 2,5dB]	100%

A tabela 5.1 resume todos os resultados detectados, isto é, o equipamento automatizado atinge 100% de eficácia e o manual atinge 65,85% e passa a atingir 100% quando entra em seu limite inferior de detectabilidade. É interessante que em todos os itens de verificação o automatizado PA atinge 100% e um dos fatores que beneficia a produção de inspeção é a redução do tempo da mesma. Vejamos um exemplo comparativo realizado durante o trabalho das diferenças de tempo entre as duas técnicas utilizadas para a inspeção de uma barra de aço com comprimento médio de 5 metros com necessidade de inspeção 360° no diâmetro utilizando dois níveis de sensibilidade.

O tempo de inspeção de uma barra de Ø 180.00milímetros é em média de 58 segundos pelo equipamento PA e de 35 minutos pela técnica manual.

O tempo de inspeção de uma barra de Ø 150.00milímetros é em média de 30 segundos pelo equipamento PA e de 30 minutos pela técnica manual.

O tempo de inspeção de uma barra de Ø 100.00milímetros é em média de 20 segundos pelo equipamento PA e de 25 minutos pela técnica manual.

Isto se deve ao fato de que o equipamento automatizado de PA opera com 12 transdutores com vários níveis de sensibilidade e cobertura de pistas de inspeção radiais e axiais simultaneamente e o manual convencional opera com um transdutor por vez e as coberturas de pistas de inspeção são manuais tanto no sentido radial como axial do material ensaiado.

Como o número de testes práticos realizados atingiu 1506, observou-se que é possível fazer uma relação entre os tamanhos reais das indicações naturais e o tamanho equivalente que estes defeitos reproduzem quando utiliza-se o método DGS ou conhece-se o furo de fundo plano utilizado. Esta relação demonstrada na tabela 5 pode ser utilizada, pois sabe-se que o tamanho equivalente de um defeito determinado pelo método DGS ou pela amplitude que o sinal está mostrado na tela do equipamento de ultrassom só é possível de ser determinado se a eletrônica do equipamento utilizado permitir através de seu software ou se o transdutor utilizado para realizar as inspeções possuir as curvas DGS ou ainda se o padrão de calibração de referência de ensaio utilizado possuir furos de fundo plano conhecidos. Sabendo que no Brasil muitas instituições ou empresas não utilizam equipamentos com softwares completos que possuam as curvas DGS ou não utilizam cabeçotes com curvas DGS, formatou-se a tabela que pode ser utilizada para relacionar os defeitos naturais encontrados em um material com o tamanho equivalente medido em milímetros pelo método DGS. Através da utilização do diagrama DGS de um transdutor de

ultrassom é possível transformá-lo em tamanho natural sem que o defeito tenha que ser caracterizado ou destruído em laboratório. O que pode-se considerar com esta relação é que a linguagem de ultrassom em termos técnicos seja compreendida para tomada de decisões por pessoas que não sejam especialistas em ensaios não destrutivos. É fundamental frisar que o material utilizado para este trabalho foi o aço na condição superficial descascada e que a posição que a indicação reflete na tela do equipamento de ultrassom é seu comprimento em relação à sua máxima amplitude. Adicionalmente, é importante comentar que o laboratório metalográfico realiza a medição da indicação através do topo da mesma e que as indicações encontradas no interior dos materiais foram caracterizadas por inclusões não metálicas e as indicações encontradas na superfície dos materiais são caracterizados por dobras ou resto de dobras de laminação. Através da tabela 5.2 pode-se concluir que no aço, existe uma relação entre tamanho natural de uma indicação e seu tamanho equivalente levando-se em consideração o comprimento, a orientação e conseqüentemente a refletividade das indicações em termos de sinal de ultrassom.

Tabela 5.2 - Defeitos naturais internos X DGS

Medições			
Nº	Tamanho do defeito natural localizado internamente no material [μm]	Comprimento da indicação [mm]	Tamanho equivalente correspondente método pelo método DGS [mm]
1	68,14	8	0,38
2	101,14	15	0,47
3	104,27	9	0,41
4	117,61	10	0,51
5	128,37	14	0,54
6	152,89	18	0,68
7	170,9	15	0,67
8	186,3	17	0,71
9	205,68	12	0,64
10	209,51	11	0,7
11	239,75	18	0,78
12	243,86	15	0,78
13	251,97	15	0,79
14	255,5	18	0,72
15	259,06	16	0,84
16	262,29	15	0,81

17	264,82	17	0,81
18	270,11	12	0,95
19	280	15	0,95
20	291,03	15	1,04
21	292	15	1,03
22	292,18	20	1,04
23	302	12	1,2
24	309	15	1,22
25	371,61	15	1,75
26	389	18	0,99
27	416,17	19	1,82
28	446,76	18	1,96
29	499,18	20	2
30	499,46	15	1,21
31	520,88	21	2,09
32	1335,89	19	3,06

6. CONCLUSÃO

Através dos testes e resultados, conclui-se que a inspeção manual convencional que opera sob a técnica pulso eco convencional manual tem eficácia menor que a inspeção automatizada *phased array*. Devido a vários fatores que contribuíram e que foram expostos neste trabalho, o equipamento que opera pela técnica de imersão *phased array* automatizado atingiu a detecção de 100% das indicações naturais tanto localizadas internamente como na superfície dos materiais.

Antes do início das comparações entre as duas técnicas, havia uma grande expectativa sobre a superioridade de detecção do equipamento automatizado em relação ao convencional. Porém, as expectativas foram superadas pois o trabalho além de comparar as duas técnicas, determinou a capacidade de detecção de cada uma, ou seja, qual é a mínima indicação detectável por cada técnica, logicamente considerando os fatores humanos. Em relação a um dos principais objetivos da inspeção por END, ou seja, a prevenção de acidentes, a utilização do equipamento automatizado atende plenamente a este requisito fundamental. Adicionalmente, a inspeção por PA trabalha com velocidade maior, reduzindo pela metade o tempo de inspeção.

Além disso, é possível através da inspeção por ultrassom automatizada atender normas e especificações mais apertadas que não são possíveis de atender utilizando a técnica convencional manual. Esta conclusão contribui com informações para análises de viabilidades de atendimento de normas que não eram possíveis de serem atendidas devido à não capacidade de inspeção. Além disso, outras possíveis especificações poderão ser atendidas.

Outra conclusão em relação à detecção de indicações superficiais é através do nível de mínima indicação encontrado, o ensaio por ultrassom som *phased array* automatizado pode substituir, em certos casos e especificações o ensaio automatizado por correntes parasitas ou o ensaio visual do inspetor realizado em bancada, o que diminui consideravelmente o tempo de inspeção e elimina riscos de erros de detecção. O fator que contribui para esta conclusão é a confiabilidade do PA.

E finalmente por sabermos da complexidade do universo de inspeção por ultrassom desde sua realização até aplicação é que a automatização se faz cada vez mais necessária, não nos esquecendo que ela é apenas parte de um sistema que envolve treinamentos sólidos, procedimentos robustos, auditorias constantes, reciclagem frequente de pessoal que o realiza e

estudos de capacidade empregando técnicas estatísticas. E esse sistema de inspeção automatizada de ultrassom funcionando adequadamente pode levar a índices de confiabilidade altos, como o alcançado neste trabalho e conseqüentemente pode ser possível realizar inspeções corretas na primeira vez, pois é possível não haver tempo para retrabalho.

Como sugestão para trabalhos futuros, aprofundar os testes no equipamento automatizado de *phased array* para atingir níveis de capacidade de inspeções nos materiais superficialmente sem a necessidade de inspeção visual de bancada. Em relação às inspeções em materiais para a detecção de indicações localizadas internamente, aumentar a produção de inspeção variando a velocidade de inspeção obtendo o mesmo valor de mínimo defeito detectável. E, sabendo-se das variáveis que ainda são possíveis de serem exploradas, visamos otimizá-las para melhorar ainda mais os níveis de detecção de indicações.

Utilizar da mesma metodologia de estudo de capacidade de detecção de indicações no novo equipamento de inspeção *phased array* automatizado que foi adquirido no mês de Abril de 2014 e instalado em Fevereiro de 2015.

Comparar quais são as mínimas indicações detectáveis do ultrassom *phased array* com o método não destrutivo de correntes parasitas através de separação de indicações naturais e elaboração de gráficos POD.

Referências

ALVES A. **Revista da Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos e Inspeção** , A Retomada do setor nuclear depende de mais segurança, e. 64, p. 33-41, 2015.

ALVES A., **Revista da Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos e Inspeção** O crescimento da indústria da Defesa, ed. 62, p. 30-35, 2014.

AMINFAR, E.; MOHAMILÍMETROSADZADEH, S; FARAHPOUR, H. **Materials Evaluation**, Ultrasonic *Phased array* technique in Rail for crack-line discontinuity detection, v. 73 n.3, p. 361-366, 2015.

AMS - AEROSPACE MATERIALS SPECIFICATION- **AMS STD 2154** - Inspection, ultrasonic, wrought metals, process for, 2012.

ANDREUCCI, R. **Ensaio por ultrassom**, aplicação industrial, p. 4-11, 27-34, 2014.

ANNIS, C.; ALDRIN, J; SABBAGH H, Nondestructive testing capability. **Materials Evaluation**, Statistics & Probability of Detection, v. 73 n.1, p.39-61, 2015.

ASNT - AMERICAN SOCIETY FOR NONDESTRUCTIVE TESTING - **Recommended practice n° SNT-TC-1A** - Personnel qualification and certification in non destructive Testing, 2011.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM A 388** - Standard practice for ultrasonic examination of steel forgings, 2015.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E 2375** - Standard Practice for Ultrasonic Testing of Wrought Products, 2008.

BERTOVIĆ, M.; FAHLBRUCH, B.; MÜLLER, C.; PITKÄNEN J.; RONNETEG, U. **5th European-American Workshop on Reliability of NDE**, Holistic Risk Assessment and Risk Prevention Approach to the Mechanized NDT and the Inspection Procedure, Berlin, Germany, 2013.

BOLTEN J., **Basics Phased array**, GE inspection technologies, 2014.

CARVALHO A.; REBELLO J.; SILVA R.; SAGRILO L., **Insigth**, Reliability of the manual and automatic ultrasonic technique in the detection of pipe weld defects, v. 48 n.11, 2006.

CONKLIN, B. **Ultrasonic testing lecture guide**, 2009.

DAVIS M., **General procedure for ultrasonic examination using phased array**, 2006.

DEUSTECH W.; MAXAM K.; RAZENG. M.; ROYE W.; NEAU G.; **Materials Evaluation**, *Phased array* ultrasonic testing of longitudinally submerged arc-welded pipes in the pipe mill, v. 73, n.7 p. 937-943, 2015.

EN - EUROPEAN STANDARD - **EN 10308** - Non-destructive testing - Ultrasonic inspection of steel bars, 2002.

EUFRÁSIO E.; BREIDENBACH C.; FALTER S.; PRAUSE R.; WURSHIG T.; BRUSCHI P.; MICHEL R.; **Revista da Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos e Inspeção Ultrassom phased array** paintbrush $\pm 45^\circ$ ed. 67, p. 38-41, 2015.

FRAGA, R. S. **Avaliação da profundidade de penetração de ondas longitudinais criticamente refratadas**. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.

GE inspection technologies, **Manual técnico do equipamento de ultrassom USN 60**, 2013.

GOLIS, M. - ASNT - AMERICAN SOCIETY FOR NONDESTRUCTIVE TESTING – **Level III study guide ultrasonic method**, 2013.

HALLIDAY D., RESNICK R., WALTER J., Fundamentos da Física, 9º edição, 2012.

HELLIER – **Ultrasonic phased array level I and II** , 2013.

HELLIER C., Handbook of Nondestructive evaluation, cap. 2, p.2.1-2.18, cap 7, p. 7.1-7.115, 2001.

COLPAERT C., **Metalografia dos produtos siderúrgicos comunm**, 4º ed. P. 165- 167, 345-352, 361-375, 2008.

KRAUTKRAMER, Gmbh & Co.- **Data Sheets fiches techniques** – Hurth, 2001.

MARKS, P. **Ultrasonic testing lecture guide**, p. 17-45, 101-109, 2009.

MEHTA B, **Materials Evaluation**, Surface and subsurface crack analysis in steel using magnetic particle and liquid pentetrant testing, v. 73 n.4, p.465-470, 2015.

MEI P.; SILVA A., - **Aços e Ligas especiais** – ed.2, p. 56-57, 275, 352-356, 538, 544, 575-579, 2006.

MIRANDA, J., **Apostila - Conceitos básicos do ensaio por ultrassom**, p. 4-8, 2010

MOORE H., ASNT Continuing education in nondestructive testing, **Materials and processes for NDT technology**, 2007.

NAS - NATIONAL AEROSPACE STANDARD - **NAS 410** – Certification & Qualification of Nondestructive Test Personnel, 2008.

NATIONAL Comission on the BP Deepwater Horizon Oil Spill and Offshore Drilling, **The Gulf Oil Disaster and the Future of Offshore Drilling**, 2011.

NOVAIS P., **Avaliação das principais descontinuidades encontradas nas juntas soldadas, causas e possíveis soluções**, contribuição técnica n°9, Congresso latino Americano da construção metálica, 2010.

OLYMPUS NDT - **Ultrasonic bar inspection system for round bars: 50 to 254 milímetros** - Reference manual,- Revision A, 2012.

OLYMPUS NDT, **Ultrasonic bar inspection system for round bars: 50milímetros to 254milímetros reference manual**, p.35, Rev. A, 2012.

PARRISH, F. **Ultrasonics for Nondestructive Testing, ASNT [AMERICAN SOCIETY FOR NON DESTRUCTIVE TESTING] Conference**, Advanced UT personnel development solutions, Warwick, United States, 2015.

RAIS, A. Basic Human Factors and Nondestructive testing. **The NDT technician - ASNT** [American Society for Non Destructive Testing], v.14, n.1, P. 1-4.,2015.

RHÉAUME, R. **Ultrasonics for Nondestructive Testing, ASNT [AMERICAN SOCIETY FOR NON DESTRUCTIVE TESTING] Conference**, Challenges and solution PAUT on line training, Warwick, United States, 2015.

RICHTER, M., SANTOS, J **Uso das Técnicas de END: Ultrassom [TOFD e *Phased array*], Radiografia, Partículas Magnéticas e ACFM na Avaliação de Juntas Soldadas com Trincas de Fadiga**, IV Conferencia Pan-americana de END, Buenos Aires, 2007.

RODOVALHO, T. G. F. **Medição da velocidade da onda ultrassônica longitudinal em compósitos de fibra de carbono/epóxi**. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2012.

RUMMEL, W. **Materials Evaluation**, Challenges to Nondestructive testing reliability, v. 73, n.1, p. 39-42, 2015.

SANTIN, J., **Ultrassom**, Técnica e aplicação, pg 5-7, 93, 2003.

SHARMA, G.; KUMAR, A.; RAO, B.; JAYAKUMAR T., **Materials Evaluation**, Continuous wavelet transform analysis for the enhancement of signal-to-noise ratio in coarse grain austenitic stainless steel, v. 72, n.12 p. 1519-1529, 2014.

UDPA,S.**Nondestructive testing handbook, 3rd edition, Electromagnetic testing**, 2004.

INDÚSTRIA SIDERÚRGICA - **Procedimento interno n° F 99.215** - Ensaio por ultrassom *phased array* em barras forjadas e laminadas. Revisão 2, 2014.

WARREN, D. **National transportation safety board**, Aircraft accident report, United Airlines flighth 232, McDonell Douglas DC-1040, 1990.

WORKMAN,G.; KISHONI D. **Ultrasonic testing handbook**; volume 7, p. 16-17,24-40, 60-85, 144-162, 178-190,530-534 2007.

WORKMAN,G.**Nondestructive testing handbook 3rd edition**, 2012.

Sites Utilizados

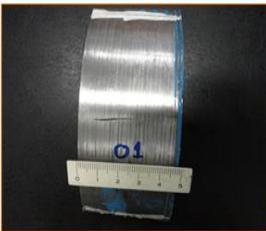
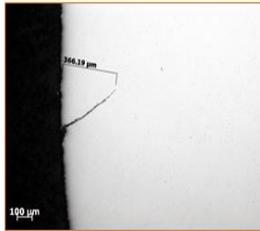
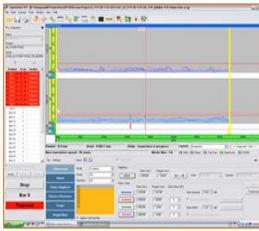
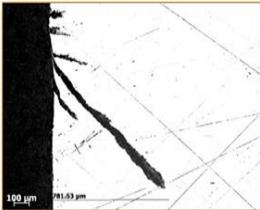
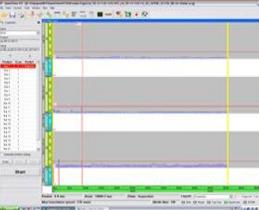
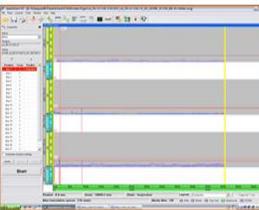
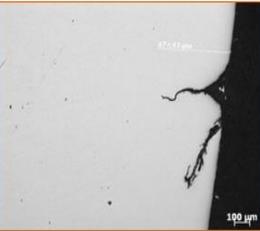
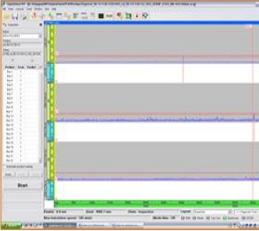
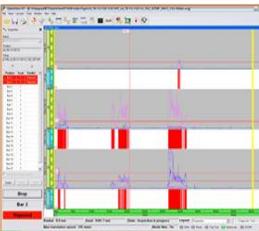
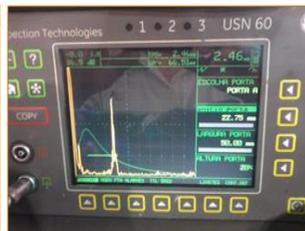
www.abendi.org.br

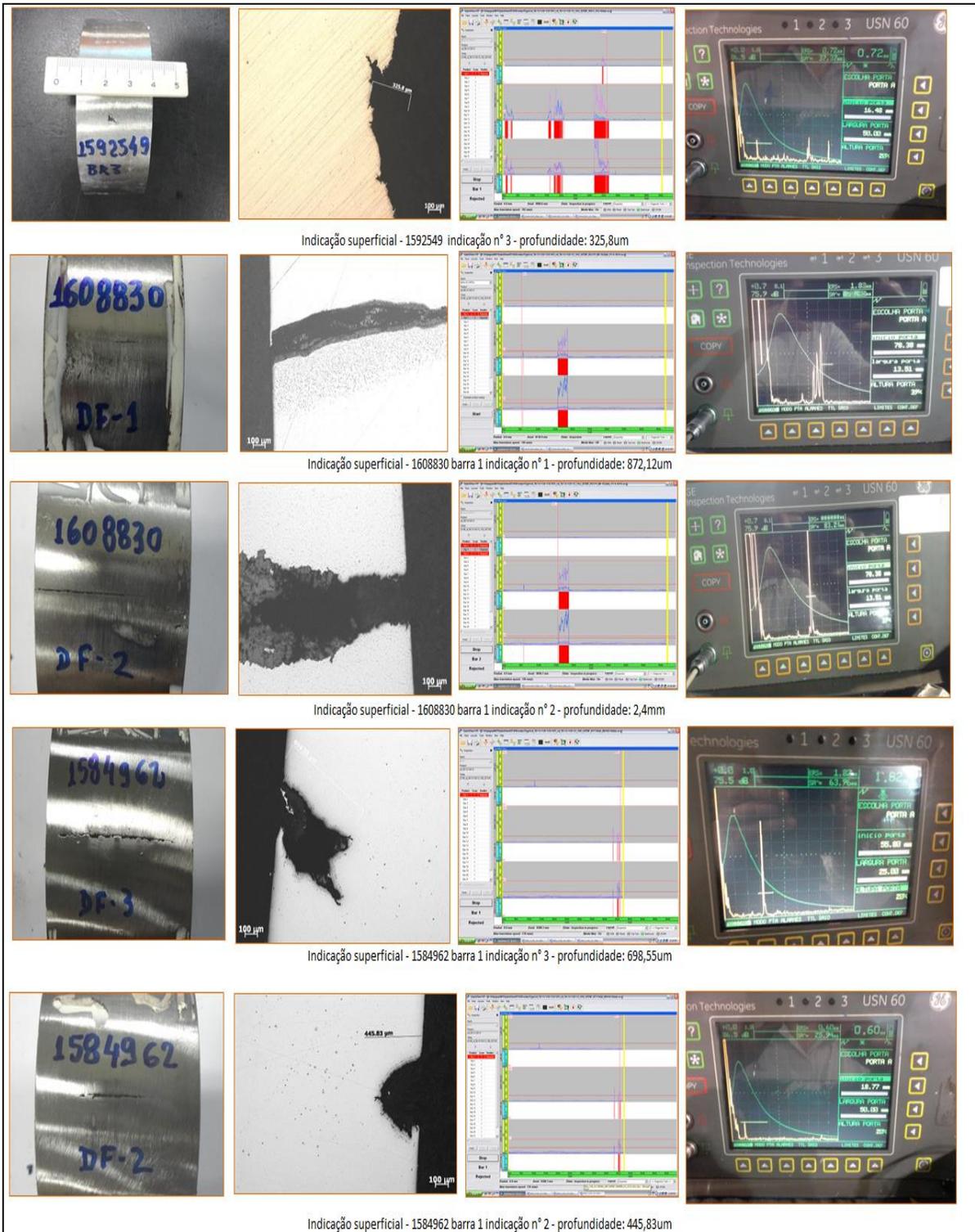
<https://www.nde-ed.org>

<http://www.ndt.net>

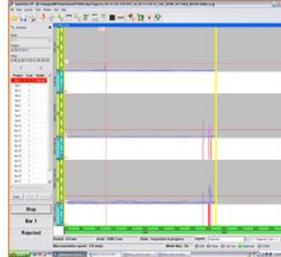
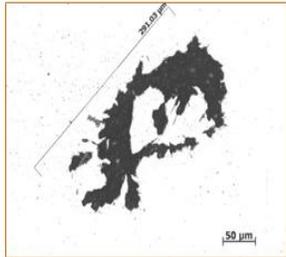
<http://www.aulas-fisica-quimica.com>

ANEXO A – FOTOS, METALOGRAFIA, AMPLITUDE DE SINAIS NAS TELAS DO ULTRASSOM AUTOMATIZADO E MANUAL PARA INDICAÇÕES SUPERFICIAIS NO CASSETE C 105

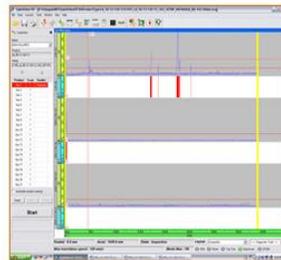
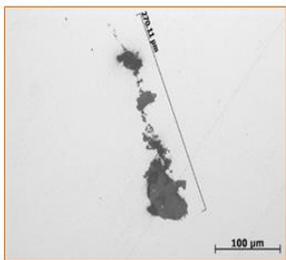
			
Indicação superficial - 1645985 barra 1 indicação n° 1 - profundidade: 366,19um			
			
Indicação superficial - 1592459 barra 1 indicação n° 1 - profundidade: 781,53um			
			
Indicação superficial - 1592459 barra 1 indicação n° 2 - profundidade: 569,45um			
			
Indicação superficial - 1595264 barra 1 indicação n° 1 - profundidade: 477,43um			
			
Indicação superficial - 1596996 barra 1 indicação n° 1 - profundidade: 1,7mm			



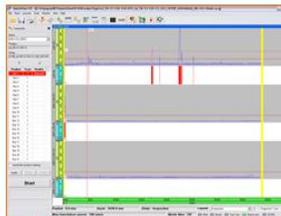
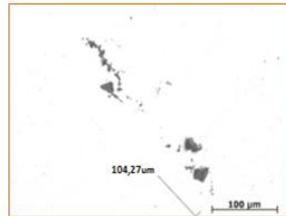
ANEXO B – FOTOS, METALOGRAFIA, AMPLITUDE DE SINAIS NAS TELAS DO ULTRASSOM AUTOMATIZADO E MANUAL PARA INDICAÇÕES INTERNAS NO CASSETE C 105



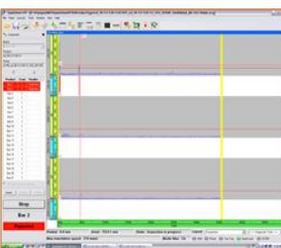
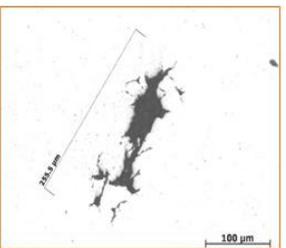
Indicação interna - 1584962 barra 1 indicação n° 7 - 1,04 mm tamanho equivalente



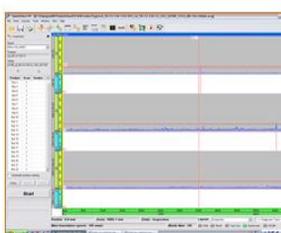
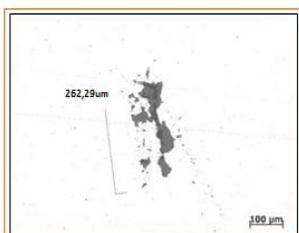
Indicação interna - 1581270 barra 1 indicação n° 3 - 0,95 mm tamanho equivalente



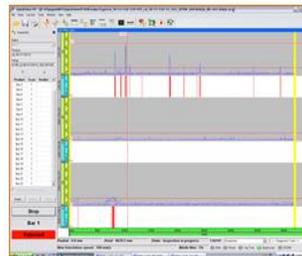
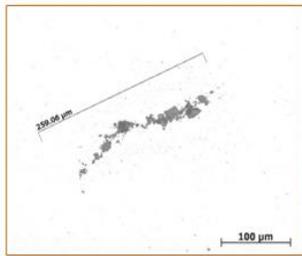
Indicação interna - 1581270 barra 1 indicação n° 1 - 0,41 mm tamanho equivalente



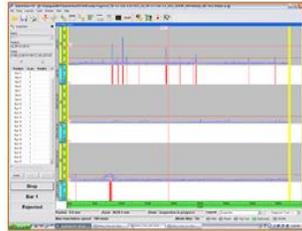
Indicação interna - 1583410 barra 1 indicação n° 1 - 0,72 mm tamanho equivalente



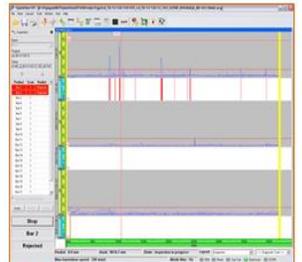
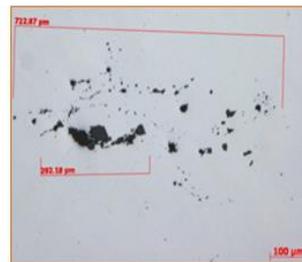
Indicação interna - 1595264 barra 1 indicação n° 1 - 0,81 mm tamanho equivalente



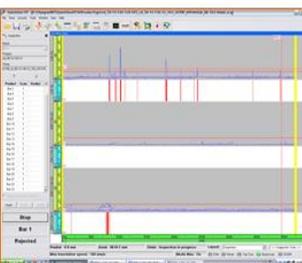
Indicação interna - 1581270 barra 1 indicação n° 2 - 0,84 mm tamanho equivalente



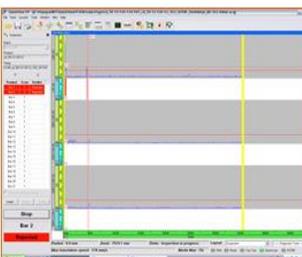
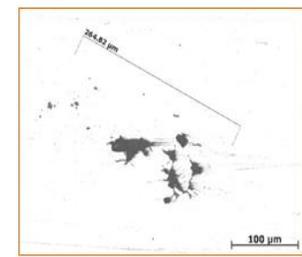
Indicação interna - 1581270 barra 2 indicação n° 2 - 0,67 mm tamanho equivalente



Indicação interna - 1581270 barra 2 indicação n° 1 - 1,04 mm tamanho equivalente

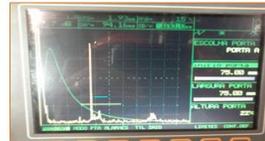
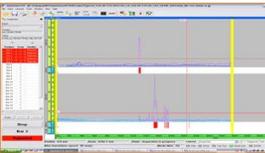
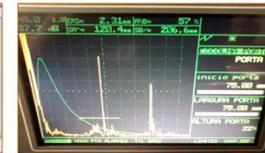
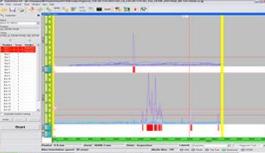
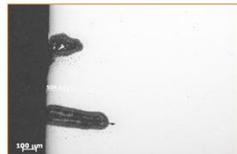
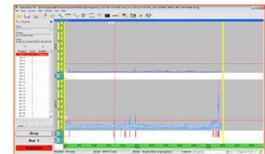
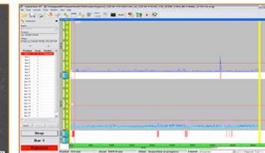
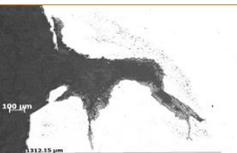
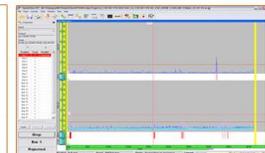
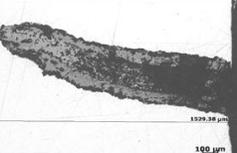
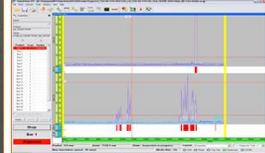


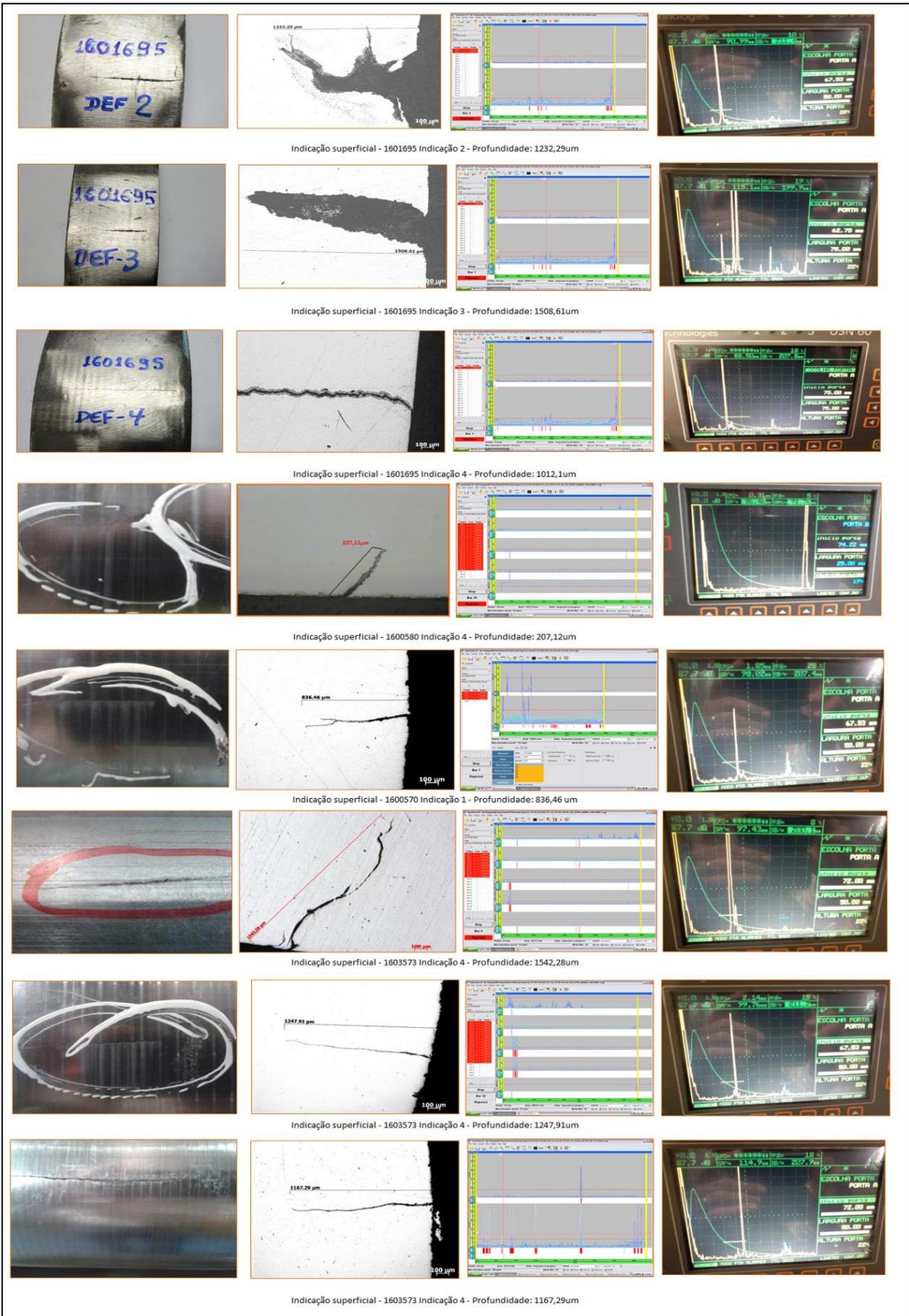
Indicação interna - 1581270 barra 2 indicação n° 3 - 0,78 mm tamanho equivalente



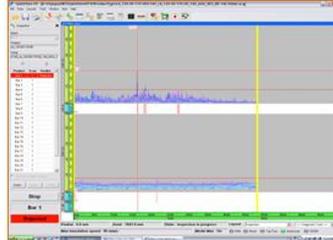
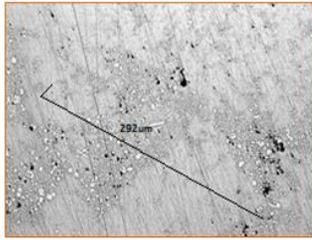
Indicação interna - 1583410 barra 1 indicação n° 2 - 0,81 mm tamanho equivalente

ANEXO C – FOTOS, METALOGRAFIA, AMPLITUDE DE SINAIS NAS TELAS DO ULTRASSOM AUTOMATIZADO E MANUAL PARA INDICAÇÕES SUPERFICIAIS NO CASSETE C 160.

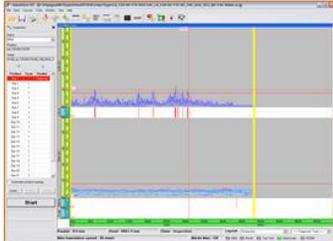
			
Indicação superficial - 1600580 Indicação 1 - Profundidade: 882,69um			
			
Indicação superficial - 1600580 Indicação 1 - Profundidade: 741,15um			
			
Indicação superficial - 1600580 Indicação 1 - Profundidade: 979,09um			
			
Indicação superficial - 1600580 Indicação 1 - Profundidade: 559,54um			
			
Indicação superficial - 1603571 Indicação 2 - Profundidade: 661,67um			
			
Indicação superficial - 1603571 Indicação 1 - Profundidade: 1312,15um			
			
Indicação superficial - 1601695 Indicação 1 - Profundidade: 1529,38um			



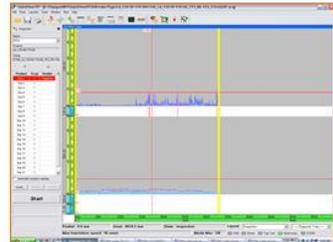
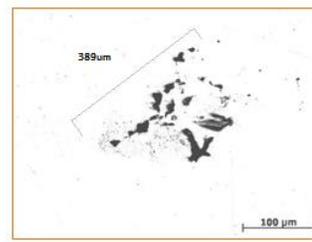
ANEXO D – FOTOS, METALOGRAFIA, AMPLITUDE DE SINAIS NAS TELAS DO ULTRASSOM AUTOMATIZADO E MANUAL PARA INDICAÇÕES INTERNAS NO CASSETE C 160



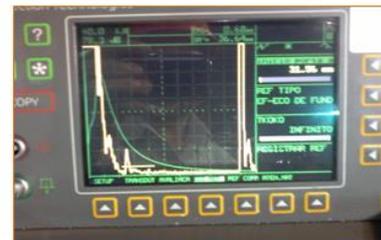
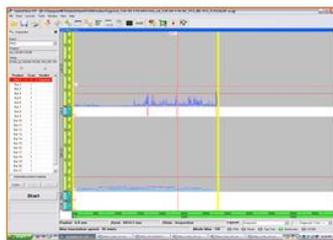
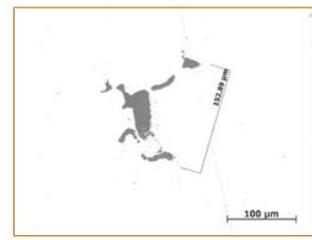
Indicação interna 1594105 n°1 - 1,03mm de tamanho equivalente



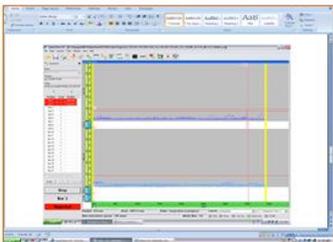
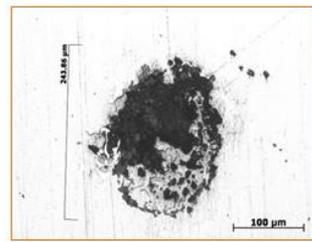
Indicação interna 1594105 n°2 - 1,22mm de tamanho equivalente



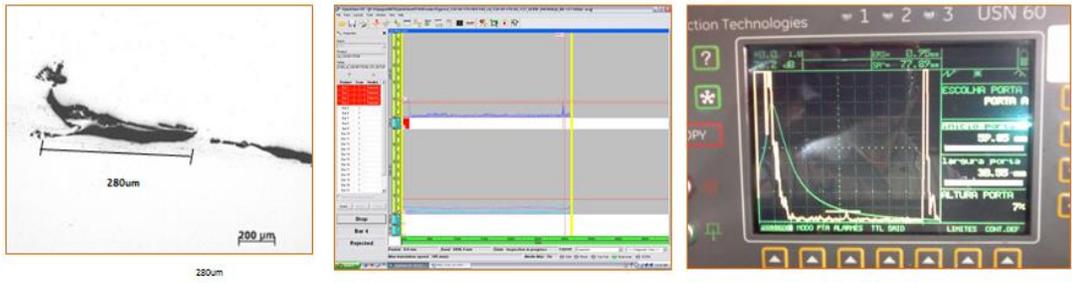
Indicação interna 1603573 n°1 - 0,99 mm de tamanho equivalente



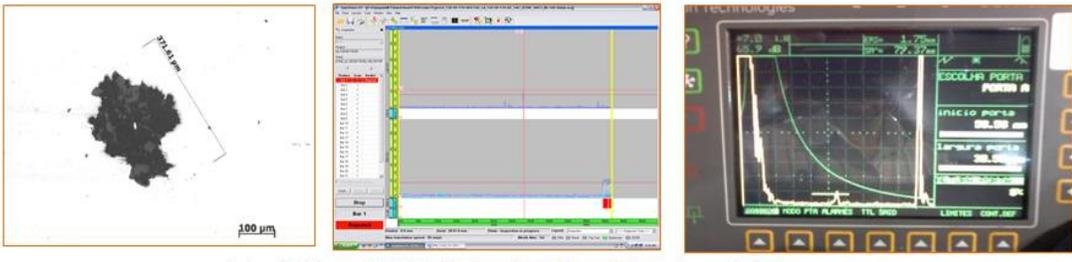
Indicação interna 1603573 n°2 - 0,6 mm de tamanho equivalente



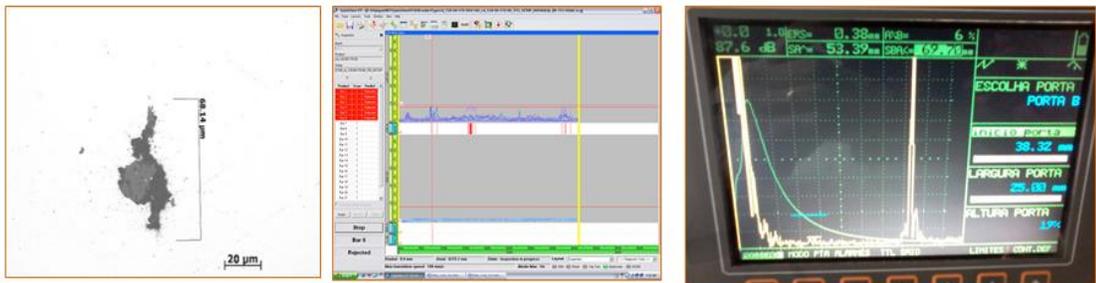
Indicação interna 1580308 indicação n°1 - 0,78mm de tamanho equivalente



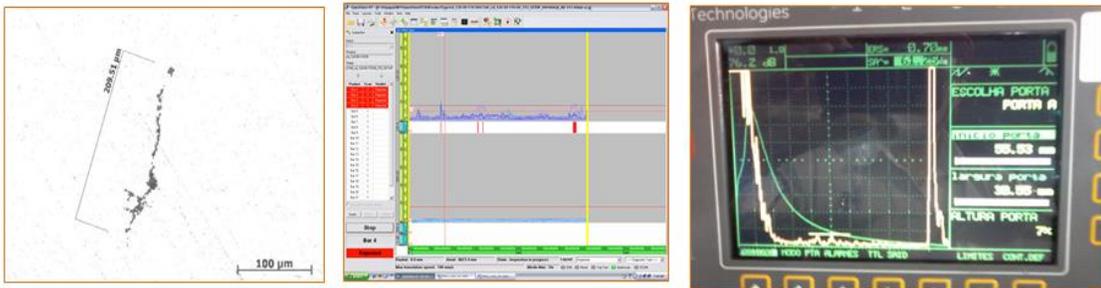
Indicação interna 1593838 indication n°1 - 0,95mm de tamanho equivalente



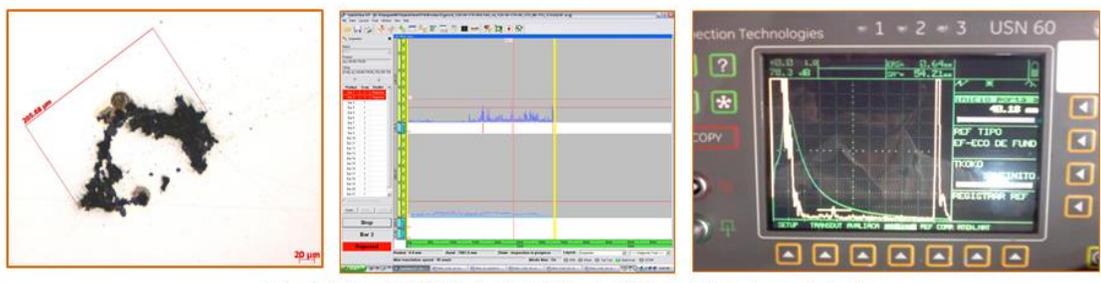
Indicação interna 1593851 indication n°1 - 1,75mm de tamanho equivalente



Indicação interna 1600570 indication n°1 bar 1 - 0,38mm de tamanho equivalente

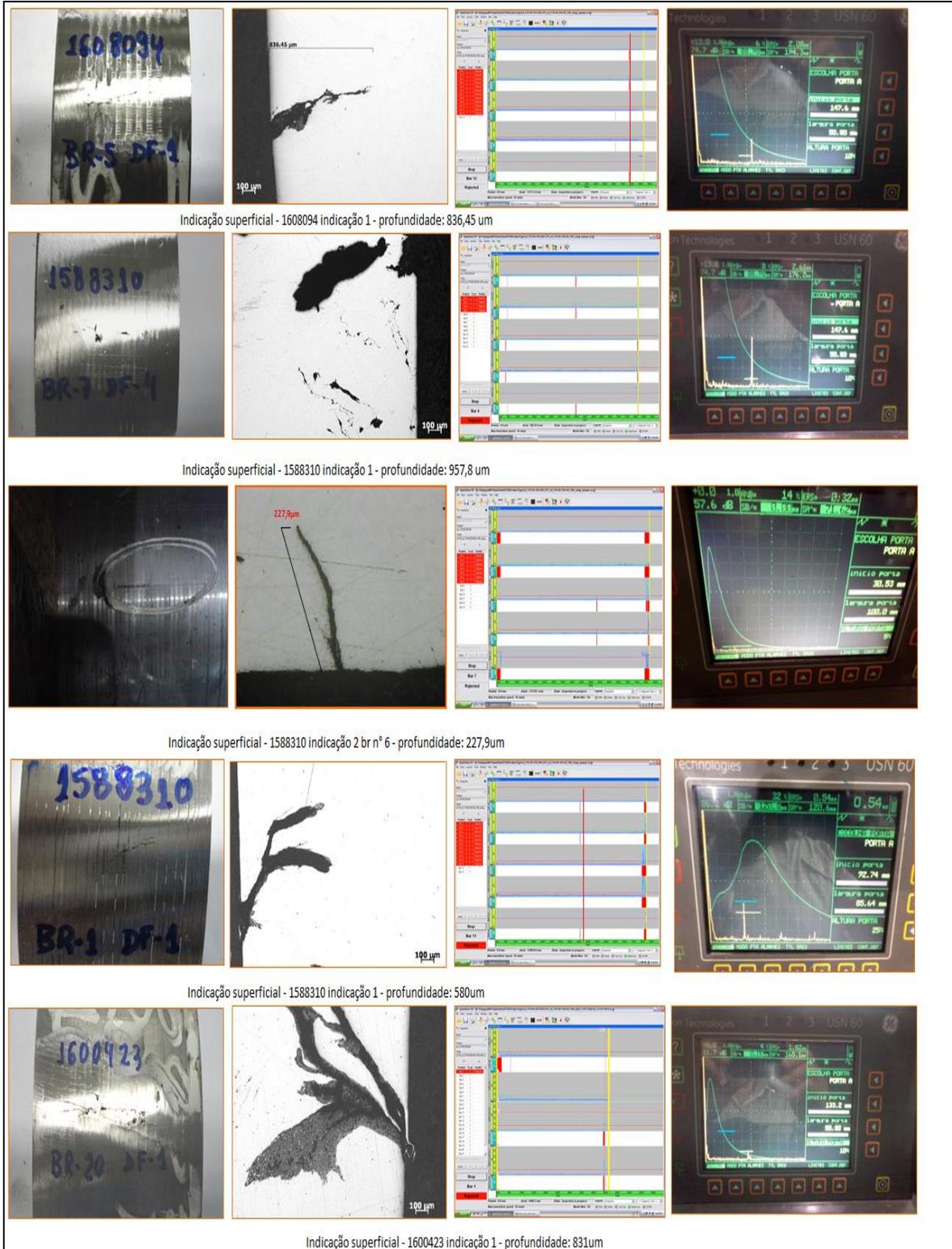


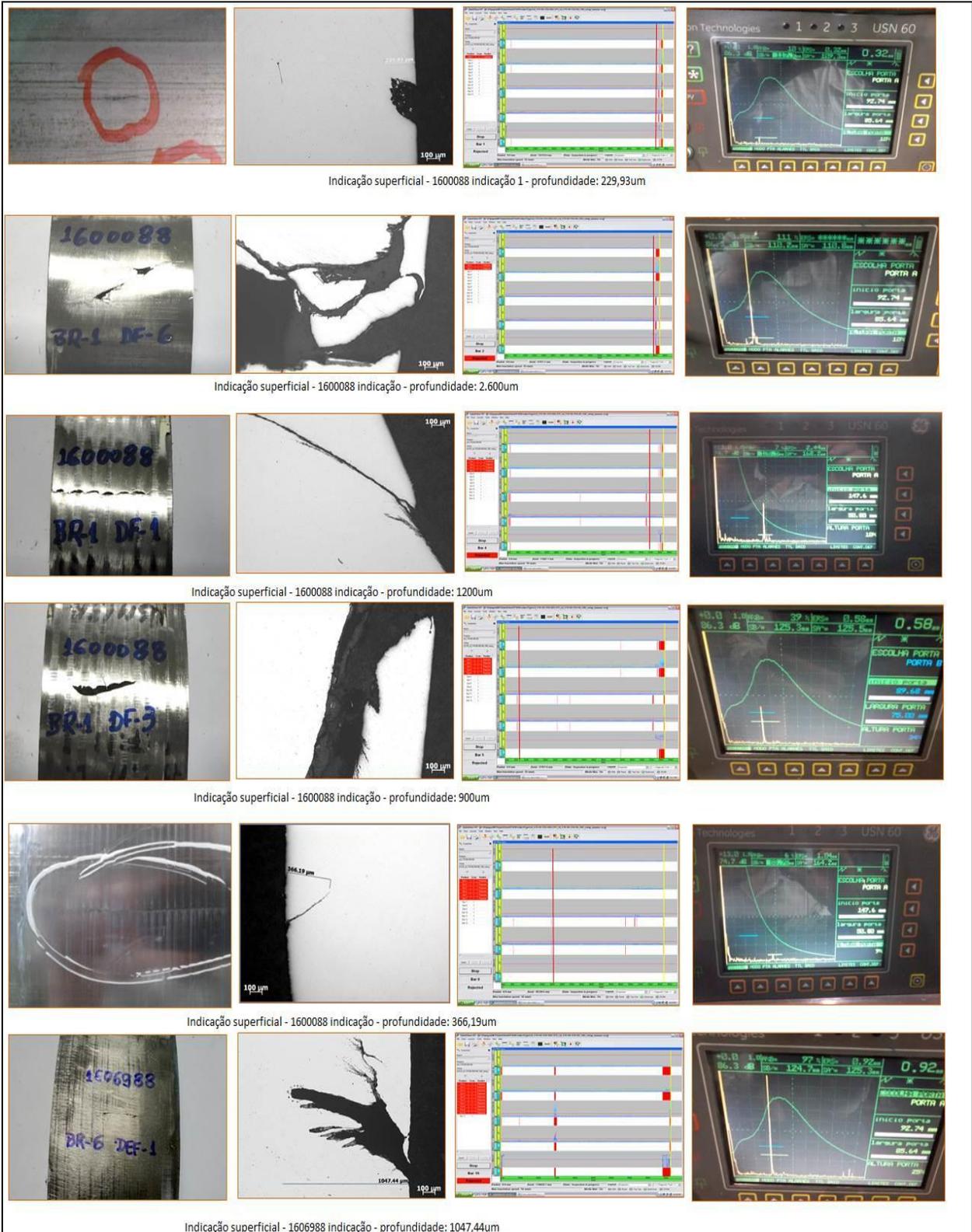
Indicação interna 1600570 indication n°2 bar 1 - 0,7mm de tamanho equivalente



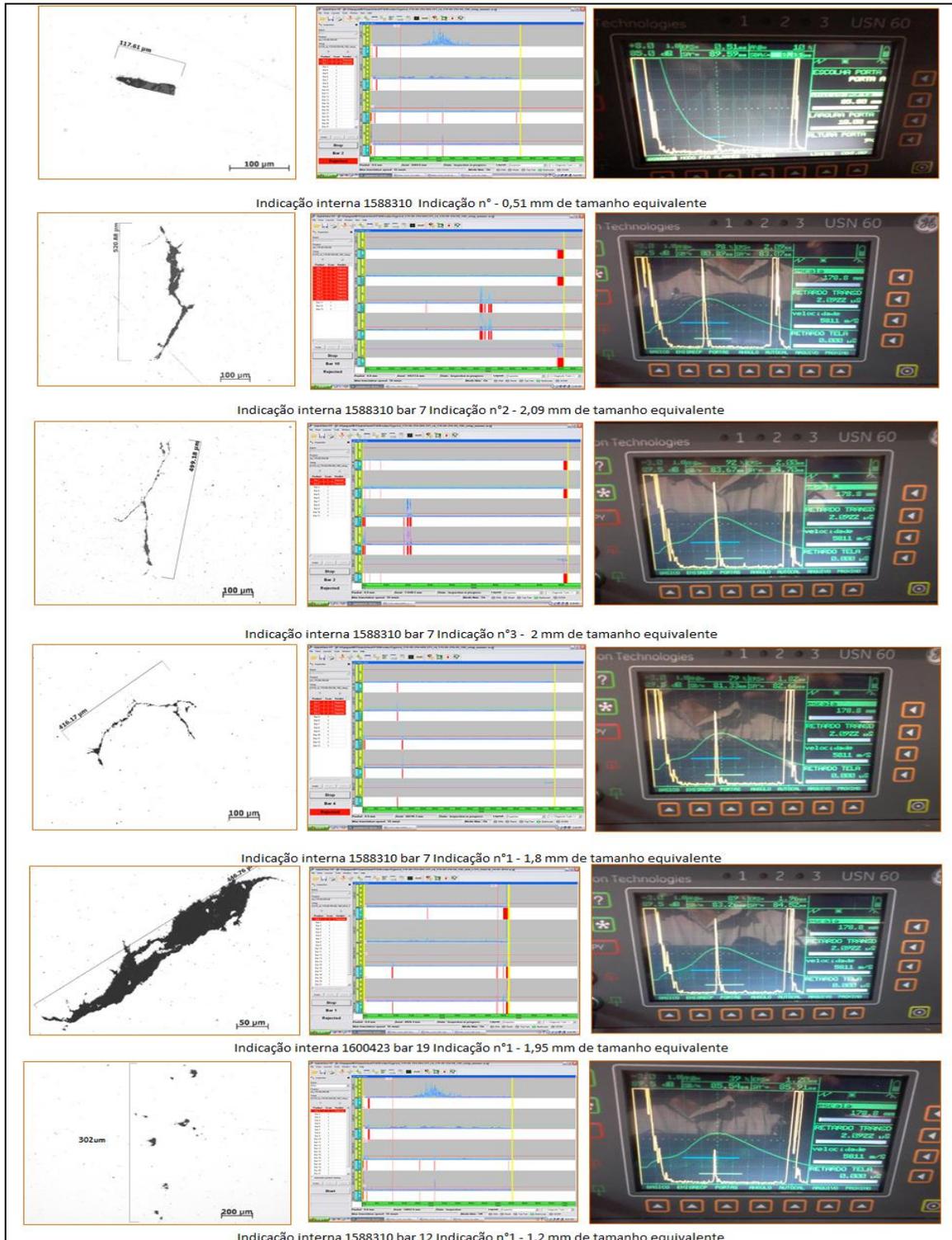
Indicação interna 1603573 indication n°3 bar 1 - 0,64 mm de tamanho equivalente

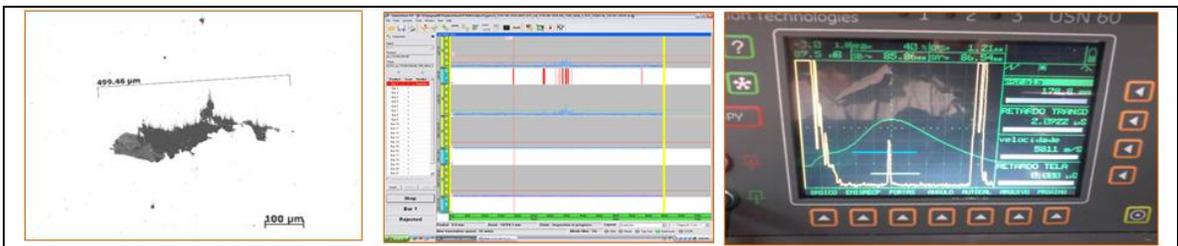
ANEXO E – FOTOS, METALOGRAFIA, AMPLITUDE DE SINAIS NAS TELAS DO ULTRASSOM AUTOMATIZADO E MANUAL PARA INDICAÇÕES SUPERFICIAIS NO CASSETE C 215



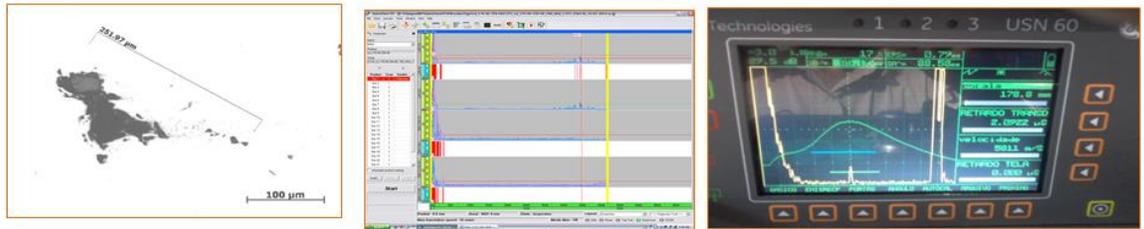


ANEXO F – FOTOS, METALOGRAFIA, AMPLITUDE DE SINAIS NAS TELAS DO ULTRASSOM AUTOMATIZADO E MANUAL PARA INDICAÇÕES INTERNAS NO CASSETE C 215

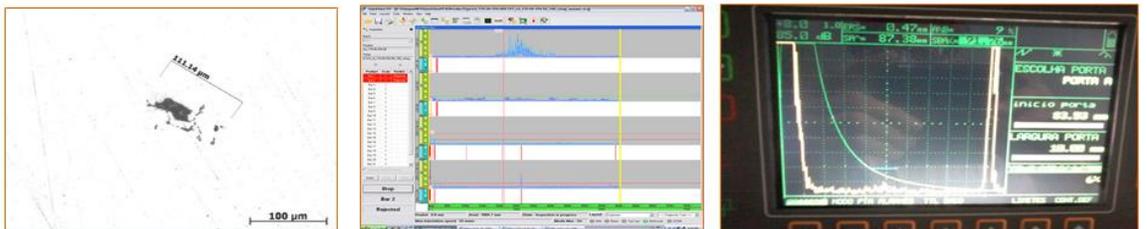




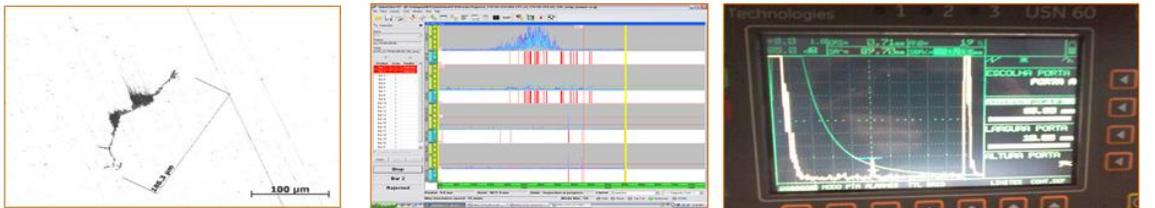
Indicação interna 1594004 bar 13 Indicação n°1 - 1,21 mm de tamanho equivalente



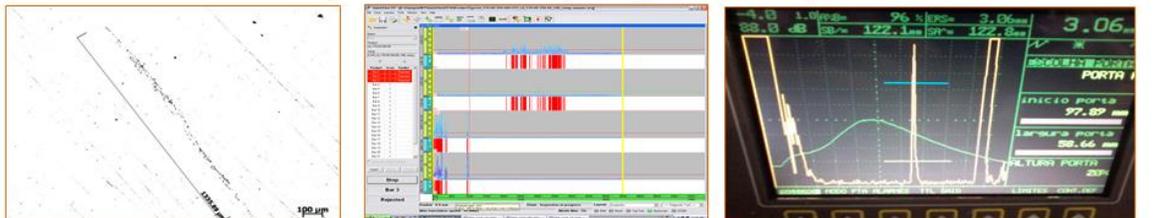
Indicação interna 1600423 bar 17 Indicação n°1 - 0,79 mm de tamanho equivalente



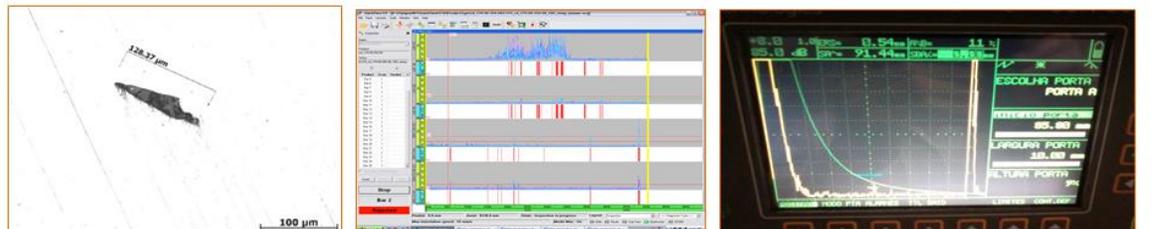
Indicação interna 1588310 bar 12 Indicação n°2 - 0,47 mm de tamanho equivalente



Indicação interna 1588310 bar 6 Indicação n°1 - 0,71 mm de tamanho equivalente



Indicação interna 1588310 bar 6 Indicação n°2 - 3,06 mm de tamanho equivalente



Indicação interna 1588310 bar 7 Indicação n°1 - 0,54 mm de tamanho equivalente