

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA
CELSO SUCKOW DA FONSECA – CEFET/RJ

DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
COORDENADORIA DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIA

DISSERTAÇÃO

MODELO PARA AVALIAÇÃO DE DESCONTINUIDADES INTERNAS POR ULTRA-
SOM EM MATERIAIS FORJADOS

Isaac Niskier

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-
GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NEC-
ESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM TECNOLOGIA.

Maurício Saldanha Motta, D.Sc.
Orientador

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
OUTUBRO / 2008

Livros Grátis

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

Milhares de livros grátis para download.

SUMÁRIO

FICHA CATALOGRAFICA	v
DEDICATÓRIA.....	vi
AGRADECIMENTOS	vii
Resumo da dissertação submetida ao PPTEC/CEFET/RJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Tecnologia (M.T.).....	viii
Abstract	ix
Abreviaturas e símbolos:.....	xiii
INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO I - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
I.1 – Ensaio por Ultra Som	3
I.1.1 – Princípios Básicos	3
I.1.2 - Características e geometria do campo sônico	4
I.1.3 - Interação da onda com uma descontinuidade	6
I.1.4 – Aparelho de ultra-som	7
I.1.5 – Transdutores ou cabeçotes.....	8
I.1.5.1 – Transdutor normal ou reto.....	8
I.1.5.2 – Transdutor angular	9
I.1.5.3 – Transdutor duplo-cristal ou SE.....	9
I.1.6 - Realização do ensaio por ultra-som.....	10
I.1.7 – Ajuste da sensibilidade do ensaio	12
I.1.8 – Análise da amplitude do eco	14
I.1.8.1 – Análise da amplitude do eco por comparação direta (ASME-Seção V).....	14
I.1.8.2 – Análise da amplitude do eco por comparação Indireta (AVG / DGS)	14
I.1.9 - Resultados da inspeção.....	15
I.1.10 - Ensaio ultra-sônico pulso eco	19
I.2 – Ensaio por ultra-som em forjados	20
I.2.1 – Qualificação de pessoal	20

I.2.2 – Grau de acabamento.....	21
I.2.3 – Técnicas de varreduras utilizadas em forjados	21
I.2.4 – Ilustrações das técnicas de varredura mais usuais em Forjados.....	22
I.2.5 – Transdutores utilizados em ensaios de ultra-som em forjados	24
I.2.6 - Formatos de feixes sônico mais usuais em forjados	24
I.2.7 - Blocos de referência para uso em forjados.....	26
I.2.8 – Técnica de calibração pelo uso do diagrama AVG/DGS	27
I.2.8.1 – Utilização do diagrama AVG/DGS	29
I.2.8.2 – Diagrama AVG / DGS para transdutores específicos	30
I.3 – Confiabilidade dos ensaios não-destrutivos.....	32
I.3.1 – Método POD para quantificar a confiabilidade em END's.....	33
I.3.2 - Aplicação das curvas POD	34
I.4 – Detecção/dimensionamento de descontinuidades através dos ensaios não-destrutivos – estado da técnica	38
I.4.1 – Ensaio por ultra-som TOFD	38
I.4.2 – Ensaio por ultra-som Phased Array	41
CAPÍTULO II - MATERIAIS E METÓDOS	44
II.1 - Definição dos corpos de prova.....	44
II.1.1 – Material de base.....	44
II.1.2 – Dimensões e formatos dos corpos de prova.....	45
II.1.3 - Superfície de varredura.....	45
II.1.4 - Descontinuidades a serem usinadas nos corpos de prova.....	47
II.1.4.1 - Furos de fundo chato	47
II.1.4.2 - Furos de fundo cônico.....	48
II.1.5 - Posicionamento das descontinuidades nos Corpos de Prova	49
II.2 – Execução do ensaio de ultra-som na matéria-prima.....	50
II.3 – Controle dimensional das descontinuidades.....	51
II.4 - Definição do transdutor utilizado para varredura	54
II.5 - Definição do equipamento de ultra-som utilizado	54
II.6 - Sensibilidade do ensaio	54

II.6.1 - Seleção do método	54
II.6.2 - Ajuste de sensibilidade para varredura	55
II.6.3 - Estimativa da dimensão das descontinuidades	56
II.7 – Critério de aceitação	57
II.8 – Realização dos ensaios por ultra-som nos CP's	58
II.8.1 - Seleção dos inspetores qualificados	58
II.8.2 – Custos envolvidos nos testes de US nos corpos de prova	58
II.9 – Metodologia de análise dos resultados do ensaio por ultra-som	59
II.9.1 - Definições:	59
CAPÍTULO III – RESULTADOS- APRESENTAÇÃO E ANÁLISE.....	64
CONSIDERAÇÕES FINAIS	76
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	80
ANEXO I - CERTIFICADOS DA MATÉRIA-PRIMA DOS CORPOS DE PROVA.	
ANEXO II - DESENHOS DE USINAGEM DOS CORPOS DE PROVA.	
ANEXO III - CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DA MÁQUINA DE MEDIÇÃO DE COORDENADAS EM 3D.	
ANEXO IV – EXEMPLO DE RELATÓRIOS DE MEDIÇÕES DAS DESCONTINUIDADES POR ULTRA-SOM.	

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

N724 Niskier , Isaac

Modelo para avaliação de descontinuidades internas por ultra-som em materiais forjados / Isaac Niskier.—2008.

xiii , 82f.+ Anexos : il.col. , tabs. ; enc.

Dissertação (Mestrado) Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca , 2008.

Bibliografia : f. 80-82

1.Ultra-som-Testes 2.AISI 8630 3.Dimensionamento de descontinuidades I.Título.

CDD 620.11274

DEDICATÓRIA

À minha esposa Anete e
ao meu querido filho Guilherme.

AGRADECIMENTOS

- Ao professor Maurício Saldanha Motta (D.Sc), meu prezado orientador, que com o uso de seu conhecimento e dedicação, tornou possível a orientação para a efetivação desse estudo.
- A equipe de Professores do PPTec/CEFET/RJ, pelos valiosos conhecimentos transmitidos ao longo do curso.
- À minha mulher Anete e meu querido filho Guilherme, que sem o suporte e a paciência deles certamente não seria possível a condução e conclusão desse grande desafio que foi para mim o curso de Mestrado.
- À FMC Technologies, empresa onde trabalho a 27 anos, por todo seu apoio, sem o qual seria impossível a realização desse estudo.
- Ao Engenheiro Sérgio Damasceno (D.Sc.), do CENPES/PETROBRAS, por todo auxílio ao longo deste curso.
- Ao Professor José Luiz Fernandes (Ph.D), pelo auxílio na realização dos levantamentos estatísticos necessários na condução desse estudo.
- Aos funcionários do PPTec/CEFET/RJ, Abraão Ferreira e Bráulio Tito, por todo suporte administrativo realizado ao longo do curso.
- As empresas SCHMOLZ + BICKENBACH DO BRASIL IND. E COM. AÇOS LTDA pela cessão da matéria-prima da qual foram confeccionados os Corpos de Prova utilizados nesse estudo.
- As empresas Villares Metals, JBS e Controltest, pela cessão de mão de obra qualificada que executou as inspeções por ultra-som nos Corpos de Prova.
- Ao Engenheiro Marco Antônio Guido, inspetor Nível III pela ASNT, pelo inestimável apoio técnico dado ao longo de todo processo de execução dos Ensaios de Ultra Som nos Corpos de Prova.
- E a todos os amigos do curso de Mestrado pelos constantes intercâmbios de conhecimento, afeto e incentivo, que certamente contribuíram sobremaneira para a finalização desse curso.

Resumo da dissertação submetida ao PPTEC/CEFET/RJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Tecnologia (M.T.).

MODELO PARA AVALIAÇÃO DE DESCONTINUIDADES INTERNAS POR ULTRA-SOM EM MATERIAIS FORJADOS

Isaac Niskier

Outubro de 2008

Orientador: Maurício Saldanha Motta, D.Sc.

Programa: PPTEC

Esse estudo tem por objetivo avaliar descontinuidades internas em materiais forjados, utilizando um modelo de ajuste de pontos por mínimos quadrados. Os referidos pontos devem ser obtidos por meio do ensaio de ultra-som pelo método de pulso eco, com uso da técnica de calibração AVG/DGS, de forma a contribuir no dimensionamento de furos de fundo chato e cônico, simulando descontinuidades perpendiculares e não perpendiculares ao feixe sônico produzido por transdutor normal duplo-cristal de 4 Mhz. Os corpos de prova foram fabricados em aço forjado de alta resistência AISI 8630, tendo em vista sua grande aplicabilidade na indústria de Óleo & Gás, com descontinuidades introduzidas artificialmente na forma de furos de fundo chato e cônico usinadas variando-se seus diâmetros, simulando diferentes descontinuidades possivelmente oriundas do processo de forjamento. Entre outras contribuições, esse estudo pretende auxiliar análises computacionais, como por exemplo, simulações envolvendo mecânica da fratura e elementos finitos, que buscam avaliar a integridade estrutural tendo como uma das referências a geometria das descontinuidades, propor ainda, através da definição de equações de ajustes, uma faixa de valores (máximo e mínimo) para incrementar a confiabilidade dessas análises. Como resultado, gerou-se gráficos e equações de ajuste (previsibilidade) com coeficientes de determinação calculados, capazes de avaliar a confiabilidade no dimensionamento de descontinuidades internas em materiais forjados, gerando assim uma maior confiabilidade nas decisões de uso em forjados que apresentem eventuais descontinuidades internas.

Palavras-chave: Ultra-Som, AISI 8630, mínimos quadrados, dimensionamento de descontinuidades.

Abstract of dissertation submitted to PPTEC/CEFET/RJ as partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Technology (T.M.).

ULTRASONIC INTERNAL DEFECTS MODEL FOR EVALUATION IN FORGED MATERIAL.

Isaac Niskier

October / 08

Supervisor: Maurício Saldanha Motta, D.Sc.

Program: PPTEC.

This study has the goal of proposing a model of point adjustment for least squares, obtained through the ultrasonic test by echo pulse method using AVG / DGS calibration technique, to contribute in conic and flat bottom holes measurement, stimulating perpendicular and non perpendicular defects to the sonic beam by 4 MHz double crystal normal transducer. The coupons were made of high resistance forged steel AISI 8630 considering its high use in the oil and gas industry, with defects introduced artificially in the shape of machined conic and flat bottom holes changing its diameters simulating different defects presumable from the forging process. Among other contributions this application intends to help computer analysis for instance simulations involving fracture mechanics analysis and finite elements the structural integrate having as one of its references the defects shape and propose though the adjustment equations definition a range of values (maximum and minimum) to increase the reliability oh these analyses. With these results, adjustment equations and charts were made with calculated determination coefficients able to evaluate the reliability in the measurement of internal defects in forged materials, as a result of that, the reliability of decisions like “use as is” were increased.

Key words: Ultrasonic test, AISI 8630, method of least square, defect measurement.

Lista de Figuras

Figura I.1 – Geração de ondas ultra-sônicas	04
Figura I.2 – Sistema de ondas circulares	04
Figura I.3 – Variação de intensidade da pressão sônica no campo próximo	05
Figura I.4 – Regiões do feixe sônico	06
Figura I.5 – Interação da onda com uma descontinuidade	06
Figura I.6 – Aparelho básico analógico de ultra-som, marca Krautkramer	07
Figura I.7 – Tipos de transdutores realizados no ensaio para ultra-som	08
Figura I.8 – Transdutor normal ou reto	09
Figura I.9 – Transdutor angular	09
Figura I.10 – Transdutor duplo-cristal ou SE	10
Figura I.11 – Bloco de calibração V1 – Norma DIN 54120	11
Figura I.12 – Bloco de calibração V2 – Norma DIN 54120	11
Figura I.13 – Calibração dos cabeçotes normais com uso de blocos de referência	13
Figura I.14 – Calibração dos cabeçotes angulares com o uso de bloco de referência	14
Figura I.15 – Representação A-Scan no ensaio de ultra-som	16
Figura I.16 – Representação B-Scan no ensaio de ultra-som	16
Figura I.17 – Representação C-Scan no ensaio de ultra-som	17
Figura I.18 – Ilustração de quatro regimes de inspeções	18
Figura I.19 – Inspeção ultra-sônica utilizando a técnica pulso-eco	19
Figura I.20 – Ilustração do transdutor angular não incidindo na parede do furo	22
Figura I.21 – Varreduras do feixe sônico em discos forjados	22
Figura I.22 – Varreduras do feixe sônico em Barras Cilindricas Forjados	23
Figura I.23 – Varreduras do feixe sônico em Forjados Furados	23
Figura I.24 – Varreduras do feixe-sônico em retangulares e quadrados	23
Figura I.25 – Transdutores de 1 a 4 MHz com diâmetros variando entre 20 a 34 mm	25
Figura I.26 – Transdutores de 0,5 a 2 MHz com diâmetros variando entre 5 a 34 mm	25
Figura I.27 – Transdutores de 5 a 15 MHz com diâmetros variando entre 5 a 24 mm	26
Figura I.28 – Bloco de referência para transdutores duplo-cristal	27
Figura I.29 – Diagrama AVG/DGS referente ao transdutor B2 S-N-O ⁰	29
Figura I.30 – Determinação do tamanho do refletor equivalente no diagrama AVG/DGS	30
Figura I.31 – Curva AVG/DGS para transdutor normal B2-SN	31
Figura I.32 – Curva AVG/DGS para transdutor normal M4SN	31
Figura I.33 – Curva POD para técnica de inspeção real e ideal	34
Figura I.34 – Curva POD para inspeção de trincas em chapas	35
Figura I.35 – Esquema do método “â” versus “a” para a determinação da POD	36

Figura I.36 – Ilustração típica de uma tarefa de inspeção	37
Figura I.37 – Equipamento utilizado no Ensaio de TOFD	39
Figura I.38 – Modelo de apresentação de resultado no ensaio TOFD	40
Figura I.39 – Princípios da técnica TOFD na inspeção de solda	40
Figura I.40 – Sistema completo de inspeção TOFD	41
Figura I.41 – Sistema de inspeção Phased Array	42
Figura I.42 – Representação feixe-sônico no Phased Array	43
Figura II.1 – Corpos de prova como recebidos da usina	45
Figura II.2 – Desenho esquemático do Corpo de Prova	46
Figura II.3 – Fotos dos CP's encapsulados em caixa metálica	47
Figura II.4 – Desenho esquemático do CP – Furo Plano	48
Figura II.5 – Desenhos esquemáticos do CP – Furo Cônico	49
Figura II.6 – Representações das coordenadas e ponto zero nos CP's	50
Figura II.7 – Ensaio por ultra-som nas matérias-primas	51
Figura II.8 – Inspeção dimensional dos CP's em máquina 3D	52
Figura II.9 – Fluxo resumo das atividades desenvolvidas nos CP's	53
Figura II.10 – Curva AVG/DGS exemplo para ajuste de sensibilidade	56
Figura II.11 – Curva AVG/DGS exemplo para estimativa de dimensão descontinuidade	57
Figura III.1 – Equação do CP 01 com furo chato	64
Figura III.2 – Equação do CP 02 com furo chato	65
Figura III.3 – Equação do CP 05 com furo chato	66
Figura III.4 – Equação geral dos CP's com furo chato	67
Figura III.5 – Equação do CP 05 com furo cônico	68
Figura III.6 – Equação do CP 04 com furo cônico	69
Figura III.7 – Equação do CP 03 com furo cônico	70
Figura III.8 – Equação geral dos CP's com furo cônico	71

Lista de Tabelas:

	Pág.
Tabela I.1 – Tradução de siglas do método AVG/DGS	15
Tabela I.2 – Transdutores mais utilizados em Ensaio por ultra-som em Forjados	24
Tabela II.1 – Dados do transdutor utilizado no ensaio por ultra-som	54
Tabela III.1 – Resumo dos ajustes por mínimos quadrados com os respectivos coeficientes de determinação (R^2) para os furos chatos e furos cônicos	73
Tabela III.2 – Exemplos de dados para testes das equações gerais de previsão do valor real, para furos chatos	74
Tabela III.3 – Exemplos de dados para testes das equações gerais de previsão do valor real, para furos cônicos	74
Tabela III.4 – Resumo dos erros relativos	75

Abreviaturas e símbolos:

Abreviatura/ Símbolo	Significado	Unidade
END	Ensaio Não Destrutivo	-
US	Ultra Som	-
POD	Probability Of Detection	-
ASNT	American Society for Non Destructive Testing	-
AISI	American Iron and Steel Institute	-
UNS	Unification Numbering System	-
SNQC	Sistema Nacional de Qualificação e Certificação	-
CP	Corpo de Prova	-
ASME	American Society for Mechanical Engineering	-
AVG	Abstand, Verstärkung, Grösse	-
DGS	Distance, Gain, Size	-
DPR	Disco Plano Refletor	-
dB	Decibél	-
TOFD	Time of Flight Diffraction	-

INTRODUÇÃO

A utilização de matérias-primas Forjadas tem sido amplamente utilizadas por diversos ramos da nossa indústria face a qualidade superior que esse processo confere aos materiais em termos de propriedades mecânicas e integridade interna (isenção de defeitos). Com o grande aumento da demanda de matéria-prima em todo o mundo, a indústria brasileira está experimentando um incremento significativo em sua produção, incremento esse que pode, dependendo do grau de maturidade do Sistema da Qualidade dessas usinas, afetar sobremaneira a qualidade desses produtos, seja na aquisição de matéria-prima de baixa qualidade para obtenção dos blocos forjados, o que pode resultar em Forjados também de baixa qualidade com defeitos internos (inclusões, segregações, dobras, etc), ou mesmo pela velocidade imposta pelo mercado comprador, que impõem prazos de entrega cada vez mais curtos e desafiadores de serem cumpridos.

Diante desse cenário, que ao que parece veio para ficar e se intensificar cada vez mais, é necessário que as empresas que consomem esse tipo de produto (Aços Forjados) conheçam os eventuais riscos e com o emprego de métodos de avaliação de integridade minimizem esses riscos. O emprego dos métodos de avaliação de integridade nos materiais Forjados por ultra-som é uma das técnicas que tem sido mais amplamente utilizada em diversos segmentos das indústrias para avaliação da qualidade dessas matérias-primas.

Na busca pela otimização/redução dos custos de fabricação cresce a cada dia a necessidade por um melhor dimensionamento das eventuais descontinuidades internas presentes nessas matérias-primas, isto se faz necessário para que uma avaliação quanto ao uso ou não desses materiais seja o mais confiável possível, um dimensionamento incorreto pode levar a recuperação ou até ao sucateamento de grandes forjados a custo elevadíssimos, sem considerar que os prazos para reposição dessas matérias-primas estão cada vez maiores face a grande demanda de todo mercado mundial consumidor de aço, o que também contribui para afetar os custos totais dos projetos.

Com base nessa realidade, esse estudo pretende analisar e consolidar as diversas literaturas que tratam dessa questão, bem como fabricar Corpos de Prova com descontinuidades artificiais fabricadas, para assim submetê-los a testes experimentais por ultra-som convencional (pulso-eco), utilizando mão de obra qualificada disponível no mercado nacional, e a partir dos resultados encontrados pelos inspetores de ultra-som, utilizando as ferramentas e conceitos estatísticos adequados, produzir dados que possam auxiliar no correto dimensionamento das descontinuidades.

Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo propor e analisar um modelo de ajuste de pontos obtidos por meio do ensaio de ultra-som pelo método de pulso eco, com uso da técnica de calibração AVG/DGS, em corpos de prova de material forjado em aço AISI 8630.

Esses pontos são obtidos efetuando-se a medida para dois tipos de furos: de fundo chato e fundo cônico.

Objetivos Específicos

Para atingir o objetivo geral desse trabalho, foi necessário dividi-lo em etapas que foram seguidas, constituindo-se nos objetivos específicos seguintes:

- Revisão bibliográfica;
- Investigar os modelos disponíveis na literatura e os procedimentos estatísticos para análise e ajuste de dados com auxílio do Software MATHCAD versão 14, disponível na empresa FMC Technologies.
- Determinar duas equações gerais referentes aos furos de fundo chato e cônicos, analisando os erros relativos da equação de predição e os respectivos coeficientes de determinação (R^2).

De forma a alcançar esses objetivos, os capítulos desse trabalho foram delineados conforme a seguinte estrutura:

- Capítulo I: Fez-se uma revisão bibliográfica, abordando informações básicas sobre os Ensaio Não Destrutivos, com ênfase no ensaio por ultra-som em geral e mais especificamente o por ultra-som em forjados.
- Capítulo II: Nesse capítulo são apresentados os materiais e métodos, descrevendo assim a metodologia, pessoal e os equipamentos utilizados para execução dos Ensaio.
- Capítulo III: Nesse capítulo foram apresentados e discutidos os resultados obtidos através da execução do ensaio por ultra-som nos Corpos de Prova.
- Capítulo IV: Apresenta as considerações finais, conclusões do trabalho e sugestões para continuidades em trabalhos futuros.

CAPÍTULO I - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

I.1 – Ensaio por Ultra Som

I.1.1 – Princípios Básicos

O Ensaio ultra-sônico de materiais é feito com o emprego de ondas mecânicas que se propagam no meio em inspeção. Estas ondas possuem frequência muito elevada (a qual vai de cerca de 20 Hz a 20 kHz), acima da faixa perceptível pelo ouvido humano, e são denominadas ondas ultra-sônicas. Qualquer onda mecânica é composta de oscilações de partículas discretas no meio em que se propaga. A passagem de energia acústica pelo meio faz com que as partículas que o compõe executem um movimento de oscilação em torno da posição de equilíbrio, cuja amplitude diminui com o tempo, em decorrência da perda de energia da onda. Assumindo-se que o meio em estudo é elástico, ou seja, que as partículas não estão rigidamente ligadas, mas que podem oscilar em qualquer direção, então se pode classificar as ondas acústicas em três categorias:

- **Ondas Longitudinais** – As partículas do meio vibram na mesma direção da propagação de ondas;
- **Ondas Transversais** – As partículas do meio vibram na direção perpendicular ao de propagação da onda.
- **Ondas Superficiais ou ondas Rayleigh** – São assim chamadas pela sua característica de se propagar na superfície dos sólidos ou líquidos [2].

A maneira mais usual de geração das ondas ultra-sônicas é através do efeito piezométrico, que é baseado no fato de que certos cristais geram correntes elétricas quando deformados mecanicamente. Inversamente, ocorre a deformação do cristal quando uma diferença de potencial elétrico é aplicada entre duas faces opostas do cristal. Uma corrente elétrica alternada gera vibrações mecânicas no cristal na frequência correspondente a frequência de excitação. Estes cristais são chamados de transdutores de energia de um tipo em outros [3].

A figura I.1 apresenta as diferentes regiões presentes durante a geração de ondas ultra-sônicas.

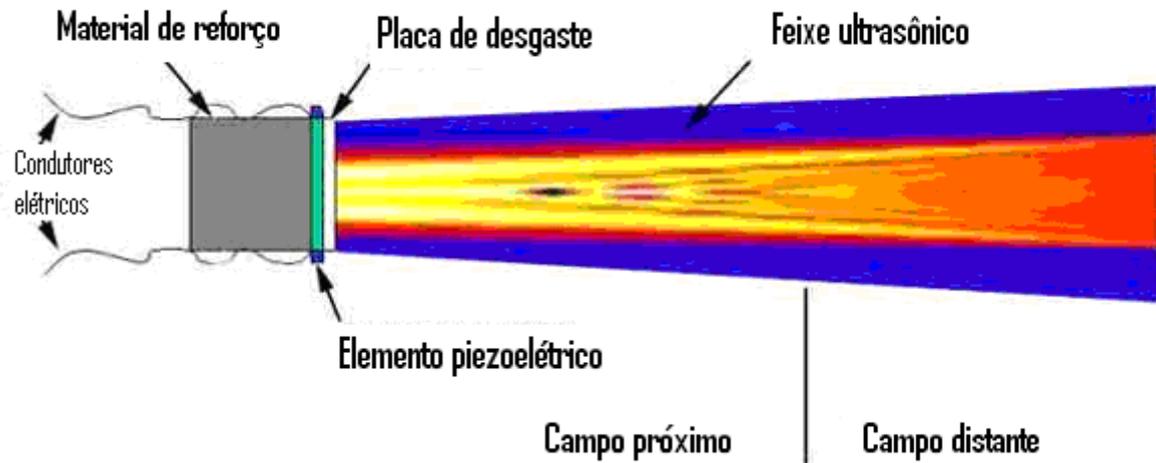


Figura I.1 - Geração de ondas ultra-sônicas [4]

I.1.2 - Características e geometria do campo sônico

Para entendimento do campo sônico, imagine que o cristal piezoelétrico, gerador de ondas ultra-sônicas, seja composto não de uma única peça, mas de infinitos pontos oscilantes. Cada ponto do cristal produz ondas que se propagam no meio, conforme figura I.2 abaixo.

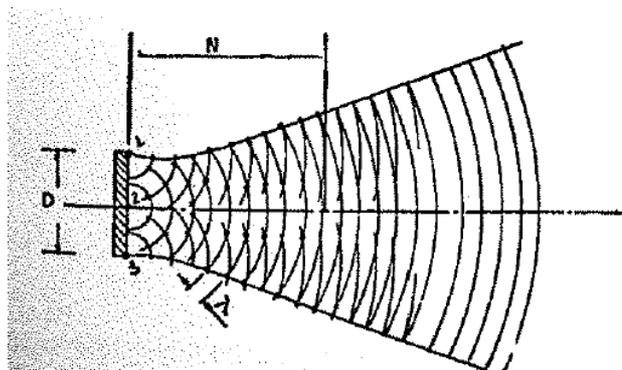


Figura I.2 - Sistema de ondas circulares. [2]

Campo próximo:

O campo próximo caracteriza-se pela grande variação da intensidade sônica na região imediatamente a frente do cristal, pelos fenômenos de interferência entre pressões máximas e mínimas [3].

O ponto de pressão máxima do feixe sônico determina o final do campo próximo. O comprimento do campo próximo (N) corresponde à distância entre o cristal e este ponto de intensidade máxima. Neste ponto o feixe sônico está concentrado ao máximo [4].

Devido a essas interferências entre as pressões, o campo próximo representa para efeitos práticos, uma dificuldade na avaliação de descontinuidades, portanto trata-se de uma área que deve ser evitada quando se quer uma precisão na detectabilidade de descontinuidades.

Através da figura I.3 pode-se as diferentes variações da intensidade da pressão sônica no campo próximo.

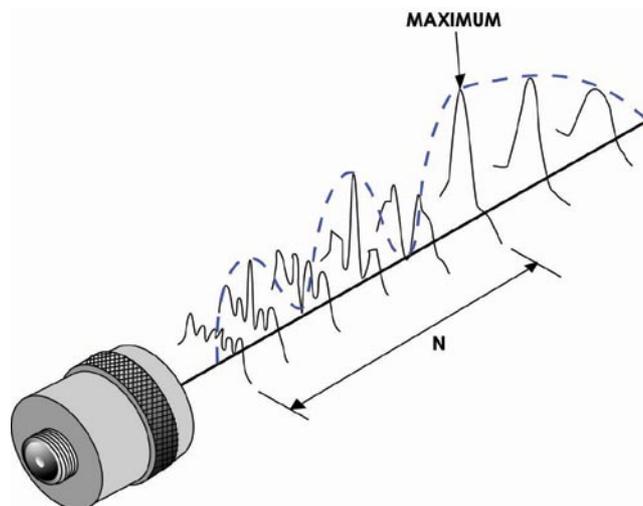


Figura I.3 - Variação da intensidade da pressão sônica no campo próximo [4]

Campo distante:

Para além do campo próximo, os fenômenos de interferência deixam de existir e o feixe sônico passa a ter um ângulo de abertura (divergência). Numa região, zona de transição, que varia aproximadamente de uma a três vezes a espessura do cristal, o ângulo de divergência é variável e o decréscimo da pressão sônica ainda não é proporcional ao quadrado da distância [3]. Após esta zona de transição o feixe passa a apresentar um ângulo de divergência

constante e um decaimento de intensidade proporcional ao inverso do quadrado da distância, chamado então de campo distante ou zona de Fraunhofer, conforme demonstrado na Figura I.4.

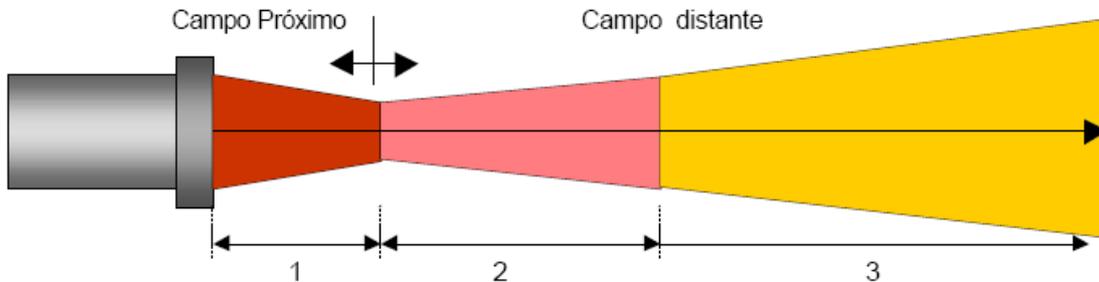


Figura I.4 - Regiões do feixe sônico: (1) Campo próximo (2) Zona de transição (3) Campo distante [4]

I.1.3 - Interação da onda com uma descontinuidade

Silk [5] mostra uma representação da interação de uma onda ultra-sônica com um defeito linear (figura I.5). Quando a onda ultra-sônica atinge a descontinuidade no material na qual ela percorre, esta onda pode ser refletida, difratada ou transmitida. A ocorrência de um desses fenômenos vai depender da relação entre o comprimento de onda e o tamanho da descontinuidade. Além desses fenômenos, ocorrem conversões de modo de ondas, isto é, a onda passa de um modo de propagação para outro, com, por exemplo, muda do modo longitudinal para o transversal ou vice-versa [6].

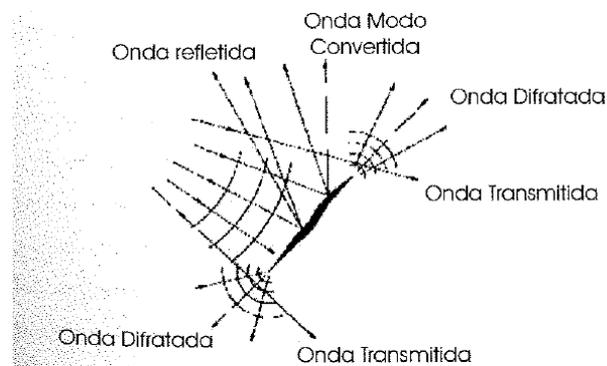


Figura I.5 - Interação da onda com uma descontinuidade [5]

I.1.4 – Aparelho de ultra-som

Basicamente, o aparelho de ultra-som contém circuitos eletrônicos especiais, que permitam transmitir ao cristal piezelétrico, através do cabo coaxial, uma série de pulsos elétricos controlados, transformados pelo mesmo em ondas ultra-sônicas [10].

Da mesma forma, sinais captados no cristal são mostrados na tela do tubo de raios catódicos em forma de pulsos luminosos denominados “ecos” que podem ser regulados tanto na amplitude, como posição na tela graduada e se constituem no registro das discontinuidades encontradas no interior do material [2].

Quer seja analógico ou digital, todos os aparelhos apresentam os controles mínimos básicos que permitem utilizar o aparelho para qualquer aplicação prática, podemos citar os mais relevantes como: seletor de potência de emissão, seletor de escolha de função (para permitirem a seleção de transdutores monocristais ou duplo-cristal), controle de ganho (em dB), seletor de escala e seletor de velocidade de propagação do som [2].

A figura I.6 apresenta um modelo de aparelho de ultra-som analógico.

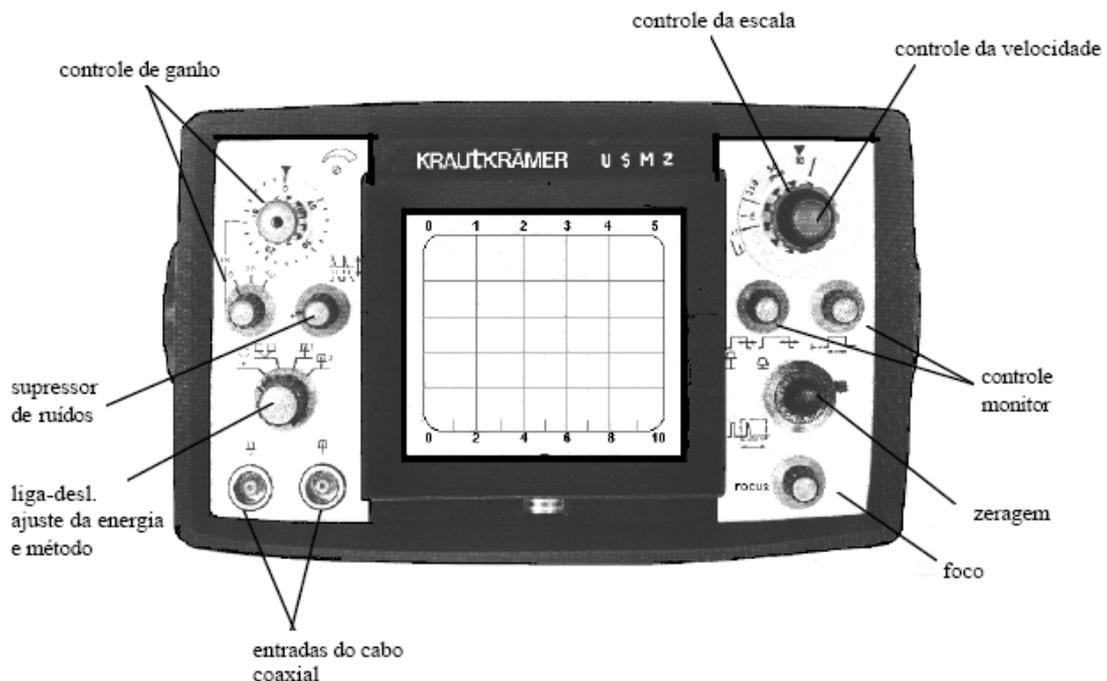


Figura I.6 – Aparelho básico analógico de ultra-som, marca Krautkramer [2]

I.1.5 – Transdutores ou cabeçotes

Os transdutores ultra-sônicos são fabricados para uma variedade de aplicações e também podem ser fabricados de maneira customizada para atender alguma necessidade específica. Muita atenção deve ser dada para a correta seleção do transdutor apropriado para a aplicação [4]

A seleção equivocada de um transdutor pode afetar sobremaneira a detecção de uma eventual descontinuidade, uma vez que o comprimento de onda gerado pelo transdutor tem um significativo efeito na probabilidade de detecção de uma descontinuidade [4].

A figura I.7 apresenta alguns exemplos dos mais usuais transdutores utilizados no ensaio de ultra-som.



Figura I.7 – Tipos de Transdutores utilizados no ensaio por ultra-som [4]

I.1.5.1 – Transdutor normal ou reto

São os transdutores monocristais geradores de ondas longitudinais normais a superfície de acoplamento.

Os transdutores normais são constituídos a partir de cristais piezelétricos colado num bloco rígido denominado de amortecedor e sua parte livre protegida por uma membrana de borracha ou uma resina especial, conforme podemos observar na figura I.8. O bloco amortecedor tem função de servir de apoio para o cristal e absorver as ondas emitidas pela face colada a ele.[2].

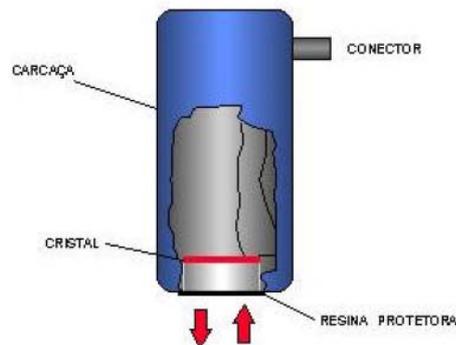


Figura I.8 – Transdutor normal ou reto [2]

I.1.5.2 – Transdutor angular

Diferem do transdutor reto ou normal pelo fato do cristal formar um determinado ângulo com a superfície do material. O ângulo é obtido, inserindo-se uma cunha de plástico entre o cristal piezelétrico e a superfície, conforme pode ser observado na figura I.9.

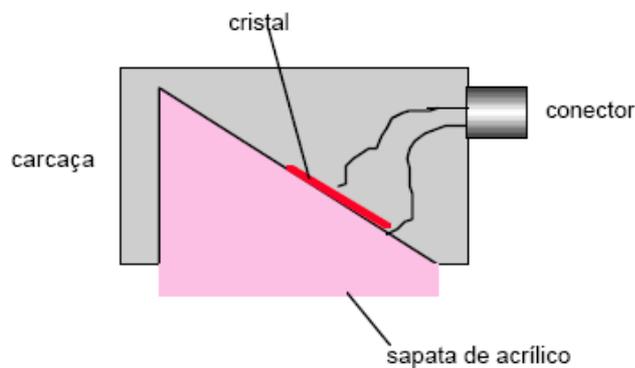


Figura I.9 – Transdutor Angular [2]

I.1.5.3 – Transdutor duplo-cristal ou SE

Esse é um transdutor dotado de dois cristais incorporado na mesma carcaça, separado por um material isolante. Indicado especialmente para medir materiais de espessura reduzida ou quando se deseja detectar descontinuidades logo abaixo da superfície do material, como pode ser observado na figura I.10 [2].

Este transdutor tem uma característica especial, que é detectar com maior facilidade, descontinuidades que estejam próximas à superfície. Tal característica torna-se importante, pois, na prática, pode-se considerar a ausência de campo próximo (responsável pela perda da sensibilidade e resolução do transdutor, na detecção de descontinuidades) [26-27].

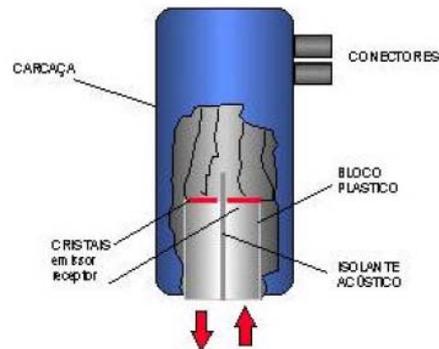


Figura I.10 – Transdutor Duplo-

cristal ou SE [2]

I.1.6 - Realização do ensaio por ultra-som

Vários parâmetros deverão ser selecionados para a realização do ensaio por ultra-som. Parâmetros tais como, sensibilidade, velocidade do som no material, ajuste da escala horizontal dentre outros deverão ser selecionados pelo próprio operador no momento do ensaio, levando em consideração as dimensões e tipos de descontinuidades a serem detectados, o tipo de material ensaiado, a geometria ou forma da peça ou a seção a ser examinada e as especificações de fabricação e inspeção [6].

Toda inspeção por ultra-som deve ser realizada em conformidade com procedimentos escritos, contendo todas as informações necessárias aos ajustes e calibrações referentes ao ensaio. Tais ajustes e calibrações constituem fatores importantes que podem levar a aprovação ou rejeição do material ou peça ensaiada, e ainda determinam o nível de sensibilidade do ensaio [6].

O ensaio de ultra-som como qualquer outra técnica de ensaio não destrutivo, requer a calibração prévia de todos os instrumentos utilizados na sua realização para a correta avaliação do material ensaiado. As calibrações são realizadas pelo próprio operador utilizando blocos de aço normalizados (blocos padrão conforme figuras I.11 e I.12) baseados em normas

específicas. Devem ser calibrados a escala do aparelho de ultra-som, transdutores que serão utilizados, e até mesmo os blocos padrão deverão ter sido fabricados com controle da integridade, rugosidade superficial e dimensões [6].

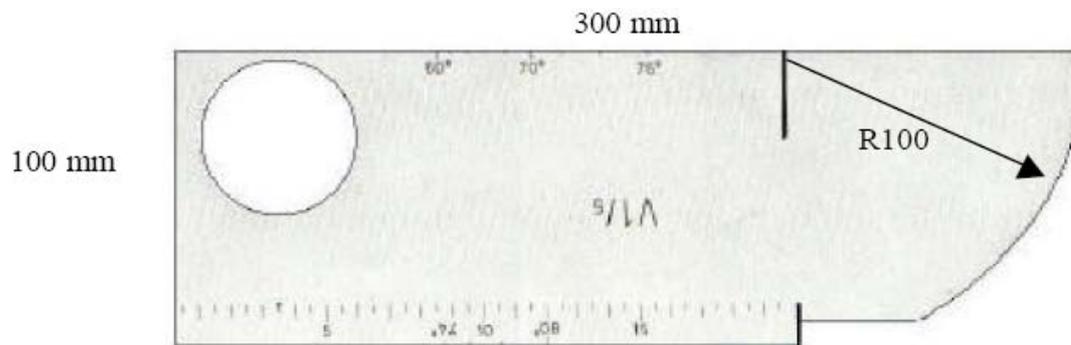


Figura I.11 - Bloco de calibração V1 – Norma DIN 54120 [2]

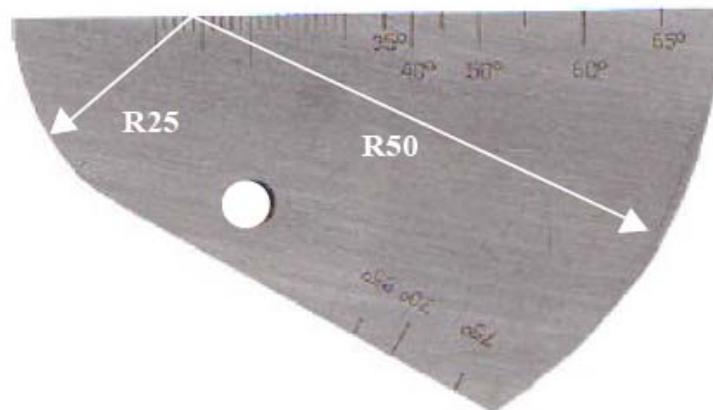


Figura I.12 - Bloco de calibração V2 – Norma DIN 54120 [2]

O ajuste da sensibilidade é a mais importante calibração a ser realizada no aparelho de ultra-som para o ensaio de um material. Calibrar a sensibilidade significa ajustar o controle de ganho (decibéis) do aparelho, de forma que sejam detectadas as discontinuidades importantes e desprezadas aquelas consideradas não significativas. A decisão a ser tomada pelo operador para considerar uma discontinuidade como sendo um defeito, depende da altura da respectiva indicação na tela do aparelho de ultra-som, que por sua vez depende das dimensões das discontinuidades e do ganho definido para o ensaio. Caso este tenha sido erroneamente

ajustado, pequenas descontinuidades darão origem a indicações de grande altura na tela do aparelho e serão consideradas também erroneamente como defeitos e vice-versa [6].

Para definir qual a calibração correta para cada tipo de peça ou equipamento, as normas de calibração dos equipamentos, como ASME, ASTM, API, etc, definem exatamente o que deve ser procedido [3].

Esta calibração pode ser realizada diretamente na peça, utilizando ecos provenientes da superfície ou de descontinuidades introduzidas com dimensões conhecidas, ou através de blocos padrões contendo refletores artificiais, geralmente furos ou entalhes, ou ainda através de diagramas que utilizam o comportamento do feixe sônico, como diagramas AVG/DGS [3].

O tema “ajuste da sensibilidade”, dada sua importância para o ensaio, será mais detalhado no item I.1.7 a seguir.

I.1.7 – Ajuste da sensibilidade do ensaio

Tal qual dito no parágrafo anterior, a avaliação do tamanho da descontinuidade é fundamental para aplicação dos critérios de aceitação das mesmas, ou seja, se o material estará aprovado ou rejeitado.

Nessa análise existem algumas limitações pelo fato de que a informação que nos é fornecida é a amplitude do eco que depende da refletividade da descontinuidade. A refletividade de uma descontinuidade é função não apenas do tamanho, mais também da forma, posição, orientação, tipo de descontinuidade e outras características dessa descontinuidade. Assim sendo é temerário senão impossível com as técnicas convencionais determinar-se com precisão o tamanho das descontinuidades [15].

Para a calibração da sensibilidade dos cabeçotes normais e duplo cristal deve ser levantada uma curva de referencia com, no mínimo 3 furos de fundo chato a diferentes profundidades, sendo a maior profundidade igual ou superior a espessura que será ensaiada [11].

Verificar em qual bloco obtemos a maior amplitude do furo de fundo chato, ajustar a sensibilidade para que este furo alcance 80% da altura da tela (ganho de referência), marcar

este ponto na tela, sem alterar o ganho marcar na tela as indicações obtidas com os outros blocos. Unindo estes pontos temos a curva de referência. Diminuindo 6 e 14 dB do ganho de referência obtemos as curva respectivamente a curva de 50% e 20% da referência, conforme ilustra a figura I.13 abaixo [11].

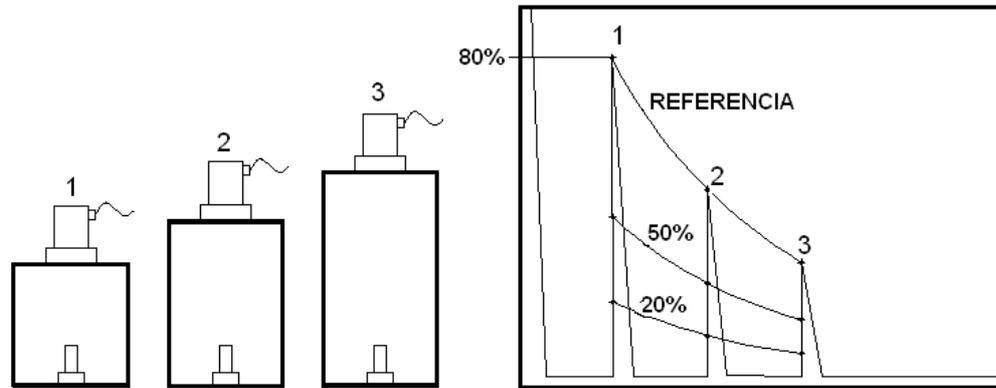


Figura I.13 – Calibração dos cabeçotes Normais com o uso de Blocos de referência [11]

Para a calibração dos cabeçotes angulares, deve ser levantada uma curva de referência com, no mínimo 2 pontos, primeiro o feixe sônico incide na superfície interna do bloco e o segundo na externa.

Ajustar a sensibilidade para que o primeiro ponto alcance 80% da altura da tela (ganho de referência), marcar este ponto na tela, sem alterar o ganho marcar na tela a indicação do rasgo externo do bloco. Unindo estes pontos temos a curva de referência. Diminuindo 6 e 14 dB do ganho de referência obtemos as curva respectivamente a curva de 50% e 20% da referência conforme ilustra a figura I.14 a seguir [11].

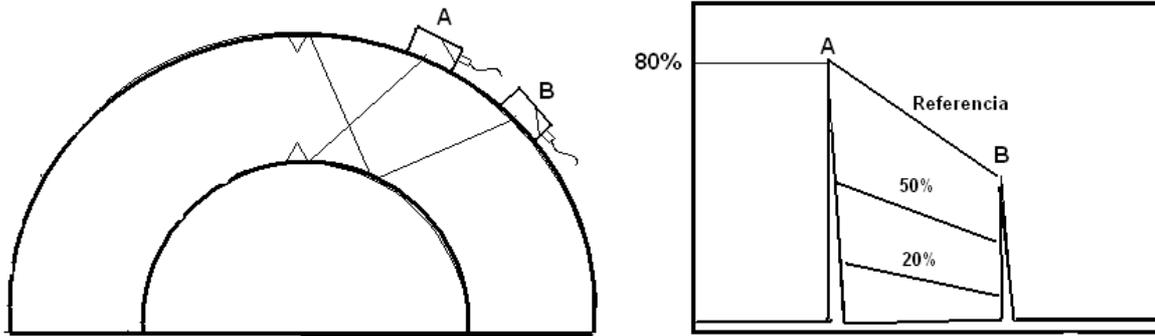


Figura I.14 – Calibração dos cabeçotes angulares com o uso de blocos de referência [11]

I.1.8 – Análise da amplitude do eco

No método para avaliação do tamanho das descontinuidades através da análise da “amplitude do eco” ou “altura do sinal na tela”, é feita uma comparação, direta ou indireta, entre sinais obtidos de descontinuidades reais, com o sinal obtido de refletores conhecidos [15].

I.1.8.1 – Análise da amplitude do eco por comparação direta (ASME-Seção V)

Diz-se que o método é por comparação direta quando o sinal do defeito real é diretamente comparado na própria tela do aparelho, com sinal obtido de um refletor conhecido introduzido na própria peça sob inspeção ou em blocos de comparação de características semelhantes (material e dimensões) às da peça sob inspeção. Por exemplo, podemos citar o Código ASME-Seção V, em que a descontinuidade a serem avaliadas tem seus sinais comparados com uma linha de referência traçada na própria tela do equipamento de ultra-som [15].

I.1.8.2 – Análise da amplitude do eco por comparação Indireta (AVG / DGS)

Nos métodos indiretos de análise da amplitude do eco as comparações de amplitude são feitas baseando-se em leis acústicas, que permitem relacionar entre si o sinal da

descontinuidade a analisar, o sinal do refletor utilizado para a calibração da sensibilidade do ensaio e o sinal que obteríamos do refletor ideal adotado como critério de aceitação [15].

O principal método indireto utilizado é o método AVG / DGS, siglas em alemão e inglês respectivamente, cujo significado encontra-se na tabela I.1 a seguir.

Tabela I.1 – Tradução de siglas do método AVG/DGS

	<u>Alemão</u>	<u>Português</u>	<u>Inglês</u>	
A =	Abstand	Distância	Distance	D
V =	Verstärkung	Amplificação	Gain	G
G =	Grösse	Tamanho	Size	S

O método AVG / DGS para avaliação de descontinuidades visa determinar qual o tamanho do disco plano refletor equivalente, em termos de refletividade, à descontinuidade detectada [15].

A amplitude do eco obtido da descontinuidade a avaliar é expressa em termos de \emptyset DPR (Disco Plano Refletor) ou em termos de excesso de amplitude, em dB, em relação ao critério de aceitação pré-estabelecido [15].

A comparação do sinal obtida é feita com o uso de diagramas que correlacionam a distância e tamanho de discos planos refletores com a variação de ganho e com o eco de fundo de uma parede oposta [15].

I.1.9 - Resultados da inspeção

O resultado de um ensaio por ultra-som pode ter um sinal de saída, modo A-scan, B-scan ou C-scan. Condições aceitáveis são diferenciadas de condições inaceitáveis através de um limiar de discriminação na saída do aparelho de ultra-som. A discriminação pode ser automatizada ou realizada por um operador humano.

No método A-Scan a tela do aparelho mostra a forma tradicional de visualização da tela, ou seja, na forma de ecos de reflexão, conforme ilustra a figura I.15 abaixo [2].

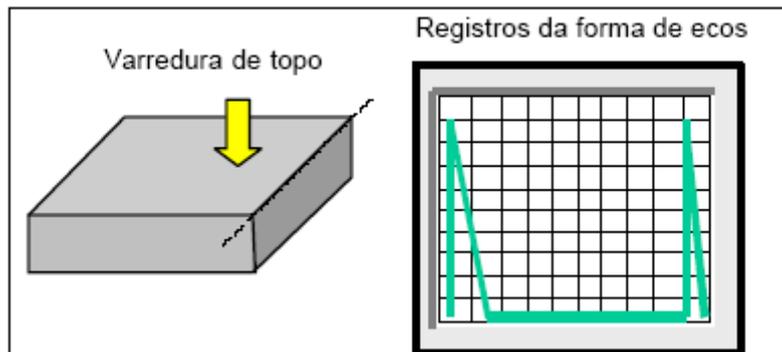


Figura I.15 – Representação A-Scan no ensaio de ultra-som [2]

No método B-Scan, a tela do aparelho mostra a seção transversal da peça, e portanto a visualização da peça é feita em corte conforme ilustra a figura I.16 abaixo. Este tipo de apresentação não é convencional, e somente aparelhos dotados de funções especiais são capazes de mostrar esta forma de apresentação. É muito útil para análise de corrosão em peças e tubos e chapas, pois o perfil da espessura é vista diretamente na tela [2].

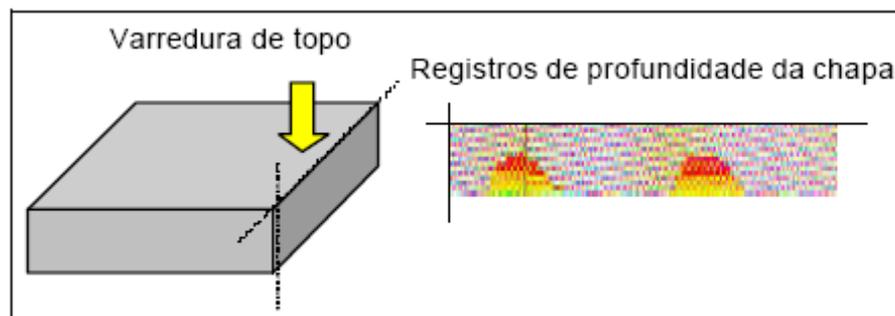


Figura I.16 – Representação B-Scan no ensaio de ultra-som [2]

No método C-Scan a apresentação não é convencional, neste tipo de apresentação a tela do aparelho mostra a peça no sentido “planta”, ou seja, a vista de cima da peça, conforme ilustra a figura I.17 abaixo [2].

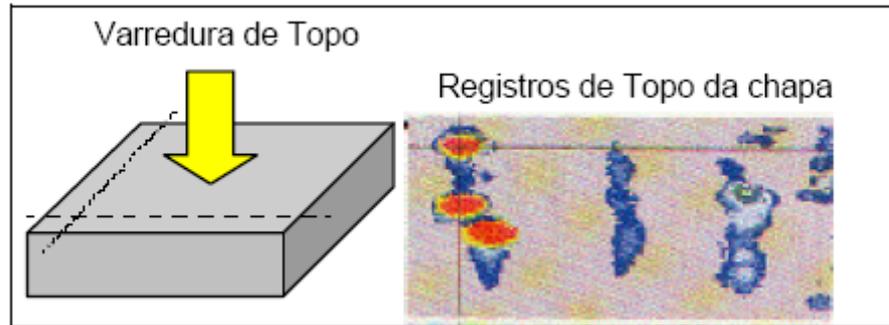


Figura I.17 – Representação C-Scan no ensaio de ultra-som [2]

A viabilidade da aplicação de uma inspeção por ultra-som para um determinado sistema depende do estabelecimento de uma relação entre a resposta de saída que o ultra-som pode gerar e as características de desempenho desejadas para o sistema. A relação entre a resposta de saída da inspeção por ultra-som e as características de desempenho do sistema podem ser viáveis em aplicações de laboratório, mas podem ser impraticáveis em condições de produção e serviço. Fatores tais como calibração, critério de aceitação, acessibilidade ao componente, condições superficiais, compatibilidade do material inspecionado e condições ambientais devem ser avaliados para determinar uma relação positiva entre a resposta de saída e o desempenho do sistema [6].

Apesar de atenção, disciplina, e das medidas de controle aplicadas para assegurar uma saída consistente como resultado da inspeção por ultra-som, a saída variará dentro de parâmetros de controle estabelecidos, como consequência de variação nas propriedades dos materiais, geometria, condições superficiais, acesso, condições ambientais entre outras. Se várias inspeções são realizadas sobre uma descontinuidade, uma distribuição densidade de probabilidade da saída/ imagem será gerada. Esta distribuição é similar a obtida por repetidas medidas de uma dimensão, tais como diâmetro ou o comprimento de um parafuso [6].

O resultado da inspeção por ensaios não destrutivos é geralmente medida indireta, e diversos sinais podem ser gerados de fontes não relevantes, tais como rugosidades superficiais, estrutura granular e variações geométricas. Estes sinais representam ruído inerente ao processo de inspeção ou o procedimento de ensaio. A discriminação do resultado de saída do ensaio (sinal/imagem) deve ser derivado de todos os sinais cujas amplitudes

excedam a amplitude do ruído presente. Análise de sinais e sinais mais ruídos são comuns em equipamentos eletrônicos, ópticos e outros processos discriminatórios [6].

Quatro possíveis saídas podem resultar da aplicação de um procedimento de inspeção para detecção de descontinuidades:

- *Verdadeiro positivo*: A descontinuidade existe e é detectada;
- *Falso positivo*: Descontinuidade que não existe é detectada;
- *Falso negativo*: Existe descontinuidade, mas não é detectada;
- *Verdadeiro negativo*: Não existe descontinuidade e não é detectada.

Em aplicações práticas, a dimensão da descontinuidade não é fixa (e raramente grande), e o processo de discriminação é mais complexo. De fato, o processo de discriminação é aplicado para uma faixa contínua de dimensões de descontinuidades, onde a capacidade de discriminação é dependente das características de desempenho do procedimento de inspeção e da separação do sinal (mais ruído) da resposta do ruído inerente ao processo [6].

A figura I.18 ilustra, de maneira idealizada, quatro possíveis regimes de inspeção para a magnitude relativa ao sinal da descontinuidade, S_0 , o limiar do registro, L , e a amplitude média do ruído, R_0 .

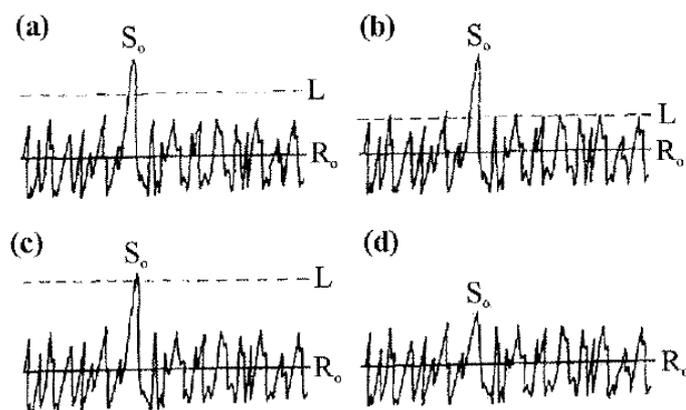
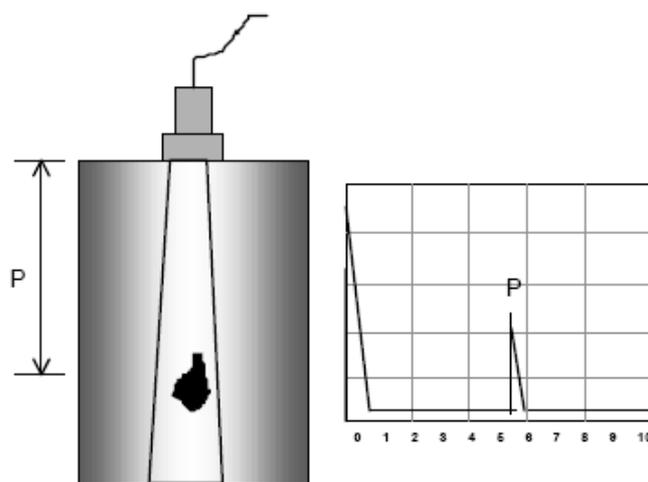


Figura I.18 – Ilustração de quatro regimes de inspeções [6]

I.1.10 - Ensaio ultra-sônico pulso eco

Pulso-eco é a técnica ultra-sônica mais largamente utilizada na inspeção de materiais, principalmente devido sua eficiência e simplicidade. Essa técnica envolve a detecção de ecos produzidos quando um sinal ultra-sônico é refletido por uma descontinuidade presente no material em teste. Sendo nesse caso utilizado somente um transdutor para emitir o pulso ultra-sônico (emissor) e receber o sinal refletido (receptor). Este método é utilizado na detecção, localização e dimensionamento de defeitos internos no material. Após o defeito ser detectado sua localização pode ser determinada levando-se em consideração três fatores: o tempo de percurso da onda entre o pulso inicial e o eco produzido pela falha, a distância do ponto de saída do feixe ao centro do cordão da solda e o ângulo de incidência do feixe sônico, conforme ilustra a figura I.19. É baseado na localização do defeito que o inspetor infere a classificação da descontinuidade. O tamanho do defeito está diretamente relacionado com a amplitude do sinal refletido, pois se o pulso ultra-sônico encontra uma superfície refletora, parte ou toda energia é refletida. O percentual de energia que é refletida é diretamente dependente do tamanho da superfície refletora em relação ao tamanho do feixe ultra-sônico incidente [3,8].



Técnica Impulso-Eco

Figura I.19 – Inspeção ultra-sônica utilizando a técnica pulso-eco [7]

Uma das vantagens dessa técnica é a grande sensibilidade para detecção de pequenas descontinuidades presentes no material, além de detectar com precisão descontinuidades logo abaixo da superfície de entrada do feixe sônico, aumentando assim a região de detecção de falhas internas no material [3,8].

O modo mais comum de apresentação do sinal ultra-sônico de pulso-eco é chamado modo A-scan. Esse consiste de um gráfico amplitude versus tempo, no qual o eixo horizontal em um osciloscópio representa o tempo decorrido e as deflexões verticais, as amplitudes dos ecos, conforme já mencionado no item I.1.9. Através da comparação entre a altura do eco da descontinuidade com um outro refletor conhecido é possível inferir a medida da falha. O uso do mostrador tipo ' A-scan' não é limitado à detecção e caracterização de descontinuidades, ele pode também medir, velocidade sônica, atenuação, espessuras e geometria do feixe sônico [6].

I.2 – Ensaio por ultra-som em forjados

O Ensaio de ultra-som em materiais Forjados tem sido uma técnica amplamente utilizada pela indústria na avaliação da integridade desses materiais. Algumas condições são exigidas por norma para a correta execução desse Ensaio, entre as principais podemos citar:

I.2.1 – Qualificação de pessoal

No aspecto de qualificação profissional, recomenda-se que os profissionais executores do Ensaio por ultra-som em Forjados estejam qualificados e certificados conforme requisitos da norma internacional “American Society for Non Destructive Testing” ASNT – TC-1 A, nível II ou pelo Sistema Nacional de Qualificação e Certificação SNQC, nível II.

O SNQC/END é um sistema de abrangência nacional que estabelece critérios e define sistemáticas, em conformidade com requisitos nacionais e internacionais, para a Qualificação e Certificação de pessoal em Ensaio Não Destrutivos no país [16].

Todo esse processo de qualificação é gerenciado pela ABENDE – Associação Brasileira de Ensaio Não Destrutivos.

A qualificação é a comprovação e verificações formais de características e habilidades, comprovadas segundo procedimentos escritos e com resultados documentados, que permitem a um indivíduo exercer as funções e atribuições conforme classificações previamente estabelecidas segundo os níveis de atuação (níveis I, II e III) [16].

I.2.2 – Grau de acabamento

As superfícies de varredura devem estar livres de materiais e ondulações que possam dificultar ou interferir na inspeção. A rugosidade superficial não deve exceder a 12,5 micrometros. O mesmo acabamento dado às superfícies de varredura deve ser dado às superfícies opostas, com o objetivo de diminuir a atenuação superficial. As superfícies devem ser preparadas por usinagem, esmerilhamento ou jateamento abrasivo [10].

I.2.3 – Técnicas de varreduras utilizadas em forjados

Para execução de avaliação segura em relação a integridade dos materiais forjados, faz-se necessário estabelecer-se técnicas de varredura que garantam que 100 % das áreas de interesse foram avaliadas. Nesse aspecto a norma ASTM A 388 descreve diversos arranjos para os perfis forjados mais usuais.

O ensaio por ultra-som deve ser efetuado antes de qualquer usinagem que possa impedir a inspeção de determinada área do forjado.

Na varredura da superfície, cada passe do transdutor deve se sobrepor ao outro em pelo menos 15%, para garantir uma completa cobertura de toda a área de interesse.

Sempre que possível, a varredura deverá ser realizada em, pelo menos, duas direções perpendiculares.

Para forjados em forma de disco, a varredura deve ser realizada em pelo menos uma das faces e no sentido radial (quando possível), com transdutor normal ou duplo cristal

Para forjados cilíndricos ou forjados furados, a varredura deve ser realizada nos sentidos radial e axial (quando possível), com transdutor normal ou duplo cristal.

Adicionalmente, deve ser realizada uma varredura com transdutor angular, no diâmetro externo, em toda extensão do forjado [12].

Uma varredura com transdutor normal, de frequência de 2 ou 4 MHz, utilizando adaptador de acrílico com ângulo entre 15° e 45° , deve ser realizada quando o feixe sônico do transdutor angular não incidir na parede do furo, conforme ilustra a figura I-20.

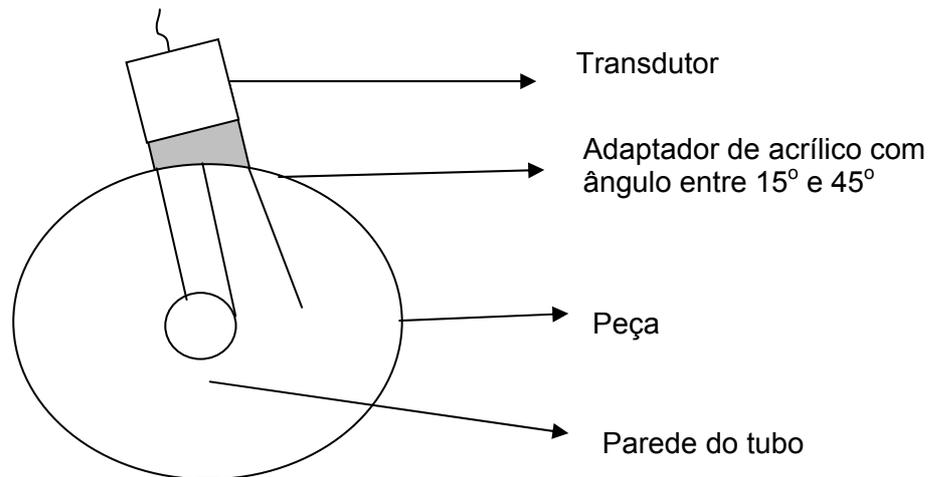


Figura I-20 – Ilustração do transdutor angular não incidindo na parede do furo [11]

I.2.4 – Ilustrações das técnicas de varredura mais usuais em Forjados

As ilustração abaixo (figuras I.21 a I.24) indicam as varreduras mais utilizadas nos ensaios por ultra-som em forjados nos diversos perfis que se apresentam.

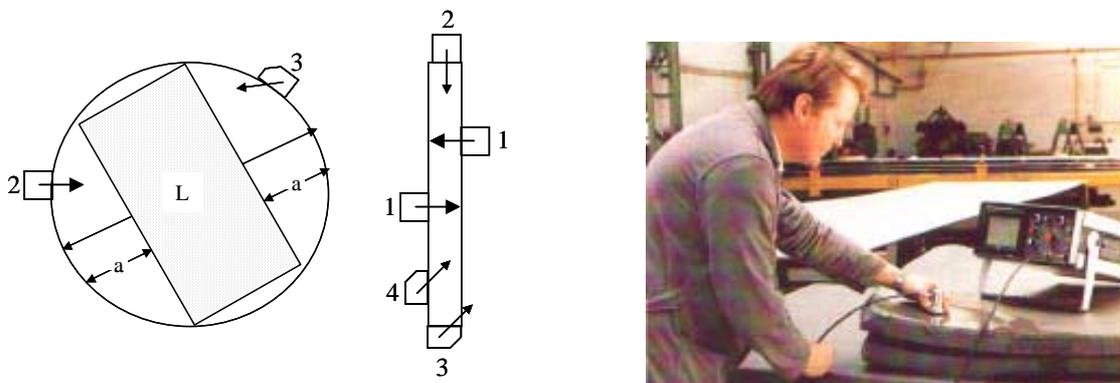


Figura I-21 – Varreduras do feixe sônico em Discos Forjados [11]

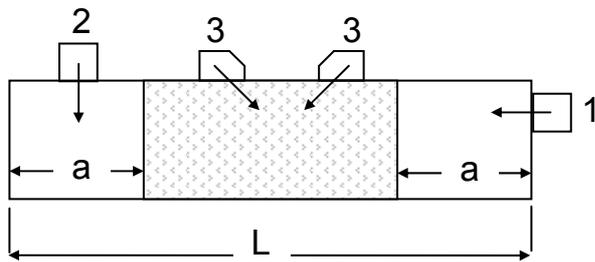


Figura I-22 – Varreduras do feixe sônico em Barras Cilíndricas Forjadas [11]

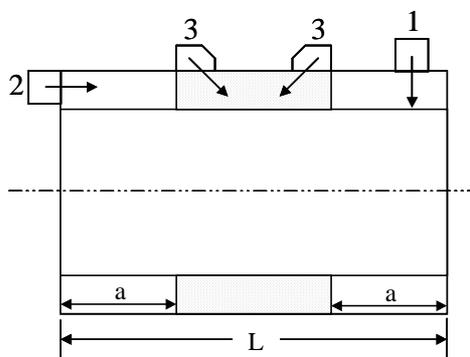


Figura I-23 – Varreduras do feixe sônico em Forjados Furados [11]

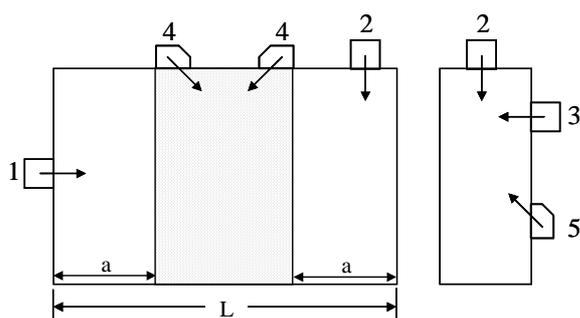


Figura I-24 – Varreduras do feixe sônico em Forjados Retangulares e Quadrados [11]

Nem sempre todas as posições são possíveis face às diferentes geometrias encontradas nos Forjados. Sempre que possível, deve-se utilizar transdutores duplo cristal, pois esses minimizam o efeito do campo próximo descrito no item “I.1.2” desse estudo.

I.2.5 – Transdutores utilizados em ensaios de ultra-som em forjados

Na tabela I.2 abaixo, estão indicados os transdutores que poderão ser utilizados no desenvolvimento dessa pesquisa, considerando variáveis tais como: fabricante, modelo, tipo, ângulo, dimensão a ser ensaiada, frequência, campo próximo e faixa de espessura aplicável para cada cabeçote [11].

A escolha do modelo adequado dependerá das características geométricas do forjado, homogeneidade metalúrgica do material, e localização mais esperada para o surgimento das eventuais descontinuidades.

Tabela I.2 – Transdutores mais utilizados em ensaios por ultra som em forjados

FABRICANTE	MODELO	TIPO DO CRISTAL	ÂNGULO GRAUS	DIMENSÃO CRISTAL (mm)	FREQÜÊNCIA MHz	CAMPO PRÓXIMO (mm)	FAIXA DE ESPESSURA (mm)
KRAUTKRÄMER	SEZ5M5	DUPLO	0	Ø 5,0	5,0	0	1 - 1000
KRAUTKRÄMER	MSEB2H	DUPLO	0	Ø 10,0	2,0	0	4 - 100
KRAUTKRÄMER	MSEB4H	DUPLO	0	Ø 10,0	4,0	0	4 - 100
KRAUTKRÄMER	SEB4H	DUPLO	0	Ø 10,0	4,0	0	4 - 100
KRAUTKRÄMER	SEB5K F3	DUPLO	0	Ø 10,0	4,0	0	4 - 100
GB	TCSF10-5	DUPLO CRISTAL	0	Ø 10,0	5,0	0	2 - 100
END ARAÚJO	GB5	DUPLO	0	Ø 10,0	5,0	0	0 - 45
KENGED	CD5-10	DUPLO	0	2 (8 x 4)	5,0	15	0 - 100

I.2.6 - Formatos de feixes sônico mais usuais em forjados

Abaixo, como ilustram as figuras I.25, I.26 e I.27, seguem algumas representações dos Feixes Sônicos mais usuais em Forjados. Todos se referem a cabeçotes Normais (não angulares).

A representação ilustrada nas figuras dos feixes sônicos abaixo, por exemplo, 1-20, refere-se frequência 1MHz com diâmetro de 20mm.

Frequência, velocidade e atenuação do som são determinantes para definição dos formatos dos feixes.

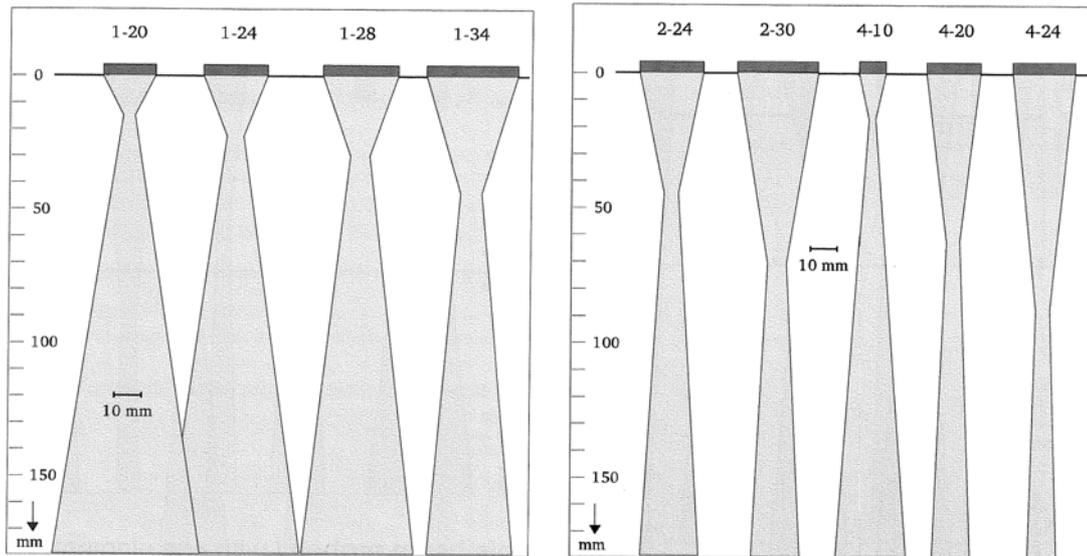


Figura I.25 – Transdutores de 1 a 4 MHz com diâmetros variando entre 20 a 34 mm [17]

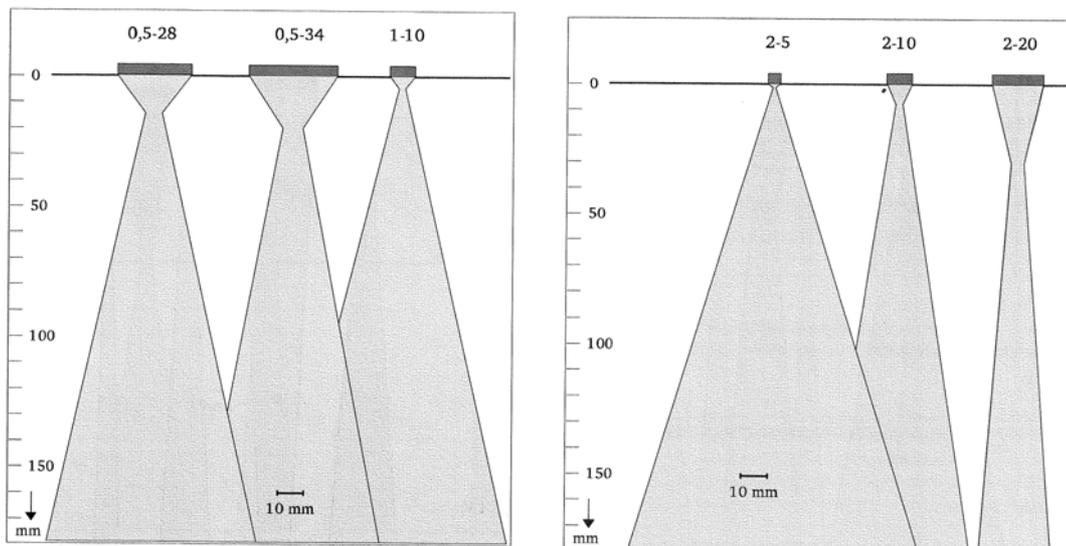


Figura I.26 – Transdutores de 0,5 a 2 MHz com diâmetros variando entre 5 a 34 mm [17]

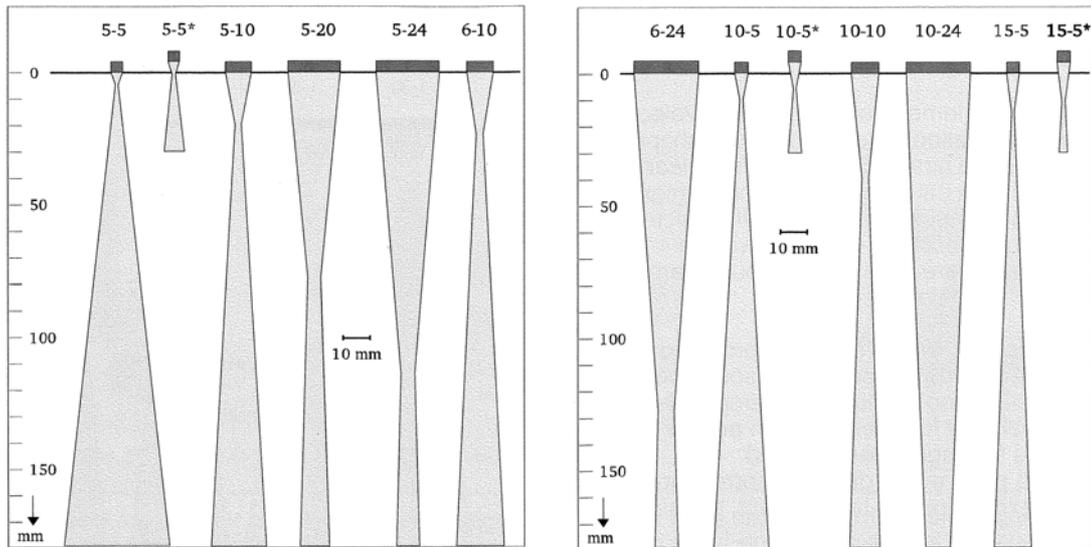


Figura I.27 – Transdutores de 5 a 15 MHz com diâmetros variando entre 5 a 24 mm [17]

I.2.7 - Blocos de referência para uso em forjados

Os Blocos de referência são empregados para calibração da sensibilidade no ensaio de Forjados. Esse método de calibração é denominado método de calibração direta, conforme descrito no item “I.1.8.1 – Análise da amplitude do eco por comparação direta”.

Os Blocos de referência são por definição peças de mesmo material ou mesmo grupo de material, dimensões significativas e forma como as do objeto particular sob ensaio e mesmo tratamento superficial, podendo ou não conter defeitos naturais ou artificiais [10].

Na impossibilidade de se confeccionar os blocos de referência do mesmo material, a opção é fabricar os blocos com material que tenha propriedade de atenuação acústica similar as peças inspecionadas [11].

A figura I.28 apresenta um desenho de fabricação de um bloco de referência para transdutores duplo-cristal.

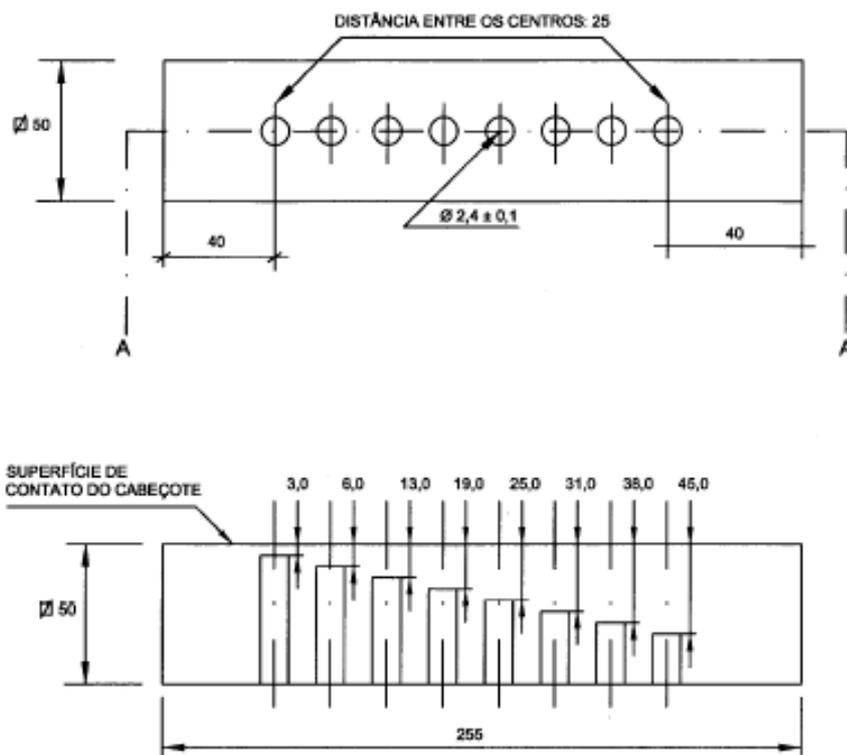


Figura I.28 – Bloco de referência para transdutores duplo cristal [10].

I.2.8 – Técnica de calibração pelo uso do diagrama AVG/DGS

Os diagramas AVG / DGS foram preparados para facilitar a avaliação de uma série de parâmetros de ensaio de ultra-som relacionado ao material, o feixe sônico, o tamanho mínimo da descontinuidade detectável por um determinado transdutor e outros [2].

Esse método foi desenvolvido para determinar os tamanhos das descontinuidades por comparação com o eco de fundo produzido pelo material a ser testado por ultra-som. [12].

A amplitude do eco obtido da descontinuidade a avaliar é expressa em termos de diâmetro do DPR (Disco Plano Refletor) ou em termos de excesso de amplitude, em dB (decibél), em relação ao critério de aceitação pré-estabelecido [15].

A comparação do sinal é feita com o auxílio de diagramas que correlacionam a distância e tamanho de discos planos refletor com a variação de ganho e com o eco de fundo da parede oposta [15].

Uma aplicação interessante do diagrama AVG é a determinação da atenuação sônica do material. Frequentemente é requerido a determinação da atenuação sônica de um material para comparar com o critério da qualidade requerido, principalmente em forjados, fundidos nas mais variadas aplicações.

Os diagramas AVG / DGS apresentam no eixo das abscissas o caminho sônico desde o transdutor até o refletor e no eixo das ordenadas a variação relativa no ganho. Cada uma das curvas apresenta refletividade relativa de discos planos refletores de diversos diâmetros. Também a curva referente ao eco de fundo (∞) é apresentada no diagrama.[15].

As curvas traçadas consideram um meio de propagação ideal, com atenuação sônica nula. Para o caso de materiais com elevada atenuação sônica, isto pode ser considerado da introdução de correções apropriadas [15].

É importante salientar que o ganho apresentado no eixo das ordenadas é relativo, e não tem nenhuma relação direta imediata com o ganho lido no potenciômetro do aparelho de ultrassom [15].

Na figura I.29 apresenta-se um diagrama AVG/DGS típico, referente a um transdutor normal do tipo B2S-N-0°.

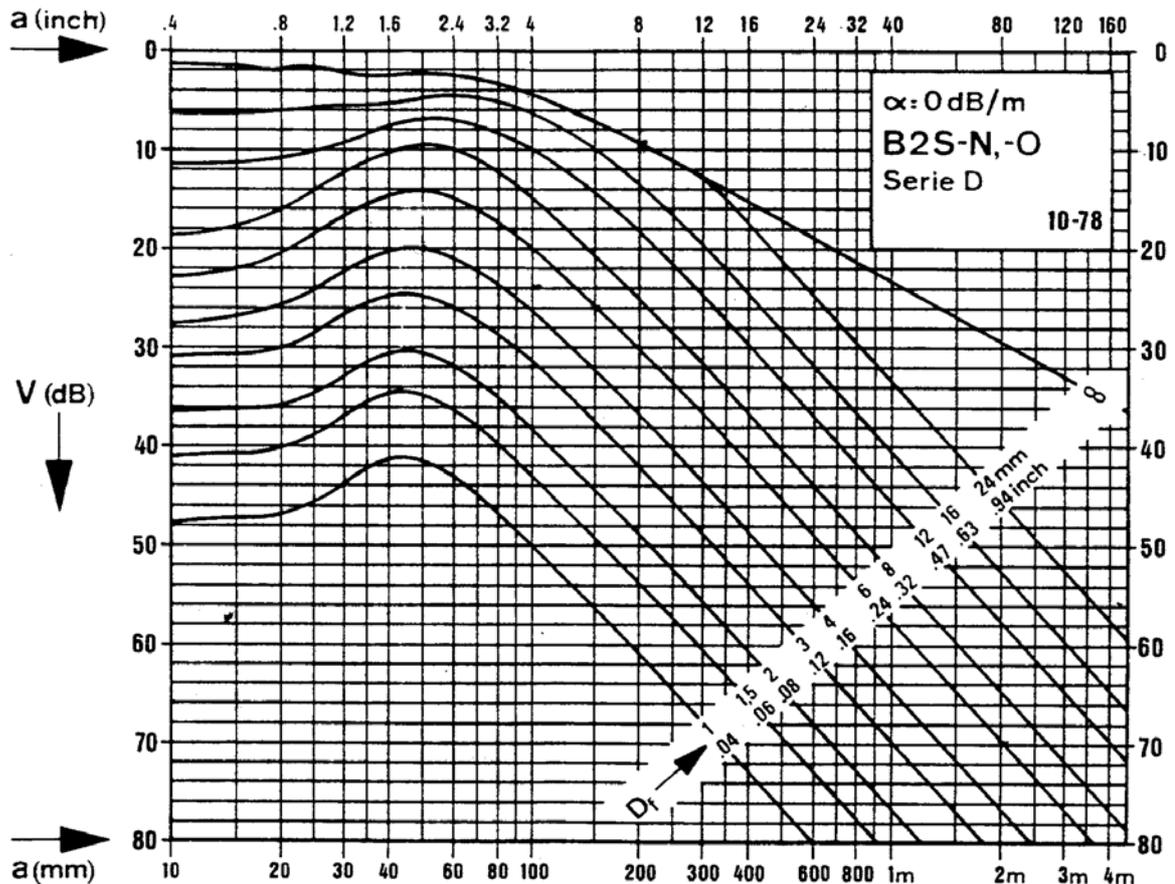


Figura I.29 – Diagrama AVG / DGS referente ao transdutor B2 S-N – 0° [2]

I.2.8.1 – Utilização do diagrama AVG/DGS

O percurso sônico no interior da peça será igual a duas vezes a espessura desta equivalente a 200 mm. O 1º eco de fundo deve ser ajustado para uma altura de 80% da tela. Sem alterar o controle de ganho do aparelho de ultra-som, é feita a leitura da diferença de altura entre o 1º eco de fundo e o 2º eco de fundo. No exemplo da figura I.30 é de 8 dB. [2].

No diagrama AVG/DGS é feita a leitura correspondente a queda da intensidade sônica com a distância percorrida devido à divergência, no diagrama é lido sobre a curva do eco de fundo para 200 mm e 400 mm resultando em -6dB. Portanto a atenuação será igual a 8 dB - 6dB / 200 mm, ou seja 0,01 dB/mm para freqüência de 2 MHz. [2].

A figura I.30 ilustra a determinação do tamanho do refletor equivalente no diagrama AVG/DGS.

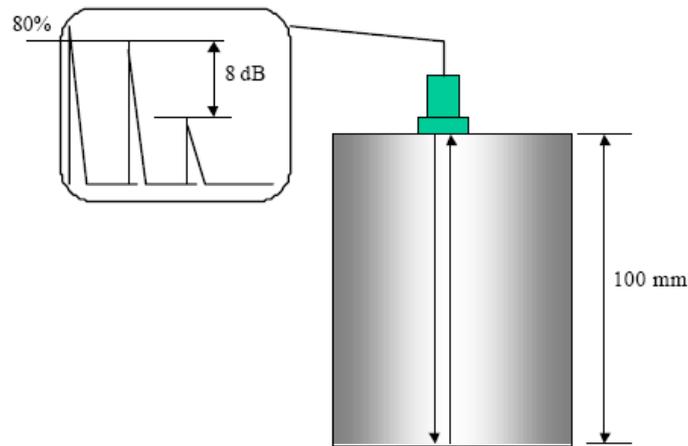
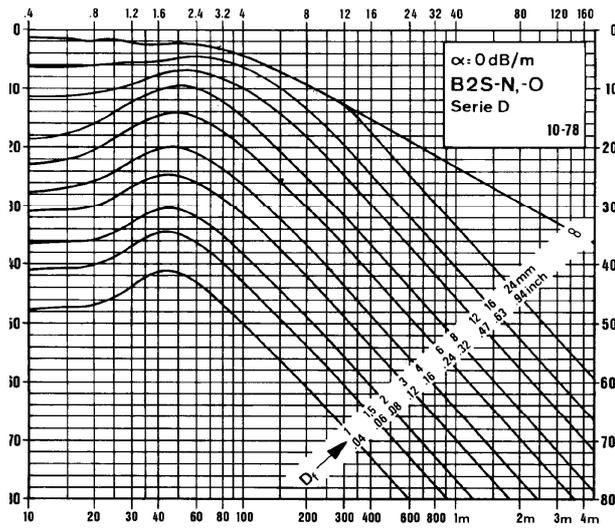


Figura I.30 – Determinação do tamanho do refletor equivalente no diagrama AVG / DGS [15]

I.2.8.2 – Diagrama AVG / DGS para transdutores específicos

Os diagramas são elaborados especificamente para um determinado transdutor e em geral para ensaio em aços. As diversas curvas correspondem diferentemente a diâmetros de discos planos refletores. Alguns diagramas apresentam ainda qual a correção do bloco de calibração a ser adotado. A atenuação sônica é considerada nula na construção desses diagramas, sendo assim, materiais de atenuação sônica elevadas (maior que 40 dB/m) devem sofrer correções.[15].

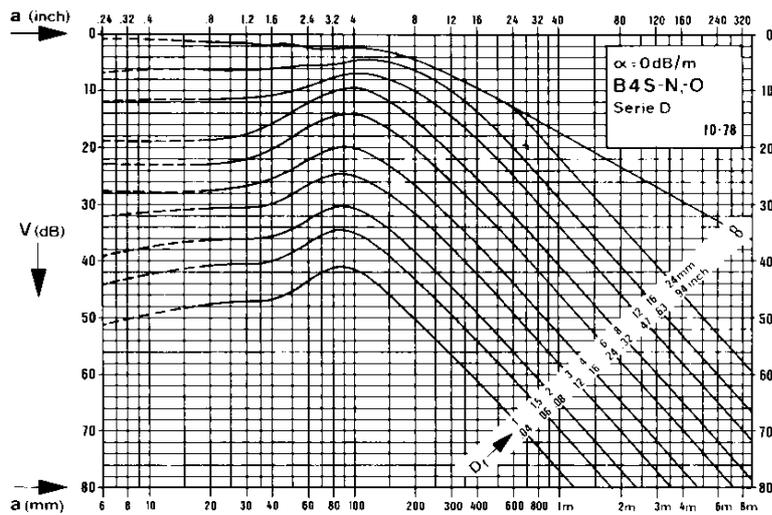
Nas figuras I.31 e I.32 abaixo, apresentam-se exemplos de curvas AVG / DGS utilizadas para os respectivos transdutores:



Modsonic M2 SN

End Araujo GB2

Figura I.31 – Curva AVG / DGS. Para transdutor Normal B2-SN [15]



Modsonic M4SN

Figura I.32 – Curva AVG / DGS. Para transdutor Normal M4SN [15]

I.3 – Confiabilidade dos ensaios não-destrutivos

Os Ensaio Não destrutivos, apesar das importantes contribuições que tem dado as avaliações da integridade e segurança de componentes e estruturas soldadas fornecendo informações sobre eventuais descontinuidades presentes, como qualquer outra técnica de detecção não é perfeito, vários são os fatores que podem interferir nesses laudos, colocando assim em risco os sistemas avaliados.

No início da década de 70 iniciou-se estudos de confiabilidade das técnicas de inspeção através dos END's. Permitiu-se, a partir do conhecimento e quantificação dessa confiabilidade, avaliar a importância e o valor a serem atribuídos aos métodos de inspeção, melhorando assim sua confiabilidade [7].

A interpretação da resposta pode ser influenciada pela capacidade de interpretação (manual ou automática), a acuidade visual do inspetor quando influenciado por fadiga ou panorama emocional, a facilidade de acesso e o ambiente de inspeção. Todos esses fatores contribuem para incerteza nas inspeções e conduzem para uma caracterização probabilística da capacidade da inspeção. [8].

O Ensaio Não Destrutivo tipo ultra-som visa aumentar a confiabilidade de diferentes equipamentos e componentes através da detecção de falhas e defeitos neles existentes, caracterizados pelo próprio processo de fabricação das peças ou componentes a serem examinados como, por exemplo: bolsa de gás em fundidos, dupla laminação em laminados, micro trincas em forjados, escórias em uniões soldadas e muitas outras. O objetivo último dos Ensaio Não Destrutivos pode ser expresso como sendo a detecção, localização e dimensionamento de descontinuidades. É importante notar que esse tipo de ensaio requer conhecimento teórico e experiência prática por parte dos profissionais envolvidos [3].

Estima-se que o fator humano contribui ao 50-80% dos acidentes tecnológicos devido a falhas durante o desenho de equipamentos, a calibração, execução e/ ou interpretação de procedimentos orais ou escritos, fatores organizacionais e, ainda, outras falhas humanas.

Estudos realizados mostram que a taxa relativa de detecção de descontinuidades durante a inspeção é de aproximadamente 50% [13].

Foi identificado que o fator humano como um dos elementos principais que afetam a confiabilidade dos Ensaios Não Destrutivos, ele representa o estado físico e mental, a experiência e o treinamento do pessoal, assim como as condições sob as quais o pessoal pode operar e ter influência na habilidade do Sistema END [1].

Ainda sobre o fator humano, embora seja conhecida uma ampla gama de enfoques e pesquisas sobre confiabilidade dos Ensaios Não Destrutivos (END) tais como Program for inspection of Steel Components (PISC), Performance Demonstration Initiative (PDI), European Network for Inspection Qualification (ENIQ), Engine Titanium Consortium (ECT) e NORDTEST; não existe uma verdade absoluta sobre a determinação da confiabilidade dos ensaios de ultra som nem sobre a metodologia para avaliação da confiabilidade humana. Fatores tais como longas horas de trabalho, ambiente de trabalho, capacidade inerente dos inspetores (treinamento, qualificação, experiência), sistemas de inspeção aplicado, procedimento e outros têm determinada influência na confiabilidade do END [1].

I.3.1 – Método POD para quantificar a confiabilidade em END's

O método mais utilizado para quantificar a confiabilidade e sensibilidade de uma técnica de ensaio não destrutivo é a sua de probabilidade de detecção, POD (do inglês probability of detection). A curva POD sintetiza uma metodologia para estimar a capacidade de um método de inspeção em função da dimensão da descontinuidade, ou seja, a curva POD mostra a probabilidade da detecção de um defeito como uma função da sua dimensão para uma técnica de inspeção específica. Para uma técnica ideal, a POD para defeitos menores que um tamanho crítico é zero, enquanto a POD para alguns defeito maior que este tamanho é um de (100%). No caso ideal, não existirá nem falsa rejeição de partes boas nem falso aceite em partes defeituosas. Contudo, curvas POD para técnicas de ensaio reais, nunca são tão discriminatórias como a curva ideal, e como resultado existirão regiões de incertezas com falso aceite [6]. Na figura I.33 apresenta-se uma curva POD para a técnica de inspeção real e ideal.

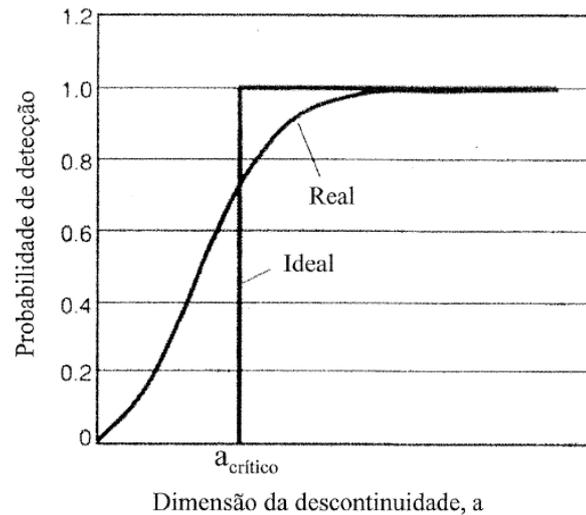


Figura I.33 – Curva POD para técnica de inspeção real e ideal [6]

I.3.2 - Aplicação das curvas POD

Até recentemente, todas as aplicações de POD eram essencialmente empíricas, isto é, um número de amostras eram preparadas com defeitos artificiais e então experimentos eram realizados por um determinado número de operadores para avaliar uma técnica de ensaio. Para levantamento de curvas POD o conjunto de amostras deve possuir defeitos dimensões, tipo e localizações conhecidas e deve ser grande o suficiente para reproduzir o mais próximo possível as condições reais de operação. No entanto, para produzir um espaço amostral estatisticamente significativo que simule adequadamente as condições prováveis de serem encontradas em aplicações reais, os ensaios podem exigir um conjunto de amostras suficientemente grande que torne o processo inviável ou o custo da operação pode ser tão elevado que seja impraticável [28].

Nos últimos anos, com o advento da modelagem computacional, a POD pôde ser calculada utilizando-se essa tecnologia, uma curva POD pode agora ser simulada para um conjunto específico de condições e verificada com poucas amostras experimentais com custo relativamente baixo e com a capacidade de estender o diagnóstico para outras condições de inspeção. A vantagem de usar modelos é que o estudo do desempenho das variáveis que influenciam no processo de inspeção pode ser realizado com relativa facilidade e baixo custo.

Normalmente ensaios são realizados variando-se um parâmetro (tais como posição ou geometria do defeito) para obter estimativas consistentes de seu efeito na POD. A modelagem matemática permite, então, uma considerada otimização do processo de inspeção [29].

A confiabilidade da inspeção de ultra-sônica depende de vários fatores. Os mais importantes são: tipo, tamanho e orientação do defeito, morfologia do defeito, localização da descontinuidade, tipo de material inspecionado, restrições geométricas (inacessibilidade) da inspeção, fatores humanos, equipamento e procedimento de inspeção e condições ambientais no trabalho da inspeção [30 -31].

Segundo a análise de Forsyth *et al.* [32], a POD de uma trinca de dimensões características “a” é definida pela probabilidade de detecção média de todas as trincas de dimensão “a”. Esta definição reflete o fato de que a detectabilidade de trincas varia com um determinado numero de fatores. Portanto, a curva POD mostrada na figura I.34 a seguir, é traçada a partir da POD média para cada dimensão de trinca, e o nível de confiança associado com a curva foi calculada usando uma população amostral finita. O comprimento da descontinuidade é a característica normalmente mais usada para relações de POD, mas outras medidas podem também ser utilizadas [32].

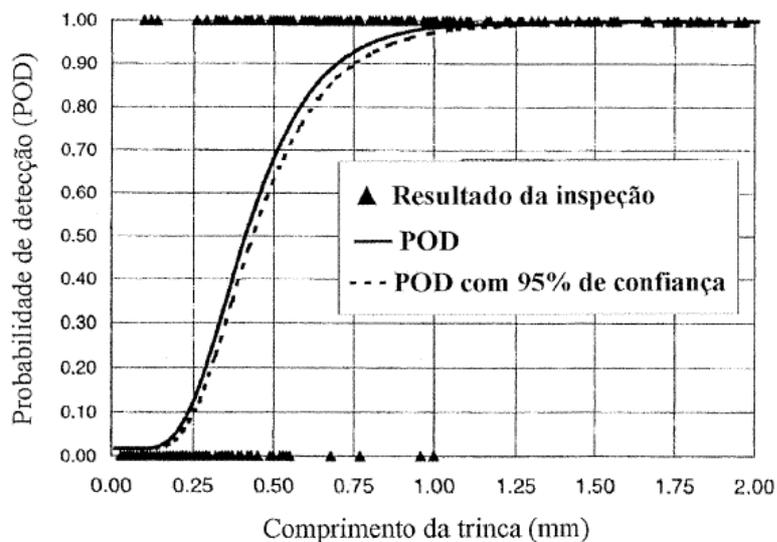


Figura I.34 – Curva POD para inspeção de trincas em chapas [6]

Diversos modelos estatísticos têm sido propostos para estimar a curva POD.

Estes modelos utilizam dados obtidos através da análise em Ensaios Não destrutivos: análise “ \hat{a} ” versus “ a ” e análise acerto/erro (do inglês *hit/miss*). Alguns procedimentos de ensaios não destrutivos produzem uma resposta “ \hat{a} ” do sinal, que está relacionada com a dimensão final “ a ” da descontinuidade, se a descontinuidade é detectada. No entanto, muitos métodos de inspeção não dão informações da dimensão do defeito e o resultado da inspeção é registrado apenas em função da detecção ou não detecção do defeito. Por ser mais simples a análise hit/miss é a mais usual [8]. Portanto, enquanto a análise hit/miss produz um resultado de saída “defeito” ou “não defeito”, a análise “ \hat{a} ” versus “ a ” produz uma saída escalar que é função da dimensão da descontinuidade. Ambos os métodos podem ser usados para o desenvolvimento da curva POD, mas diferentes resultados serão obtidos se os dois métodos de análise são aplicados para o mesmo conjunto de dados [8].

A figura I.35 apresenta um esquema que representa a filosofia do modelo “ \hat{a} ” versus “ a ” para a determinação POD.

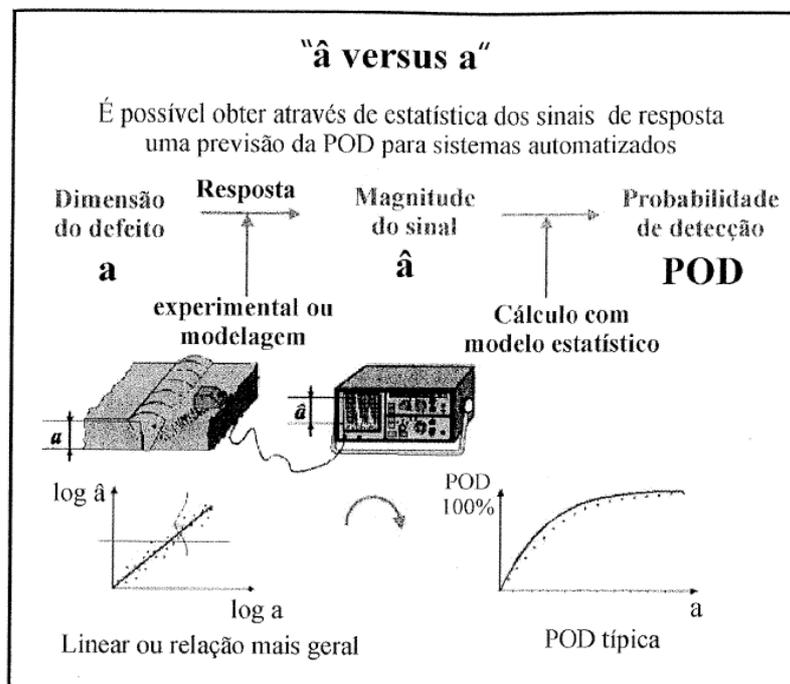


Figura I.35 – Esquema da filosofia do método “ \hat{a} ” versus “ a ” para a determinação da POD [33]

Também na figura I.35 acima, pode-se observar um corpo de prova com um defeito de dimensão “a”, que através do ensaio experimental produzirá como resultado no aparelho de ultra som um sinal de magnitude “â”, que é função da dimensão real “a” do defeito. A partir da equação ajustada “â” em função de “a” e do erro observado neste ajuste é possível se estabelecer a curva POD [6].

A tarefa de inspeção executada pelo operador é geralmente uma tarefa difícil e pode ser dividido em dois passos:

- Detectar defeitos presentes ou detectar defeitos presentes que apresentam uma determinada dimensão ou ainda determinar um tipo específico de defeito;
- Confirmar se componentes livres de defeitos realmente não possuem defeitos ou confirmar se defeitos iguais ou maiores que uma determinada dimensão não estão presentes ou ainda confirmar se defeitos de um determinado tipo não estão presentes [6].

A figura I.36 a seguir apresenta uma ilustração típica de uma tarefa de inspeção, onde um corpo de prova contendo descontinuidades reais é dividido em seções e ensaiado por uma técnica de ensaio não destrutivo. Os resultados da inspeção, tipo de defeito e grau de importância (criticidade), são registrados no relatório de inspeção.

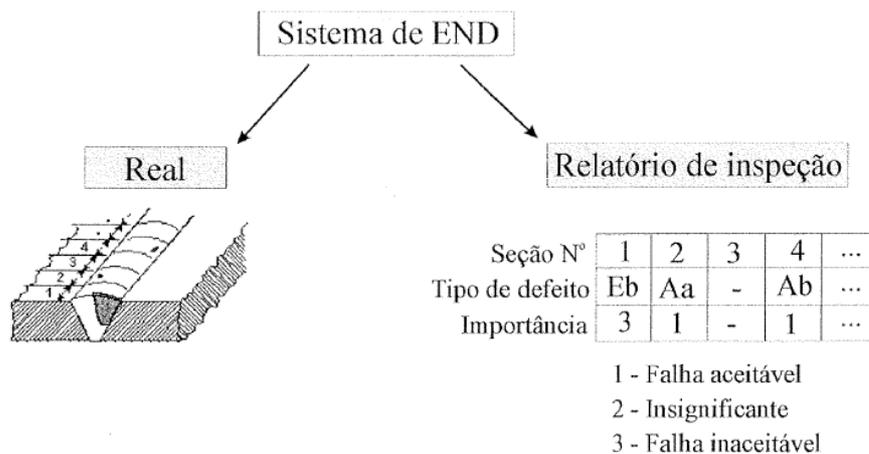


Figura I.36 – Ilustração típica de uma tarefa de inspeção [6]

Baseado nos ensaios experimentais registrados no relatório de inspeção (ver figura I.36), a confiabilidade do ensaio pode ser avaliada através da probabilidade de defeitos (POD), para dados obtidos pelo método “â” versus “a” ou pelo método hit/mis, utilizando uma modelagem matemática [6].

Assumindo que a resposta de END pode ser quantificada e registrada em termos de um parâmetro “â” , que é relacionado com a dimensão da descontinuidade, então “â” resume a informação para determinar se uma positiva indicação do defeito será obtida [6].

Em qualquer procedimento de inspeção, se a amplitude do sinal de um defeito está abaixo de um limiar de registro, o defeito não será detectado. Inversamente, suprimindo erros humanos e de equipamento, qualquer sinal acima deste limiar será registrado e o defeito será detectado. Entre estes dois sinais extremos está a curva POD [6].

I.4 – Detecção/dimensionamento de descontinuidades através dos ensaios não-destrutivos – estado da técnica

Os END's vêm sendo empregados cada vez mais como método de inspeção para garantir a qualidade e a confiabilidade de produtos e equipamentos. Entre as técnicas de ensaios não destrutivos, o ultra-som é uma das mais difundidas na indústria para a detecção e dimensionamento de descontinuidades em materiais, avaliação de suas propriedades, medição de espessura, etc [19]. No próximo item serão apresentados alguns dos métodos não convencionais (TOFD e phased array) que podem ser utilizados para detectar e dimensionar descontinuidades.

I.4.1 – Ensaio por ultra-som TOFD

Dificuldades encontradas nas inspeções de materiais metálicos por outros métodos, tal como radiografia, na detecção de trincas paralelas ao feixe do raio-X, estão sendo superadas com a utilização da técnica ultra-sônica TOFD (do inglês *Time of Flight Diffraction*) que faz incidir no interior do material um feixe de ultra-som inclinado em relação a superfície de

inspeção. Até então, a detecção e dimensionamento de discontinuidades por técnicas ultra-sônicas utilizavam somente a amplitude do eco obtido e a relacionava diretamente com a dimensão da discontinuidade. A técnica TOFD adequa-se ao processo de automação da inspeção, aliando rapidez, confiabilidade no dimensionamento de pequenas discontinuidades e emissão on-line de relatórios das juntas inspecionadas [20,21].

A figura I.37 apresenta o equipamento utilizado na inspeção do corpo de prova, enquanto a figura I.38 mostra um resultado de uma inspeção em um cordão de solda. A partir dos resultados obtidos pode-se concluir que é possível detectar e dimensionar defeitos de falta de penetração e falta de fusão em cordões de solda utilizando a técnica ultra-sônica TOFD com bastante precisão nos resultados [22].



Figura I.37 – Equipamento utilizado no Ensaio de TOFD [22]

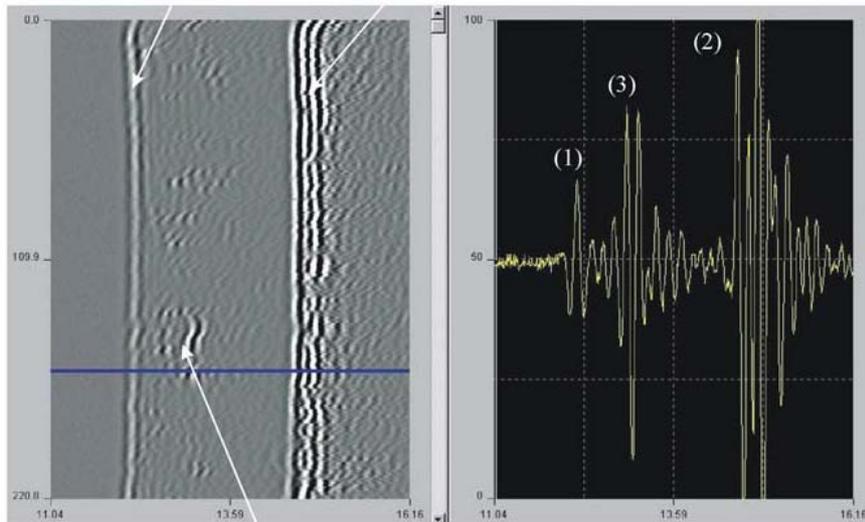


Figura I.38 – Modelo de apresentação de resultado no ensaio TOFD [22]

Quando se introduz, num cordão de solda, um feixe de ondas ultra-sônicas provenientes de um transdutor angular emissor que tem suas reflexões e difrações captadas por outro transdutor angular que atuando apenas como receptor de ondas ultra-sônicas [23].

Na figura I.39, podemos observar como é representado o sinal sônico convertido em elétrico na tela do aparelho de ultra-som, representação esta conhecida como A-scan: o sinal azul é de uma onda que percorre a superfície da chapa (onda lateral), os sinais vermelhos são difrações das pontas superiores e inferior do defeito, respectivamente, e o sinal verde é a reflexão do fundo da chapa [23].

Na figura I.40 podemos observar um sistema completo de inspeção TOFD.

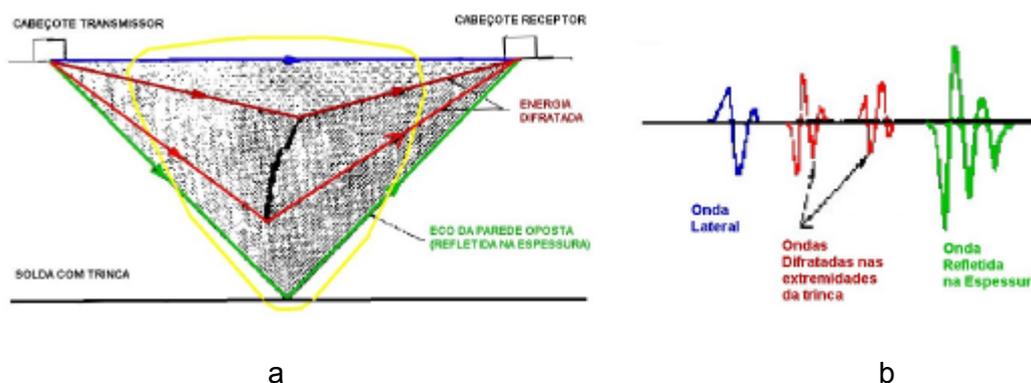


Figura I.39 – Princípios da técnica TOFD na inspeção de solda – “a”- ondas laterais, difratadas (extremo trincas) e refletida. “b”- sinal elétrico na tela do aparelho de ultra-som [23]

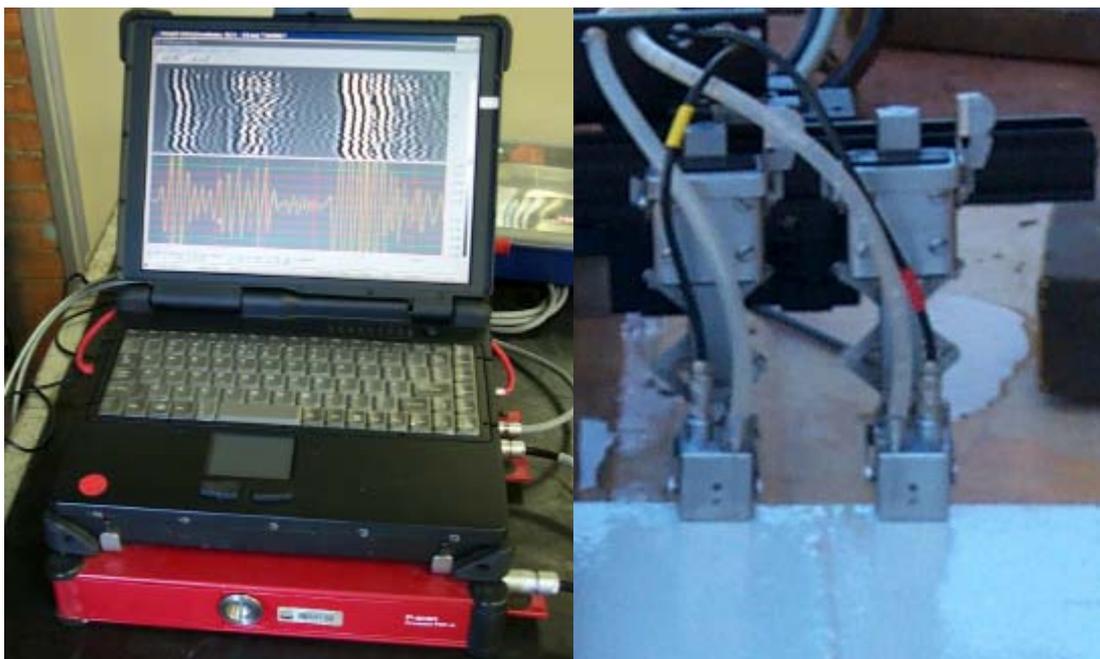


Figura I.40 – Sistema completo de inspeção TOFD [23]

I.4.2 – Ensaio por ultra-som Phased Array

A tecnologia de ultra-som Phased Array vem sendo utilizada desde muitos anos na área médica. A técnica de Phased Array tem a capacidade de modificar as características acústicas de uma sonda ultra-sônica e isso é feito controlando eletronicamente a emissão e recepção dos sinais em cada elemento transdutor de uma sonda com múltiplos transdutores [23].

Os transdutores de ultra-som convencionais apresentam apenas um cristal piezoelétrico enquanto que os transdutores Phased Array apresentam um arranjo de cristais que podem ser excitados individualmente. Da possibilidade de excitação individual dos cristais em tempos diferentes e controlados surge a característica de permitir a inspeção com uma grande variedade de ângulos de inspeção (sweeping). Da mesma forma é possível variar e controlar os pontos focais do feixe na peça [23].

Na figura I.41 podemos observar detalhes do equipamentos envolvidos no sistema de inspeção por ultra-som Phased Array.



Figura I.41 – Sistema de inspeção Phased Array. [23].

Podemos citar entre algumas das vantagens e desvantagens do uso do ultra-som Phased Array como sendo: [24].

Vantagens:

- Inspeções rápidas (Imagem da região de interesse, tecnologia de fácil aprendizado, menores requisitos no posicionamento do transdutor.);
- Inspeções melhores (Utiliza mais ângulos, alta resolução espacial, relatórios mais completo.);
- Inspeções mais seguras (Utilização de mais ângulos, fácil para o operador se concentrar, menor fator humano na interpretação dos resultados.)

Desvantagens:

- Equipamentos e transdutores mais caros e mais complexos;
- Alto custo de manutenção;
- Pouca menção nas normas e códigos internacionais;
- Sistemática de qualificação ainda não implementada no Brasil.

A figura I.42 abaixo ilustra a representação do feixe sônico gerado no ultra-som Phased Array.

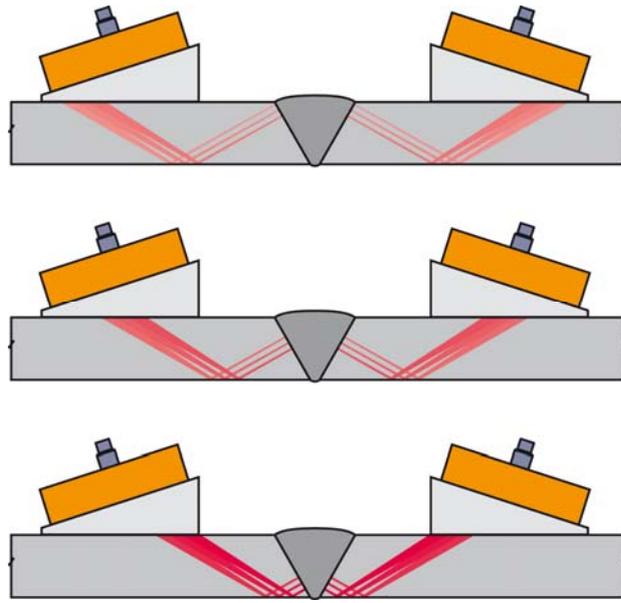


Figura I.42 – Representação feixe sônico no Phased Array. [23].

CAPÍTULO II - MATERIAIS E MÉTODOS

II.1 - Definição dos corpos de prova

II.1.1 – Material de base

Os corpos de prova foram usinados a partir de aço baixa liga AISI 8630 adquirido pela empresa paulista SCHMOLZ + BICKENBACH DO BRASIL IND. E COM. AÇOS LTDA, oriundo da forjaria Italiana SOREL. Certificados por ambas as empresas através da documentação do anexo 1.

A opção pela escolha do aço AISI 8630, deu-se em função de sua ampla utilização na indústria do Petróleo, especialmente para a fabricação de Blocos Forjados que exigem alta resistência, conjugando boa aplicação para serviços com presença de H₂S e trabalho em baixas temperaturas [37].

O aço AISI 8630 é classificado como um aço baixa liga para construção mecânica, segundo o sistema de classificação da Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT (NBR NM 87), que é basicamente a mesma utilizada pelo *American Iron and Steel Institute* – AISI [37].

Assim o aço AISI 8630, é um aço da família 86, isto é, com 0,55 de Ni, 0,50 a 0,60 de Cr e 0,20 de Mo. O teor de carbono é dado pelo centésimo de porcentagem, ou seja, 30 quer dizer 0,30% de teor de carbono [37].

Conforme o Sistema estabelecido pelo *Unified Numbering System* – UNS, o aço AISI 8630 pode também ser associado a outras nomenclaturas, tais como, ASTM A29, ASTM A322, SAE J404, SAE J412, entre outras [38].

II.1.2 – Dimensões e formatos dos corpos de prova

Devido a grande variedade de forma de forjados (barras redondas, quadradas, retangulares, tubular, discos etc.), cada um empregando cabeçotes e varreduras diferentes, foi definido barra com perfil quadrado ou retangular pois é formato mais comum utilizado nas empresas.

Para facilitar a fabricação dos corpos de prova e o manuseio dos mesmos, foram utilizados corpos de prova com dimensões de 150 X 150 mm e espessuras variando entre 60 e 80 mm.

Os corpos de prova foram recebidos já cortados nas dimensões finais aproximadas.

A figura II.1 apresenta foto da matéria prima utilizada para confecção dos CP's na condição de recebimento da usina.

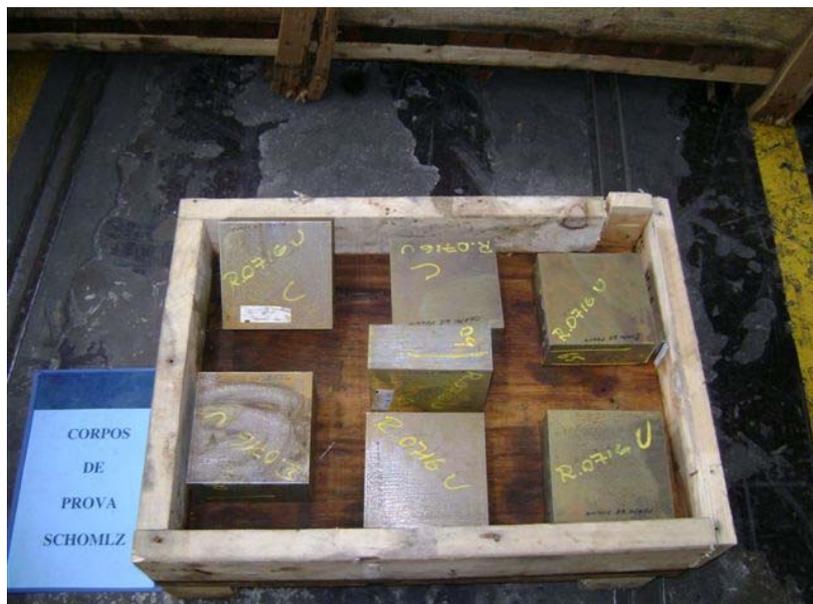


Figura II.1 – Corpos de Prova como recebidos da usina

II.1.3 - Superfície de varredura

As barras com perfis quadrados e retangulares devem ser varridas em duas superfícies perpendiculares, mas como neste estudo serão empregadas descontinuidades usinadas, a

varredura será feita por somente em uma das superfícies e as descontinuidades serão usinadas pela superfície oposta. Caso a varredura fosse feita em duas superfícies perpendiculares um furo de fundo chato em uma superfície poderia ser detectado como um furo cilíndrico pela superfície perpendicular. Para evitar que outras varreduras sejam feitas, bem como o acesso visual dos inspetores aos defeitos, os corpos de prova foram colocados dentro de uma caixa de aço com aproximadamente 1 mm de espessura que será soldada no corpo de prova deixando livre somente o acesso a superfície de varredura.

As figuras II.2 e II.3 apresentam os desenhos esquemáticos dos corpos de prova e as fotos dos CP's já com suas respectivas caixas metálicas.

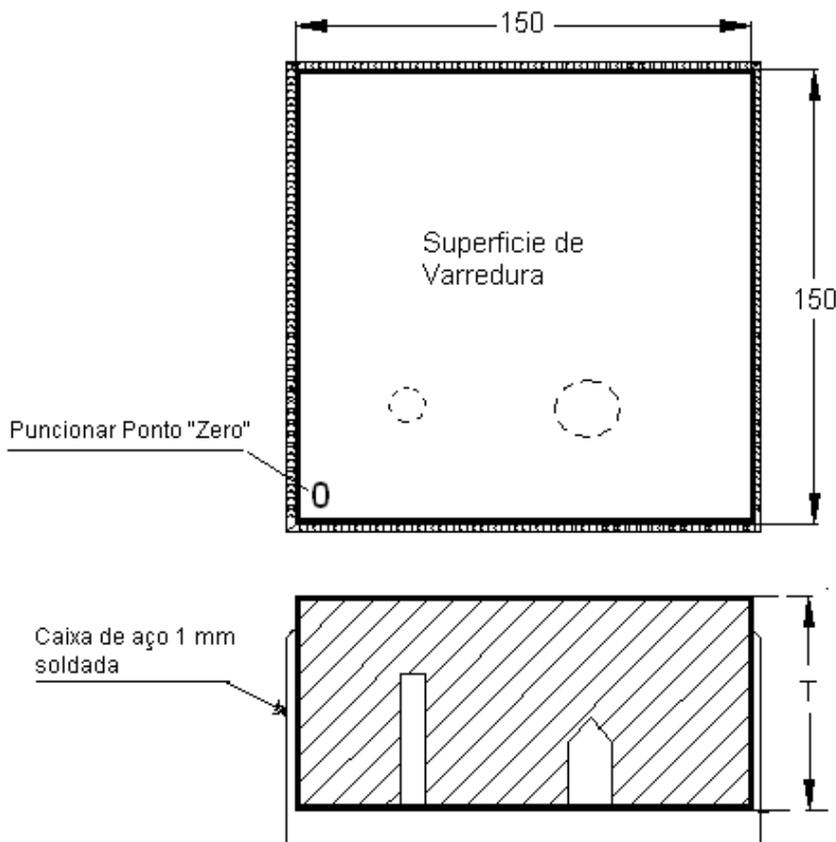


Figura II.2 – Desenho esquemático do Corpo de Prova



Figura II.3 – Fotos dos CP's encapsulados em caixa metálica

II.1.4 - Descontinuidades a serem usinadas nos corpos de prova

Para simular os eventuais defeitos que poderão ser detectados pelo ensaio de ultra som em forjados, serão usinados, pela superfície oposta à de varredura, furos com brocas de variados diâmetros dois tipos de descontinuidades, furos de fundo chato e furos de fundo cônico.

II.1.4.1 - Furos de fundo chato

Simulando as descontinuidades mais comuns que ocorrem em forjados (descontinuidades planas paralelas à superfície de varredura).

Estas descontinuidades produzem boa refletividade, e o inspetor pode dimensioná-las e determinar sua profundidade em relação a superfície de varredura.

Estes furos foram usinados com diâmetros variando entre 2 e 6 mm em diversas profundidades.

A figura II.4 apresenta o desenho esquemático do CP com furo de fundo chato.

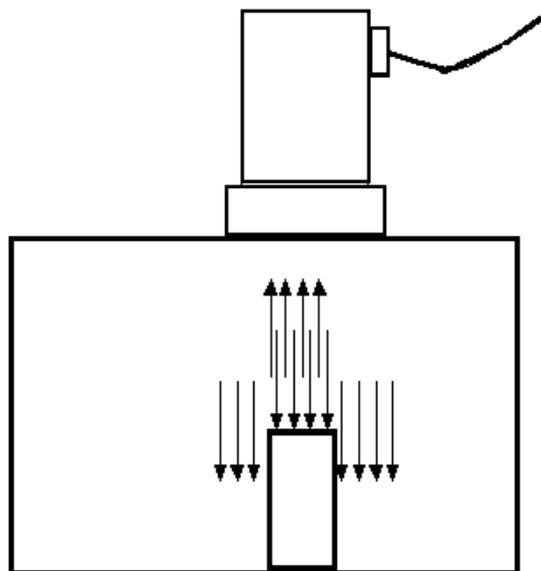


Figura II.4 – Desenho esquemático do CP – Furo Plano

II.1.4.2 - Furos de fundo cônico

Simulando as descontinuidades que não estão paralelas à superfície de varredura ou que provoquem a dispersão do feixe sônico.

Estas descontinuidades não produzem boa refletividade, ocorre somente uma diminuição do eco de fundo. Presume-se que nesse caso o inspetor não pode determinar com a devida precisão as dimensões e a profundidade das indicações, indicando somente a área em que ela ocorre.

Estes furos foram usinados com diâmetros variando entre 6 e 17 mm em diversas profundidades.

A figura II.5 apresenta o desenho esquemático do CP com furo de fundo cônico.

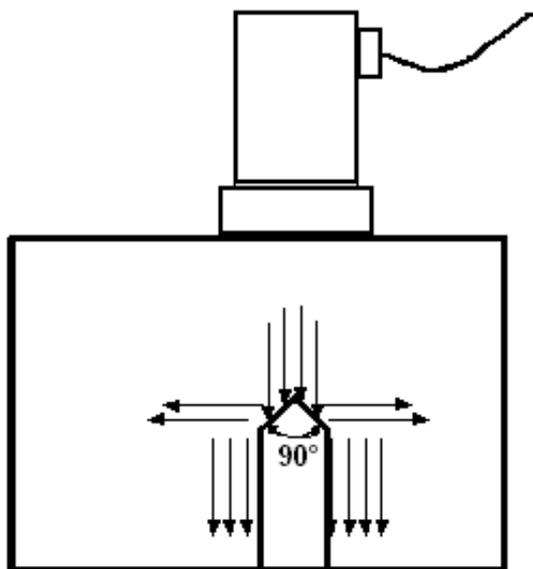


Figura II.5 – Desenhos esquemáticos do CP – Furo Cônico

II.1.5 - Posicionamento das discontinuidades nos Corpos de Prova

Foram fabricados 5 corpos de prova com as seguintes discontinuidades:

- 2 corpos de prova com 03 furos de fundo chato.
- 2 corpos de prova com 03 furos de fundo cônico.
- 1 corpo de prova com 03 furos de fundo chato e 03 furos de fundo cônico.

Os desenhos de fabricação dos CP's usinados encontram-se no Anexo 2.

Observar que a profundidade dos furos é em relação a superfície de usinagem, como a varredura será feita pela superfície oposta, o inspetor irá detectar a diferença entre a espessura do bloco e a profundidade do furo. Chamaremos essa profundidade como “profundidade de inspeção”.

A figura II.6 ilustra a representação das coordenadas e do ponto zero definidos nos CP's.

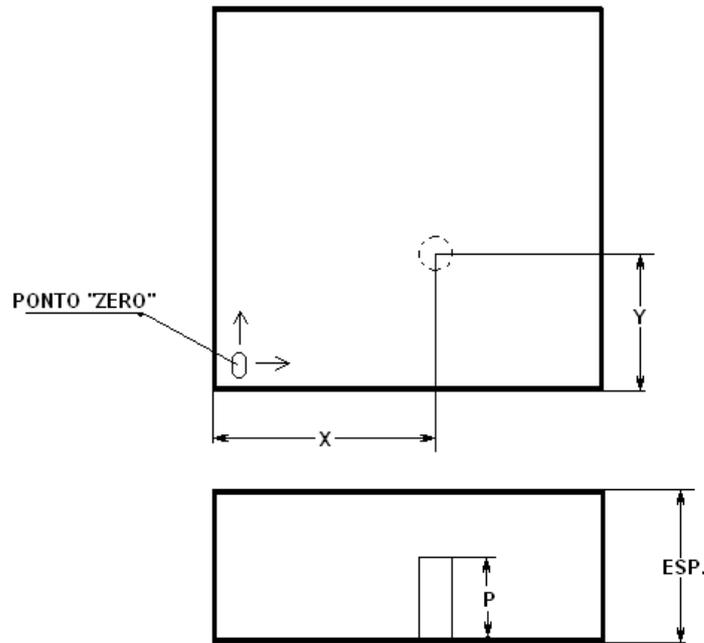


Figura II. 6 – Representações das coordenadas e ponto zero nos CP's

II.2 – Execução do ensaio de ultra-som na matéria-prima

O material forjado que foi empregado para fabricação dos corpos de prova foi submetido a ensaio por ultra-som antes da usinagem, conforme procedimento FMC 3512 Revisão 13, utilizando o equipamento USK-7 tipo pulso-eco, aplicando-se dois transdutores marca Krautkramer, um normal (MB 4 SN) de 4 MHz de frequência e outro duplo cristal (MSEB 4 H) também de fabricação da Krautkramer com a mesma frequência de 4 MHz.

A varredura deu-se pelas duas superfícies, pela superfície que será a de varredura do corpo de prova e por uma superfície perpendicular a ela.

A sensibilidade para este ensaio foi ajustada para que o nível de ruído fique a 10% da altura da tela, sendo considerada rejeitada qualquer região que apresente indicação que supere 50% da altura da tela.

Os resultados foram plenamente satisfatórios, sendo todos os Corpos de Prova aprovados pelo inspetor de ultra-som.

O objetivo desse ensaio foi o de garantir que não havia nenhuma espécie de descontinuidade, garantindo assim a completa sanidade interna da matéria prima antes da fabricação dos defeitos pelo processo de usinagem por brocas.

Os ensaios foram realizados por profissional qualificado de acordo com o Sistema Nacional de Certificação e Qualificação – SNQC, no nível US-N2-S5.

A figura II.7 apresenta fotos da execução do ensaio por ultra-som nas matérias primas recebidas da usina, antes da fabricação dos furos.



Figura II.7 – Ensaio por ultra-som nas matérias-primas

II.3 – Controle dimensional das descontinuidades

Todos os furos produzidos para simular defeitos foram dimensionados após fabricação, em seus diâmetros, profundidades e coordenadas. X e Y. Como instrumento de medição utilizou-se uma máquina Tridimensional de medição por coordenadas (3D), fabricante Mitutoyo, com precisão de 0,0001 mm, devidamente calibrada conforme certificado de calibração CAE – 0265/07 – Anexo 3.

A figura II.8 apresenta fotos da inspeção dimensional realizada nos CP's com os furos já usinados.

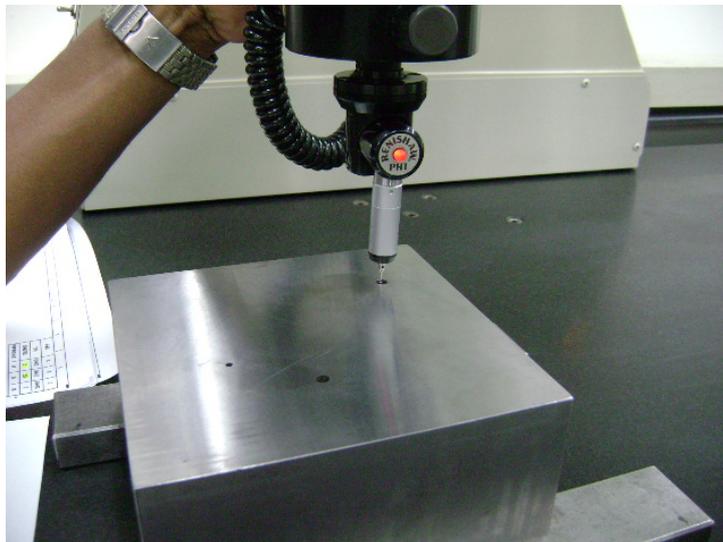


Figura II. 8 – Inspeção dimensional dos CP's em máquina 3D

O Fluxo de atividades abaixo, indicado na figura II.9, resume o ciclo de atividades desenvolvidas desde o recebimento da Matéria Prima até a execução do ensaio por ultra-som nos Corpos de Prova.

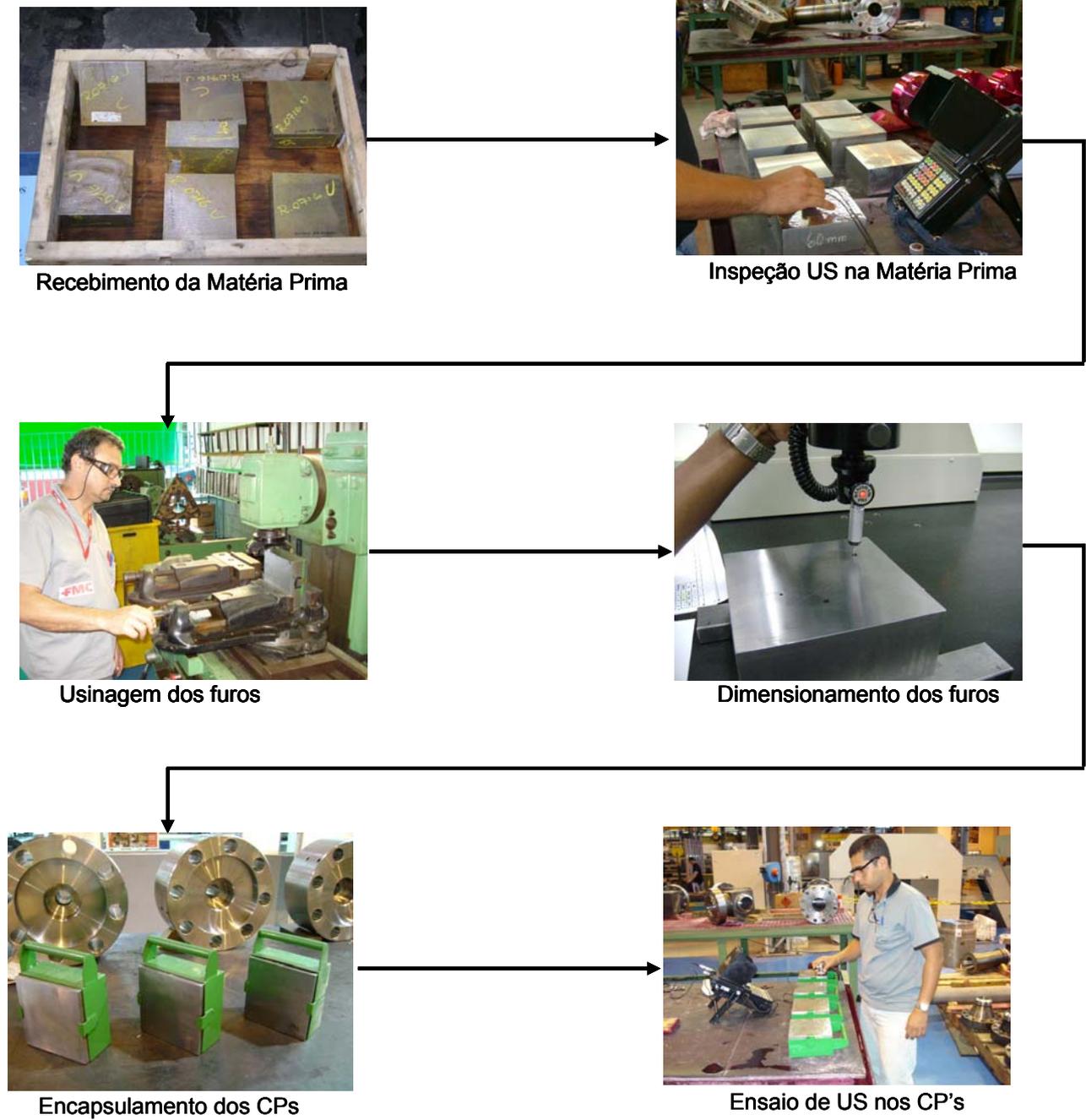


Figura II. 9 – Fluxo resumo das atividades desenvolvidas nos CP's

II.4 - Definição do transdutor utilizado para varredura

Neste trabalho utilizou-se o transdutor duplo-cristal do tipo MSEB4H Série E da Krautkrämer, com frequência de 4MHz, ângulo de incidência de 90 graus, e absorção acústica de 4dB. Neste transdutor as ondas mecânicas têm características longitudinais, com sentido de vibração paralelo ao sentido de propagação das mesmas, para um equipamento no modo A-Scan.

Tabela II.1 - Dados do transdutor utilizado no ensaio por ultra-som

Fabricante	Modelo	Tipo	Dimensões	Frequência
Krautkramer	MSEB 4 H	Duplo - Cristal	Ø 10 mm	4 MHz

II.5 - Definição do equipamento de ultra-som utilizado

Neste trabalho utilizou-se como equipamento de ultra-som o modelo USK-7 - Krautkrämer. Neste equipamento foi realizada a aferição da linearidade vertical e horizontal, pois em caso contrário, pode acarretar erros significativos na medida do máximo valor de amplitude e da profundidade das descontinuidades, respectivamente. Para tal utilizou-se a norma ASME V e os blocos padrões V1 e V2 (figuras I.11 e I.12).

II.6 - Sensibilidade do ensaio

II.6.1 - Seleção do método

Como já dito anteriormente no capítulo I.1.7 (ajuste e sensibilidade do ensaio), podem ser empregados os métodos direto ou indireto para calibração da sensibilidade no ensaio de forjados:

Optou-se pelo método indireto com o uso das curvas AVG/DGS, pelos seguintes motivos:

- É o método mais empregado no ensaio de forjados no Brasil,
- Permite a avaliação das dimensões da descontinuidade quando ela é menor do que o diâmetro do cabeçote,
- Não emprega blocos de referencia (o que diminui custo e prazo para realização deste estudo).

Além dos motivos acima listados, conforme descrito nos objetivos específicos descritos na página 2 desse estudo, também pretende-se avaliar a resolução do dimensionamento das descontinuidades pelo uso do método indireto AVG/DGS.

II.6.2 - Ajuste de sensibilidade para varredura

O ajuste da sensibilidade deve ser feito no próprio corpo de prova que será ensaiado, em uma região sem descontinuidades, o ganho deve ser ajustado para que o primeiro eco de fundo atinja 80% da altura da tela.

Para varredura devem ser adicionados os decibéis necessários para detectar um refletor equivalente a um furo de fundo chato com diâmetro equivalente a 3,0 mm a 80% da tela na espessura do corpo de prova. Este ganho adicional é determinado através da curva AVG/DGS do cabeçote que será empregado no ensaio.

Exemplo: Ensaio de um corpo de prova com espessura de 60 mm, utilizando o cabeçote MB4SN, vamos supor que o primeiro eco de fundo atinge 80% da tela com 20 dB (Figura II.10)

Pela curva AVG do cabeçote MB4SN obtemos a sensibilidade de 8 dB na posição infinito (∞), para distancia de 60 mm, para a mesma distancia o refletor de 3,0 mm atinge 25 dB. A diferença é de 17 dB, portanto o ganho de varredura será de: $20 + 17 = 37$ dB.

Na figura II.10 apresenta-se a curva AVG/DGS para o transdutor MB4SN.

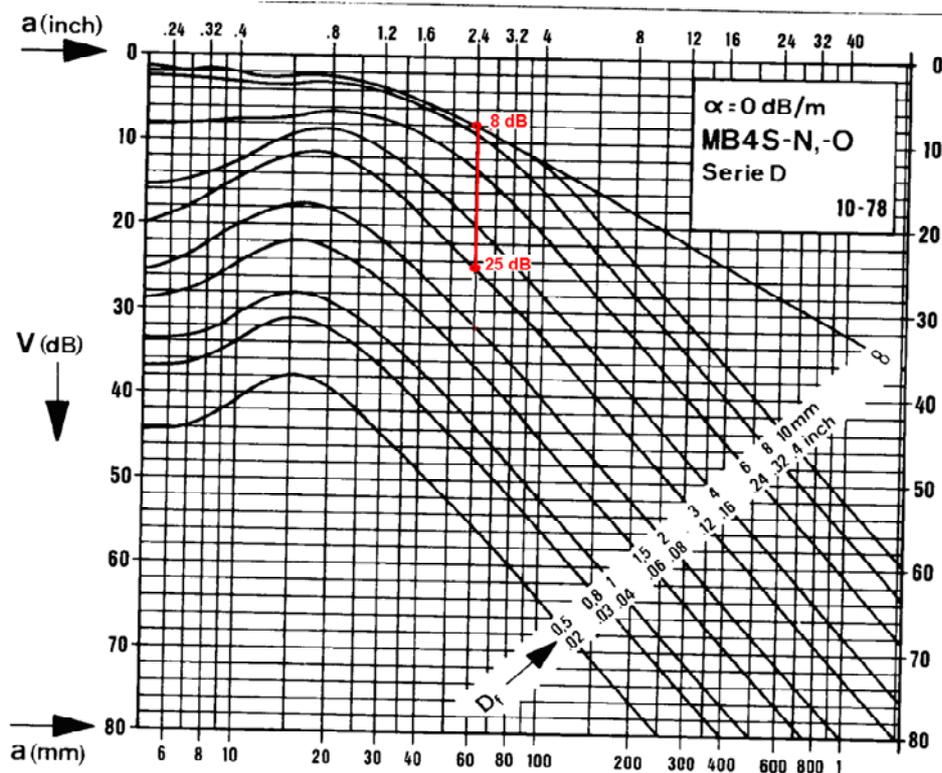


Figura II. 10 – Curva AVG/DGS exemplo para ajuste de sensibilidade

II.6.3 - Estimativa da dimensão das descontinuidades

A dimensão de uma descontinuidade será estimada pela curva AVG/DGS. Quando for detectada uma indicação, o ganho deve ser ajustado para que a indicação atinja 80% da tela, deve ser anotado o ganho e a profundidade da indicação para determinarmos o diâmetro do refletor equivalente.

No exemplo do item II.6.2, foi detectada uma indicação com 40 mm de profundidade que atinge 80% da tela com 26 dB. Na curva AVG do cabeçote MB4SN vamos para o ponto de intersecção da curva infinito (∞) com a distancia de 60 mm, neste ponto descemos pela vertical 6 dB seguimos na vertical até 40 mm e obtemos o diâmetro do refletor equivalente 4,0 mm (Figura II.11).

Os 6 dB é a diferença entre a refletividade do eco de fundo (20 dB) e a refletividade da indicação;

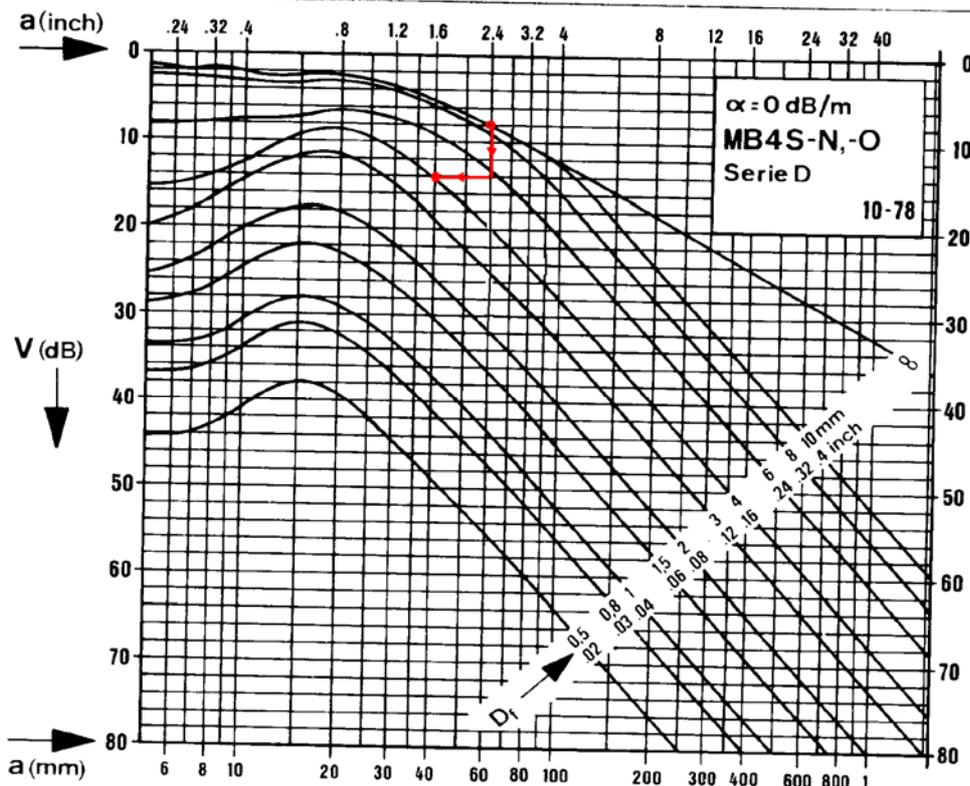


Figura II. 11 – Curva AVG/DGS exemplo para estimativa de dimensão das descontinuidade

II.7 – Critério de aceitação

Na pesquisa bibliográfica foram consultadas as normas ASTM A 388 (Ultrasonic Examination of Heavy Steel Forgings) no seu item 10 “Quality Levels” e a norma Petrobras N-2315 (Execução de Ensaio de Ultra Som em Forjados) no seu item 11.3 (critério de aceitação de Descontinuidades), todas descrevem que o critério de aceitação deve ser estabelecido pela especificação de projeto do forjado. Segundo a norma ASTM A 388 devido a grande variedade de tamanhos, formatos, composições, tipos de processo de fusão e aplicações seria impraticável especificar um critério de qualidade por ultra-som para esses forjados.

Como o objetivo desse estudo não é aprovar ou rejeitar os corpos de prova a partir de suas descontinuidades, e sim utilizá-los como amostras para o dimensionamento dessas descontinuidades, vamos considerar somente o critério de aceitação estabelecido pela norma API (American Petroleum Institute) especificação 6A/ ISO 10453 –Edição 2005, no item 7.4.2.3.15 b – “*ultrasonic examination*”, que admitti para materiais de espessura entre 38 mm

até 150 mm um furo refletor de diâmetro de 3,2 mm. Essa faixa de espessura foi selecionada, também considerando-se as faixas usuais dos Forjados aplicados na empresa FMC Technologies.

II.8 – Realização dos ensaios por ultra-som nos CP's

Realizou-se: Ensaio por ultra-som, método pulso-eco, em 05 Corpos de Prova de aço AISI 8630. Para garantir a imparcialidade na coleta dos dados entre os inspetores, os ensaios foram executados em dias diferentes, utilizando inspetores da empresa Villares Metal, tradicional fornecedor de aços forjados no Brasil, e inspetores da empresa Controltest, empresa prestadora de serviços de inspeção.

Todos os testes foram acompanhados pelo inspetor qualificado Nível III pelo SNQC, Engº Marco Guido ou por mim próprio, a fim de garantir o entendimento e a padronização da condução dos testes por todos os inspetores selecionados para execução do ensaio nos CP's desse estudo.

II.8.1 - Seleção dos inspetores qualificados

Para minimizar a variável mão de obra humana, foram selecionados 04 inspetores qualificados conforme requisitos do Sistema Nacional de Qualificação e Certificação – SNQC (conforme descrito no item I.2.1). A quantidade de inspetores foi definida considerando-se que a média estatística recomendada pode variar entre 03 e 05 o número das amostras que irão compor o estudo de avaliação.

Também devemos considerar as dificuldades de logística que advêm da contratação e disponibilização dos inspetores face ao atual cenário de grande demanda de trabalho por parte desses profissionais qualificados.

II.8.2 – Custos envolvidos nos testes de US nos corpos de prova

Considerando que no ensaio por ultra-som temos as fases de:

- Avaliação das condições de Ensaio estabelecidos por esse estudo;
- Familiarização do inspetor com os Corpos de Prova;
- Inspeção por ultra-som nos Corpos de Prova;
- Avaliação e estudo das indicações;
- Preenchimento dos relatórios de inspeção.

Em média todas essas fases consumiram em torno de 2h por CP ensaiado, ou seja, foram consumidas 10h para execução do jogo de 05 CP's, o que multiplicado pelos 4 inspetores perfazem um total de 50h considerando a execução do ensaio pelos 4 inspetores. Com as 50h de ensaio a um valor de R\$ 60,00 a hora, teremos um total de R\$ 3.000,00 gastos somente em inspeção por ultra-som.

Entre a aquisição da matéria prima, usinagem dos corpos de prova, inspeção dimensional e transporte dos corpos de prova para São Paulo, estima-se um custo aproximado de R\$ 10.000,00, perfazendo assim um total estimado em R\$ 13.000,00.

Não foram consideradas as horas gastas nas eventuais repetições de ensaios, o que ocorreu para alguns inspetores.

II.9 – Metodologia de análise dos resultados do ensaio por ultra-som

II.9.1 - Definições:

Valor real médio

Foram feitas três medições em máquina tridimensional, modelo BRT-M170 de fabricação da Mitutoyo, ilustrado na figura II. 8, com resolução de 0,001 mm, com o objetivo de considerá-lo como o valor verdadeiro da grandeza física medida. Os valores adotados para expressar esta variável foi somente a média aritmética.

Valor medido médio

Neste caso também foram feitas três medições por cada um dos inspetores, com resolução de 0,1 mm, ou seja, com uma ordem de grandeza menor que o valor verdadeiro. Os valores adotados para esta variável foi a média aritmética e o desvio – padrão.

Os casos foram divididos com o seguinte critério:

- Caso 1 – Corpo de Prova (CP) com Furo de fundo Chato.
- Caso 2 – Corpo de Prova (CP) com Furo de fundo Cônico.

Para cada um dos casos citados foram utilizados quatro operadores, denominados de OP1, OP2, OP3 e OP4, sendo todos certificados e qualificados pelo Sistema Nacional de Qualificação e Certificação - SNQC. Para ambos os casos foram calculados um valor médio da medição dos operadores, conforme expressão (1)

$$X = \sum_{n=1}^{n=4} \frac{X_n}{n} \quad (1)$$

Em todos os casos foram calculados os desvios-padrões dos operadores, conforme expressão (2)

$$\sigma = \left[\sum_{n=1}^{n=4} \frac{(X - X_n)^2}{n-1} \right]^{1/2} \quad (2)$$

Onde:

X – Valor médio calculado (mm)

X_n – Valores individuais medidos (mm)

n – número de medições realizadas

σ - Desvio padrão

Foi utilizado o programa Mathcad 14 para compilação dos dados e arranjos em formato vetorial, FERREIRA et al (2004) menciona em seu trabalho a potencialidade do uso do Mathcad como ferramenta de ensino de engenharia aplicado à área estrutural e também como

ferramenta de trabalho para o engenheiro moderno. Dentre as vantagens do uso deste programa, destacam-se: a confiabilidade nos resultados, uso de notação matricial, facilidade no uso, alta capacidade de armazenamento e manipulação de dados em formatos diversos, tais como .txt, .xls, .dat e outros. Tendo em vista estas vantagens, além da disponibilidade do programa na FMC, o Mathcad foi empregado no presente trabalho [39].

Além da seleção do modelo matemático mais adequado. No presente trabalho foram testados dentre outros modelos, o quadrático e linear. Entretanto foi selecionado o modelo linear conforme FERNANDES (2003) e CARNEVAL et al (2007). Cabe ressaltar que em nenhum destes trabalhos foi apresentado uma equação de ajuste nem tão pouco feitas referências sobre a qualidade deste ajuste, contendo apenas representações gráficas de retas. O programa Excel foi empregado somente para o desenho dos gráficos 2D.

II.9.2 - Método mínimos quadrados.

Teoria de Análise de Regressão

Segundo MONTGOMERY (2005) e DOWING (2006), o ajuste de um modelo de regressão linear é dados por:

$$\hat{y}_i = \hat{a} + \hat{b}x_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

onde:

\hat{a} - estimador do coeficiente linear (ou intercepto)

\hat{b} - estimador do coeficiente angular

Porém neste ajuste os valores observados (x_i, y_i) estão espalhados ao redor da reta de regressão. Quanto menor for este espalhamento, melhor a reta de regressão representa o conjunto de valores observados. Uma forma de avaliar este espalhamento será através da

análise de variância. A variância amostral total, como estimador do espalhamento, pode ser decomposta da seguinte forma:

$$\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2 + \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (4)$$

onde:

y_i valores de y observados

\bar{y} valor médio de y

\hat{y}_i valor de y estimados pela reta de regressão ajustada que corresponde a cada valor observado

Os três elementos desta equação correspondem, respectivamente, às três somas dos quadrados:

$$SQ_{total} = SQ_{regressão} + SQ_{resíduos} \quad (5)$$

onde:

SQ_{total} variância total de Y

$SQ_{regressão}$ variância explicada pela regressão

$SQ_{resíduos}$ variância não explicada pela regressão

Podemos medir quanto a reta de regressão (valores \hat{y}_i) difere deste valor médio \bar{y} pela soma dos quadrados das distâncias entre \hat{y}_i e \bar{y} , o que corresponde a $SQ_{regressão}$. Também podemos medir o espalhamento dos valores observados em relação à reta, o que corresponde a $SQ_{resíduos}$ dado pela soma dos quadrados das distâncias entre \hat{y}_i e y_i . Por isto que dizemos

que $SQ_{regressão}$ corresponde a quanto da variação de y_i é "justificado" pela reta ajustada e $SQ_{resíduos}$ a quanto "sobra" para ser explicado.

Sendo assim, pode-se verificar que percentual da variância total que é explicada pela reta obtida de um modelo de regressão linear, utilizando:

$$R^2 = \frac{SQ_{regressão} / 1}{SQ_{total} / (n-1)} \quad (6)$$

Nota: os denominadores 1 e $(n-1)$ correspondem aos graus de liberdade de $SQ_{regressão}$ e $SQ_{resíduos}$

Sendo assim, pode-se definir o coeficiente de determinação como sendo a relação entre a variância explicada e a variância total.

CAPÍTULO III – RESULTADOS- APRESENTAÇÃO E ANÁLISE

Para a apresentação dos resultados obtidos nos ensaios de ultra-som, a abscissa representa os valores médios medidos pelos operadores e no eixo das ordenadas o valor real médio. O procedimento de ajuste baseado no Método dos Mínimos Quadrados, conforme descrito no item III.9.2.

Caso 1 – Corpo de Prova (CP) com Furo Chato

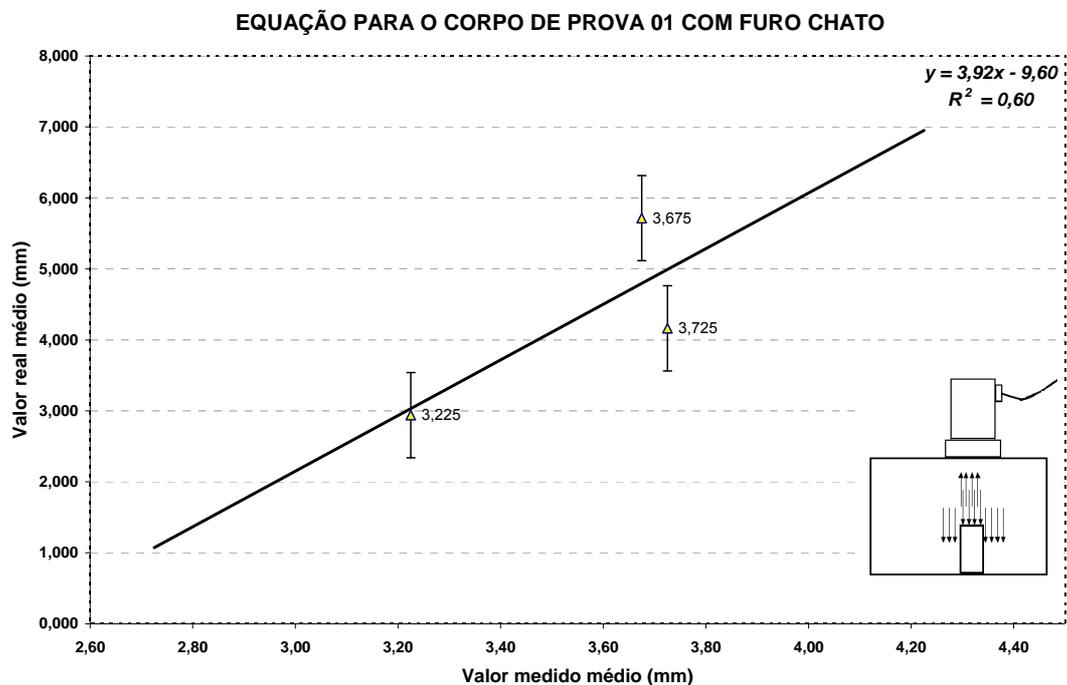


Figura III.1– Equação do CP 01 com furo chato

A equação que representa o ajuste para o CP 01 com furo chato é dada por:

$$y = 3,92x - 9,60 \quad \text{e} \quad R^2 = 0,60$$

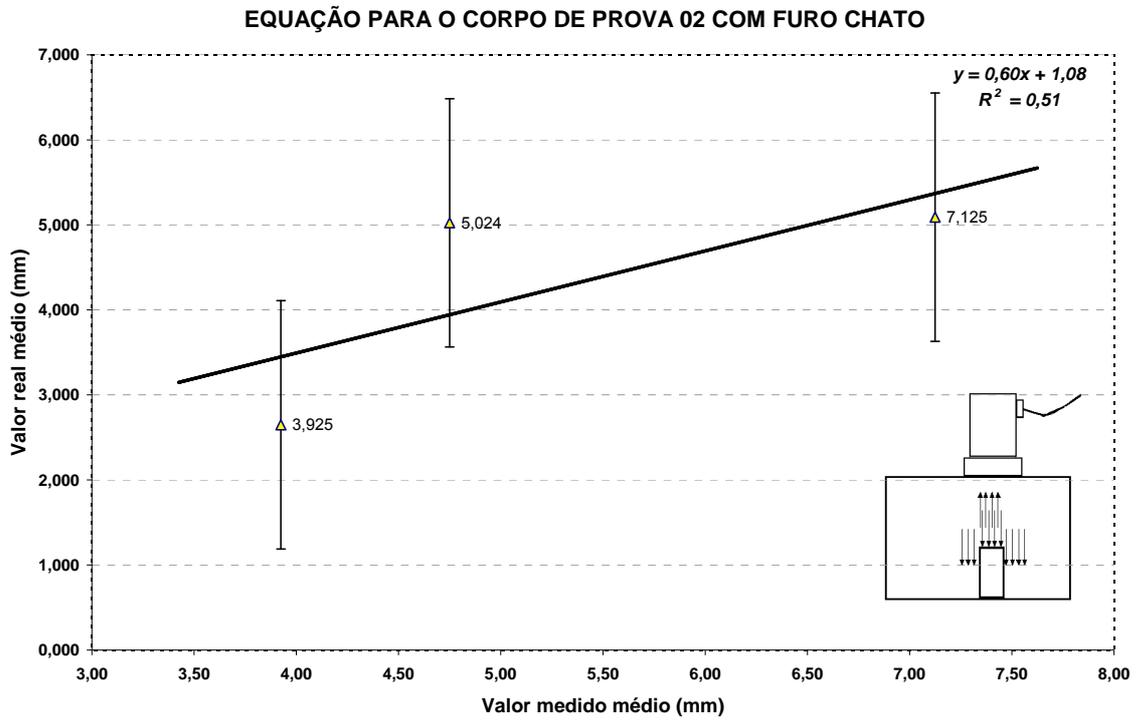


Figura III.2 – Equação do CP 02 com furo chato

A equação que representa o ajuste para o CP 02 com furo chato é dada por:

$$y = 0,60x + 1,09 \quad e \quad R^2 = 0,51$$

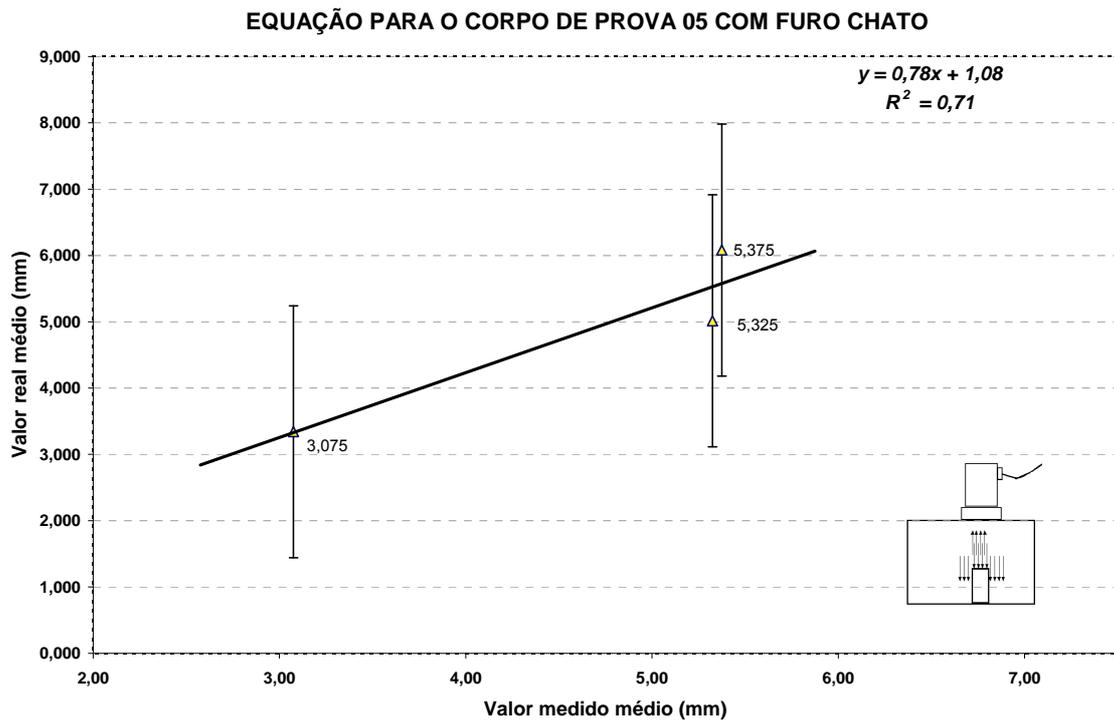


Figura III.3 – Equação do CP 05 com furo chato

A equação que representa o ajuste para o CP 05 com furo chato é dada por:

$$y = 0,78x + 1,08 \quad e \quad R^2 = 0,71$$

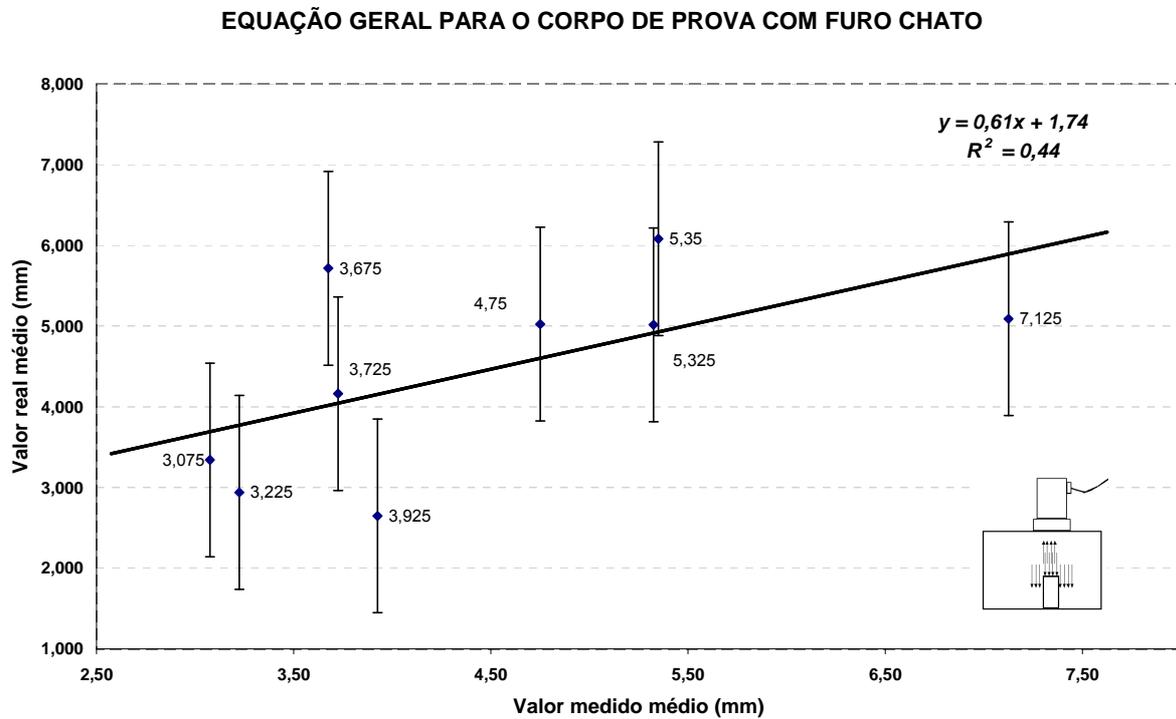


Figura III.4 – Equação geral dos CP's com furo chato

A equação que representa o ajuste para o CP com furo chato é dada por:

$$y = 0,61x + 1,74 \quad e \quad R^2 = 0,44$$

Caso 2 – Corpo de Prova (CP) com Furo Cônico

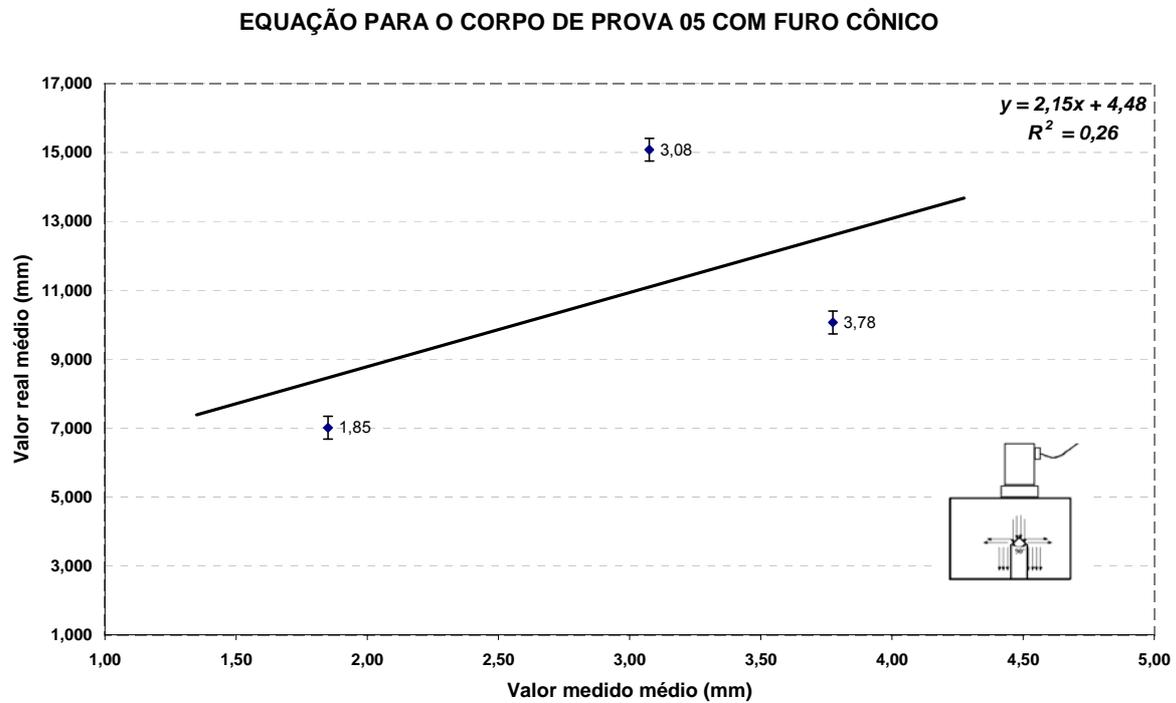


Figura III.5 – Equação do CP 05 com furo cônico

A equação que representa o ajuste para o CP 05 com furo cônico é dada por:

$$y = 2,15x + 4,48 \quad e \quad R^2 = 0,26$$

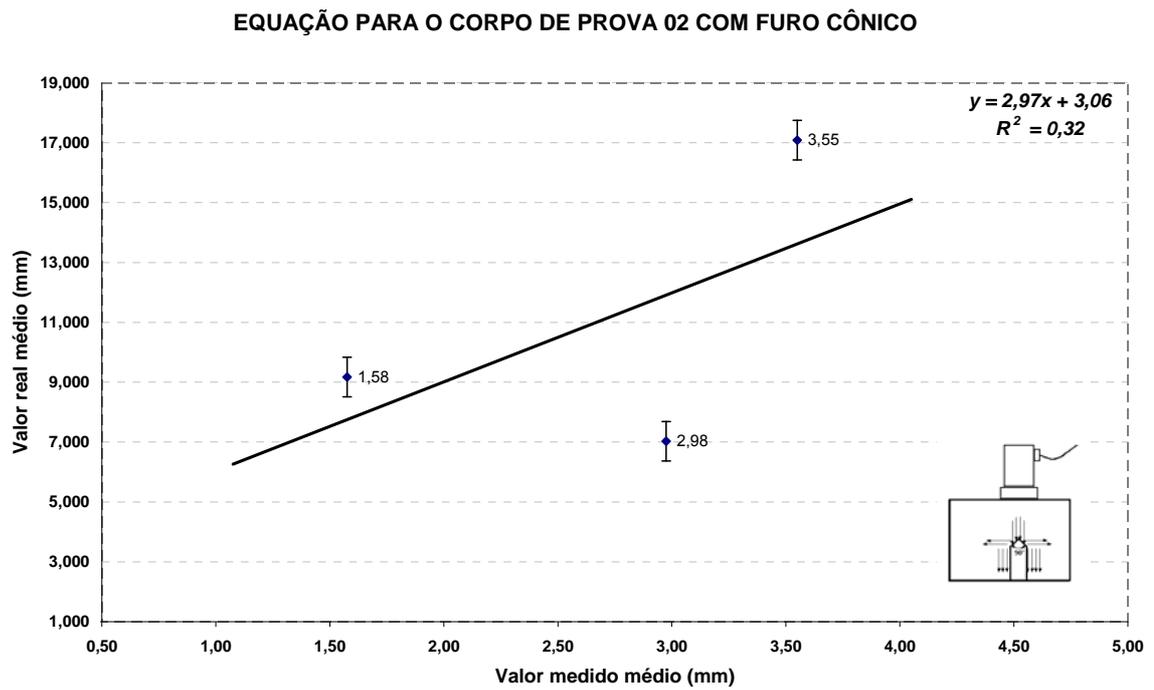


Figura III.6 – Equação do CP 04 com furo cônico

A equação que representa o ajuste para o CP 04 com furo cônico é dada por:

$$y = 2,97x + 3,06 \text{ e } R^2 = 0,32$$

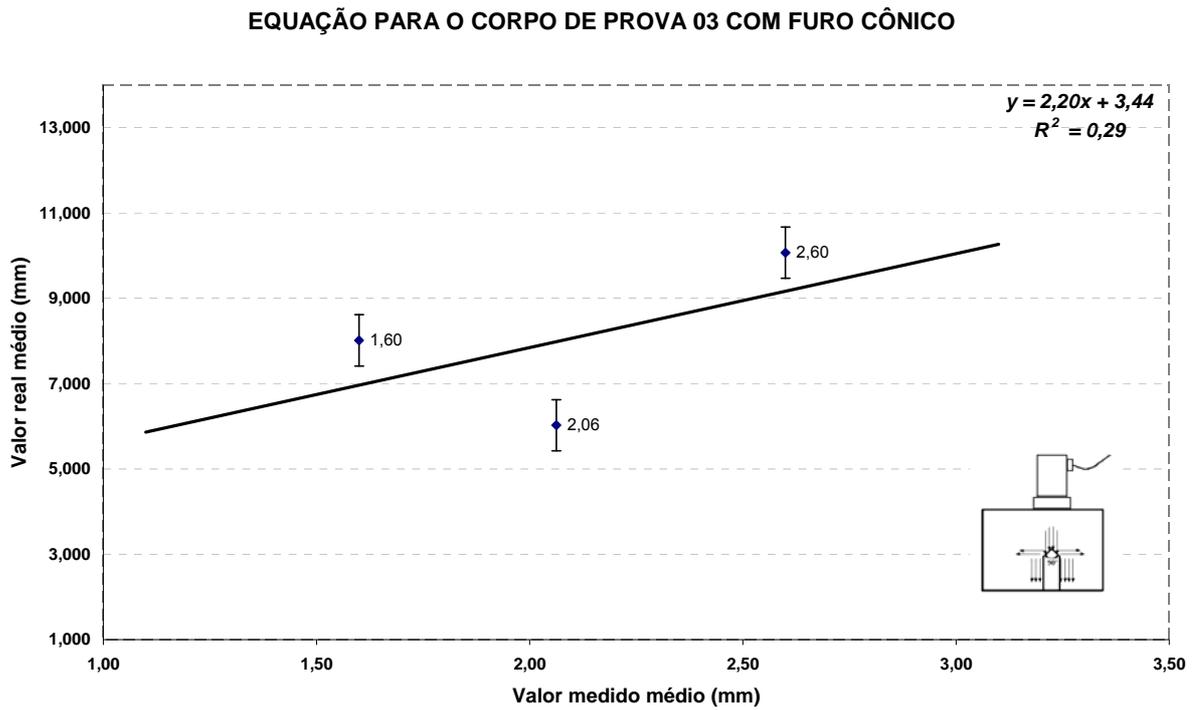


Figura III.7 – Equação do CP 03 com furo cônico

A equação que representa o ajuste para o CP 03 com furo cônico é dada por:

$$y = 2,20x + 3,44 \text{ e } R^2 = 0,29$$

EQUAÇÃO GERAL PARA O CORPO DE PROVA COM FURO CÔNICO

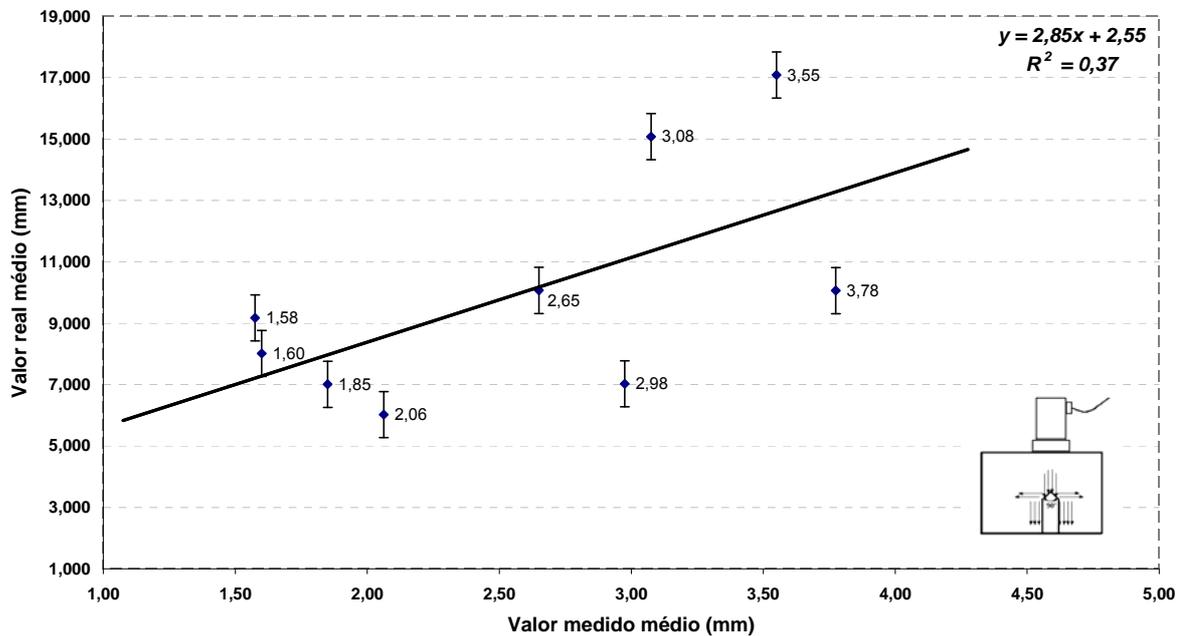


Figura III.8 – Equação geral dos CP's para furo de fundo cônico

A equação que representa o ajuste para o CP com furo cônico é dada por:

$$y = 2,85x + 2,55 \quad e \quad R^2 = 0,37$$

As figuras de III.1 a III.8 representam os ajustes relativos às dimensões dos pontos obtidos por meio da técnica de ultra-som pulso-eco, visualização tipo A-scan, para corpos de provas que possuem furos de fundo chatos e furos de fundo cônicos. Estes pontos têm objetivo de mostrar os erros existentes na medição dos tipos de furos acima citados.

As figuras III.1 a III.8 mostram também dois aspectos relativos aos erros de medição. O primeiro aspecto é relativo às “barras de dispersão”, que correspondem a quanto houve de dispersão dos valores medidos. O segundo aspecto indica um ajuste por mínimos quadrados dos pontos.

Com relação à análise das barras de dispersão e aos respectivos dados foram considerados em todos os gráficos 3 pontos. O que equivale dizer que em cada dimensão a ser

medida tanto nos furos de fundo chatos como nos furos de fundo cônicos, cada inspetor executou a medição três vezes. As figuras III.4 e III.8 mostram um resumo destas dispersões das medições. Quando se analisa estas figuras um ponto importante deve ser ressaltado é com relação à dispersão das barras de dispersão. A princípio pode parecer que a dispersão no furo chato é maior que a dispersão no furo cônico, o que iria contradizer a realidade, porém a análise nos mostra que no furo chato os pontos se encontram mais próximos da reta ajustada e no furo cônico os pontos se encontram mais afastados da reta ajustada. Sendo assim, os pontos medidos relativos aos furos cônicos têm dispersões muito maiores dos que os do furo chato, devido aos mesmos estarem mais afastados da reta ajustada.

Com relação a avaliação do ajustamento das curvas pode-se fazer uma análise em relação aos coeficientes de determinação (R^2). Sendo o coeficiente de determinação uma relação entre a variância explicada e a variância total, nota-se que nas figuras III.1 a III.3 foram realizados ajustes por mínimos quadrados para cada corpo de prova que possuía furos chatos. Verificou-se que o melhor ajuste dos dados foram retas com coeficientes de determinação (R^2) que variam de 0,60 a 0,71. Com relação as figuras III.5 a III.7 foram realizados ajustes por mínimos quadrados para cada corpo de prova que possuía furos de fundo cônico. Verificou-se que o melhor ajuste dos dados foram retas com coeficientes de determinação (R^2) que variam de 0,26 a 0,32. Como era esperado os coeficientes de dispersão mostram relativos aos furos cônicos mostraram valores menores em relação aos valores dos furos chatos. Isto se deve a dificuldade na realização da medição, conforme explicado anteriormente.

A Tabela III.1 mostra um resumo dos ajustes por mínimos quadrados com os respectivos coeficientes de determinação (R^2) para os furos chatos e cônicos.

Tabela III.1 – Resumo dos ajustes por mínimos quadrados com os respectivos coeficientes de determinação (R^2) para os furos chatos e cônicos

Furos Chatos		
Corpos de Prova	Equação	Coefficiente de Determinação
CP1_Ch	$Y_{REAL} = 3,92.X_{MEDIDO} - 9,60$	$R^2 = 0,60$
CP2_Ch	$Y_{REAL} = 0,60.X_{MEDIDO} + 1,09$	$R^2 = 0,51$
CP3_Ch	$Y_{REAL} = 0,78.X_{MEDIDO} + 1,08$	$R^2 = 0,71$
Geral_Ch	$Y_{REAL} = 0,61.X_{MEDIDO} + 1,74$	$R^2 = 0,44$
Furos Cônicos		
CP1_Con	$Y_{REAL} = 2,15.X_{MEDIDO} + 4,48$	$R^2 = 0,26$
CP2_Con	$Y_{REAL} = 2,97.X_{MEDIDO} + 3,06$	$R^2 = 0,32$
CP3_Con	$Y_{REAL} = 2,20.X_{MEDIDO} + 3,44$	$R^2 = 0,29$
Geral_Con	$Y_{REAL} = 2,85.X_{MEDIDO} + 2,55$	$R^2 = 0,37$

De acordo com os dados da Tabela III.1, pode-se desenvolver alguns exemplos. Considerando as equações gerais $Y_{REAL_Furo\ Chato} = 0,61.X_{MEDIDO} + 1,74$ e $Y_{REAL_Furo\ Cônico} = 2,85.X_{MEDIDO} + 2,55$, para os furos chato e cônicos respectivamente, vamos avaliar os erros relativos das equações quando comparados com os valores reais e valores reais estimados, ou seja, o erro de previsão da equação, ou seja, avalia-se a capacidade de ajuste da equação. Os erros relativos são calculados considerando valores absolutos da diferença entre o valor real e o valor real previsto dividido pelo valor real. Sendo assim, estes dados estão dispostos nas tabelas III.2 e III.3.

Tabela III.2 – Exemplos de dados para testes das equações gerais de previsão do valor real, para furos chatos

Corpos de Prova	Valores Médios Medidos (mm)	Valores Médios Reais (mm)	Valores Médios Estimados Real (mm)	Erros Relativos (%)
Medida 1	7,12	5,09	6,09	19,60
Medida 2	5,38	6,08	5,02	17,50
Medida 3	3,08	3,34	3,62	8,20
Furos Chatos ($Y_{\text{REAL_Furo Chato}} = 0,61.X_{\text{MEDIDO}} + 1,74$)				

Tabela III.3 – Exemplos de dados para testes das equações gerais de previsão do valor real, para furos de fundo cônicos

Corpos de Prova	Valores Médios Medidos (mm)	Valores Médios Reais (mm)	Valores Médios Estimados Real (mm)	Erros Relativos (%)
Medida 1	1,58	9,17	7,05	23,10
Medida 2	2,98	7,03	11,04	57,20
Medida 3	3,55	17,08	12,67	25,90
Furos Cônicos ($Y_{\text{REAL_Furo Cônico}} = 2,85.X_{\text{MEDIDO}} + 2,55$)				

De acordo com a tabela III.1, pode-se avaliar que os valores dos coeficientes de determinação (R^2).nas equações gerais para os furos chatos e cônicos foram 0,44 e 0,37, respectivamente. Sendo assim, a equação de previsibilidade do furo chato tem erro menor quando comparado como a do furo cônico.

Quando se avaliam as tabelas III.2 e III.3 verifica-se que os valores dos erros relativos para o furo chato são menores quando comparados com o furo cônico. Este fato se deve a baixa refletividade observada nos furos cônico, que afeta diretamente a qualidade do dimensionamento da descontinuidade pelo operador de ultra-som quando do uso da técnica AVG/DGS.

Para um conjunto de inspetores que são certificados e qualificados pelo Sistema Nacional de Qualificação e Certificação – SNQC, constou-se que é possível efetuar um ajuste

linear, segundo FERNANDES (2003) e CARNEVAL et al (2007). Cabe ressaltar que nesse modelo de ajuste tanto para o furo de fundo chato quanto para o cônico levou-se em consideração o coeficiente de determinação (R^2) dos ajustes. Além do mais, nesse trabalho não foi avaliado o erro do inspetor mais sim a robustez do ajuste em prever o valor verdadeiro das descontinuidades.

Na tabela III.4 abaixo um resumo dos erros relativos e das respectivas equações de ajuste.

Tabela III.4 – Resumo dos erros relativos

	Furos Cônicos	Furos Chatos
	$(Y_{\text{REAL_Furo Cônico}} = 2,85 \cdot X_{\text{MEDIDO}} + 2,55)$	$(Y_{\text{REAL_Furo Chato}} = 0,61 \cdot X_{\text{MEDIDO}} + 1,74)$
	Erro relativo (%)	Erro relativo (%)
Medida 1	23.10	19.60
Medida 2	57.20	17.50
Medida 3	25.90	8.20

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Na simulação proposta nesse estudo, devemos considerar que os furos de fundo chatos representam as descontinuidades com posicionamento perpendicular ao feixe sônico, estando assim em condições de detectabilidade mais favoráveis em relação aos furos de fundo cônico, que por dispersarem a maior parte do feixe sônico encontram-se em condições desfavoráveis de detecção.

No escopo desse estudo comparamos a resolução quanto ao dimensionamento de descontinuidades internas em materiais forjados pelo método de ultra-som, considerando-se essas duas possibilidades de detectabilidade para simular o mais próximo a realidade de geração de desvios no processo de forjamento, que pode produzir descontinuidades perpendiculares (essas mais prováveis) ou não em relação as superfícies acessíveis aos transdutores de ultra-som.

A reprodução dos mesmos parâmetros de inspeção em todos os processos de avaliação utilizados nesse estudo, pretendem minimizar as muitas variáveis que poderiam ser naturalmente introduzidas, afetando assim uma extrapolação das considerações e conclusões apresentadas.

O parque industrial metal mecânico do estado do Rio de Janeiro é em grande parte constituído de empresas de construção, como por exemplo, as de plataformas para exploração de Petróleo, estaleiros para construção de navios, que se utilizam em sua grande maioria do processo de soldagem como um dos principais processos de fabricação, já o estado de São Paulo possui uma tradição em produção de Matéria Prima, produzidas por usinas de aço como a Villares Metals, Thyssen, etc, isso pode explicar a baixa utilização por parte dos inspetores de ultra-som do Rio de Janeiro, do método de inspeção e dimensionamento de descontinuidades com as curvas AVG/DGS, que são amplamente utilizados pelos inspetores de São Paulo, que tem na sua rotina a avaliação de materiais Forjados produzidos por essas Usinas.

No Rio de Janeiro observamos a utilização do método DAC do ASME (*Distance – Amplitude – Curve*) amplamente utilizado na avaliação e dimensionamento em juntas soldadas.

Conclusões

De acordo com os dados experimentais obtidos no Ensaio Não Destrutivos por ultra-som, da revisão da literatura técnica e acadêmica e por fim com os testes de modelos matemáticos para verificação da possibilidade de uma equação de predição, conclui-se que:

Avaliando-se os valores dos coeficientes de determinação (R^2) nas equações gerais para os furos de fundo chatos e cônicos, que foram respectivamente 0,44 e 0,37 (tabela III.1), conclui-se que a equação de predição do furo de fundo chato possui melhor qualidade no ajuste, ou seja, o modelo linear apresenta mais adequado no caso do furo chato.

De acordo com as tabelas III.2 e III.3, verifica-se que os valores dos erros relativos para o furo chato são menores quando comparados com o furo cônico. Este fato se deve a baixa refletividade observada nos furos cônicos, que afeta diretamente a qualidade do dimensionamento da descontinuidade pelo operador de ultra-som quando do uso da técnica AVG/DGS.

Para os furos de fundos cônicos verifica-se que, pela dispersão de parte do som o dimensionamento fica comprometido, o que reflete os resultados obtidos nos erros relativos quando do uso da equação de ajuste dos furos cônicos.

O estudo apresentado contribui para análises computacionais, por exemplo, para simulação envolvendo mecânica da fratura e elementos finitos, que buscam avaliar a integridade estrutural de um equipamento ou estrutura, através da dimensão da descontinuidade. Portanto fica evidente que o projetista, ao usar uma dimensão de descontinuidade obtida pelo ensaio de ultra-som, deve prever uma faixa de valores (máximos e mínimos), sendo obtidos através de equações lineares, como mostrado no Capítulo IV.

Com a utilização das equações de predição ou dos gráficos de ajustes lineares, podemos nos aproximar com mais segurança dos valores reais das descontinuidades internas nos Forjados, aumentando assim a confiabilidade das decisões quanto ao uso, recuperação ou até mesmo o sucateamento desses Forjados.

Sugestões para trabalhos futuros

Com a ampliação cada vez maior do uso de matéria prima forjada em todo território nacional, podemos citar os seguintes pontos como proposta para trabalhos futuros:

- ▶ Levantamento de curvas de probabilidade de detecção (POD) para as descontinuidades detectadas pelo método de ultra-som pulso eco em materiais forjados.
- ▶ Ampliação do estudo de dimensionamento das descontinuidades avaliadas pelo método AVG/DGS, atrelado a um modelo matemático.
- ▶ Investigar novos modelos matemáticos capazes de prever situações de furo cônico e avaliar o erro do operador em função do tipo de defeito.
- ▶ Ampliar o estudo de detecção de descontinuidades variando-se as direções preferenciais da superfície das descontinuidades X ataque do feixe sônico.
- ▶ Desenvolver estudos para estabelecer alguns critérios mais rígidos para rejeição pela perda da refletividade do eco de fundo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] MORÉ, J. D.; GUIMARÃES A.S.; XEXÉO, G.B.; “Metodologia Fuzzy para avaliação da Confiabilidade Humana por Ultra Som”. *XXI Congresso Nacional de Ensaios Não Destrutivos*, São Paulo, SP, Brasil, Agosto 2002.
- [2] ANDREUCCI, R.; Ensaio por ultra-som. Apostila da Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos. “Ensaio Não Destrutivo Ultra-som”, São Paulo. 2003.
- [3] SANTIN, J. L., *Ultra-som Técnicas e Aplicações*. 1ª Edição, Rio de Janeiro, Editora Qualitymark, 1996.
- [4] NDE Resource Center 2008. Disponível em: <http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/Introduction/description.htm>. Acessado em 27 Julho 2008.
- [5] SILK, M. G. LIDINGTON, B.H., “Defect sizing an Ultrasonic Time Delay Approach”, *British Journal of NDT*, pp. 33-36, March, 1975.
- [6] CARVALHO, A. A, *Confiabilidade de técnica de Ensaios Não Destrutivos na Inspeção de Dutos utilizados na Indústria do Petróleo*. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2006.
- [7] OGILVY, J. A., “Model for Predicting Ultrasonic Pulse-echo Probability of Detection”, *NDT & E International*, Vol. 26, Nº 1, pp. 19 – 29, 1993.
- [8] Nondestructive Evaluation and Quality Control, *ASM Handbook*, 3ª edição, Vol. 17, 1994.
- [9] CARVALHO, A. A, *Detecção de Descontinuidades pela técnica Ultra-sônica Pulso-eco Utilizando Um Sistema Multicanal*. Tese de M. Sc. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2002.
- [10] Norma Petrobras N-2315 - Execução de ensaio Não Destrutivo – Ultra Som em Forjados - Rev. C , Dez/07.
- [11] Procedimento de execução do Ensaio por Ultra Som da empresa FMC Technologies, Rev. 11, 2007.
- [12] ASTM A388 - Ultrasonic Examination of Heavy Steel Forgings – 2005.
- [13] HARRIS, D, “Effect of decision Making on Ultrasonic Examination Performance, TR – 100412, EPRI”, 1992.
- [14] ACHENBACH, J. D., “Quantitative Nondestructive Evaluation”, *International Journal os Solids and Structures*, Vol. 37, pp 13-27, 2000.

- [15] MENTZ, M, Método AVG (DGS) de avaliação de descontinuidades - Apostila ABENDE – São Paulo, 1999.
- [16] Trabalho apresentado no III Pan-American Conference for Nondestructive Testing - Rio de Janeiro 2003. Disponível em: <http://www.aaende.org.ar/ingles/sitio/biblioteca/material/T-119.pdf>. Acessado em 22 Julho 2008.
- [17] KRAÜTKRAMER, J., *Ultrasonic Testing of Materials*; Ed. Springer, 4a Edição, 1992.
- [18] BUTTON, S. T., *Metodologia para planejamento experimental e análise de resultados* – Apostila do curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – UEC – Campinas – 2005.
- [19] American Society for Nondestructive Testing, *Nondestructive Testing Handbook*, 2^a Edição, Vol. 7, 1991.
- [20] RAAD, J. A., DIJKSTRA, F. H., “Mechanised Ultrasonic on Girth Welds During Pipeline Construction”, *NDT.net*, Vol. 3, No. 11, November 1998.
- [21] SILK, M. G., “Sizing Crack-like Defect by Ultrasonic Means”, In *Research Techniques in Nondestructive Testing*, vol. 3, Academic Press, pp. 51 - 79, 1977.
- [22] CARVALHO, A. A., SILVA M. J., REBELLO, M. J., SOARES, S.S.R. , Detecção e Dimensionamento de Descontinuidades em Cordão de Solda Utilizando a Técnica Ultra-sônica TOFD – Disponível em http://www.abcm.org.br/xi_creem/resumos/PF/CRE04-PF01.pdf. Acessado em 24 de Julho 2008.
- [23] CARNEVAL, R. O., MOREIRA, A.B. , SOUZA, C.; “Uso das técnicas de END: ultra-som (TOFD e Phased Array), Radiografia, Partículas Magnéticas e ACFM na avaliação de Juntas soldadas com trincas de fadiga”. *IV Conferência Panamericana de END*, Buenos Aires, Argentina, Outubro 2007.
- [24] Apostila curso de Phased Harray da empresa TWI Brasil – Agosto 2008.
- [25] FERNANDES, J., L., ALVES, C. H.; “Limitações na detecção de defeitos internos através do ensaio de ultra-som”. *7ª COTEQ- Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos*, IBP104_03, Florianópolis, SC, Brasil, Setembro 2003.
- [26] FERNANDES, J. L., NORAT, F. A. V. e ANDA, R., “Análise das Limitações na Detecção de Defeitos através do Ensaio de Ultra-Som”, Projeto de Pesquisa, SENAI/UERJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, Julho 1996.
- [27] FERNANDES, J. L. . “Metodologia de Análise de Mapeamento de Dupla-Laminação, utilizando Transdutor Normal e Duplo-Cristal”. Trabalho Técnico, SENAI, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, Julho 1997.

- [28] ACHENBACH, J. D., "Quantitative Nondestructive Evaluation", *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 37, pp 13-27, 2000.
- [29] WALL, M., WEDGWOOD, F. A., BURCH, S., "Modeling of NDT Realiability (POD) and Applying Corrections for Human Factors" *7 th ECNDT – Europeum Conference on Nondestructive Testing*, Copenhagen, May, 1998.
- [30] SIMOLA, K., PULKKINEN, U., "Models for Non-Destructive Inspection Data", *Reliability Enginnering and system Safaty*, Vol. 60, pp. 1-12, 1998.
- [31] SERABIAN, S., "Ultrasonic Probability of Detection of Surface Flaws", *Material Evaluation*, Vol. 40, pp. 294-298, 1982.
- [32] FORSYTH, D. S., FAHR A., "On the Independent of Multiple Inspections and the Resultings Probability of Detection", *Quantitative Nondestructive Evaluation*, Iowa, July, 2000.
- [33] NOCKEMANN, C., BELLON, C., NICKISCH, S., "Strategies of Validation in General Testing Compared to Experience in NDE", *European-American Workshop*, Berlin, June, 1997.
- [34] MONTGOMERY, D.; *Probabilidade e Estatística para Engenheiros*, 3ª Ed. São Paulo: LTC, 2005.
- [35] DOWNING, D.; CLARK, J.; *Estatística Aplicada*, 2ª Ed. São Paulo: Saraiva, 2006.
- [36] Calcule com MATHCAD , Editora Erica – 2003.
- [37]. SILVA, A., L., C., MEI P., R., *Aços e Ligas Especiais*, 2ª Ed. São Paulo: Edgar Blucher, 2006.
- [38] Metals & Alloys in the Unified Numbering System – UNS, 8th edition.
- [39] FERREIRA, W., G., COELHO, L., H., CORREIA, E., V., COSTA, V., T., "Software Mathcad como instrumento pedagógico no ensino da engenharia: Área de estruturas", *World Congresso n Engineering and Tecnology Education*, Brazil, São paulo, Março, 2004.

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA
CELSO SUCKOW DA FONSECA – CEFET/RJ

DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
COORDENADORIA DO PROGRAMA DE
PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIA

DISSERTAÇÃO

MODELO PARA AVALIAÇÃO DE DESCONTINUIDADES INTERNAS POR
ULTRA-SOM EM MATERIAIS FORJADOS

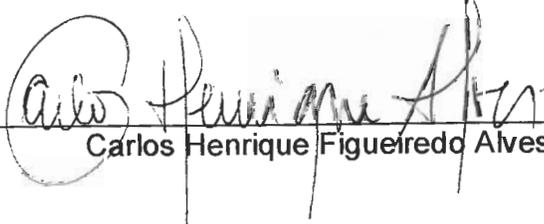
Isaac Niskier

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA
DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIA COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
TECNOLOGIA.

Data da defesa: 10/10/2008

Aprovação:


Maurício Saldanha Motta, D.Sc.


Carlos Henrique Figueiredo Alves, D.Sc.


Sérgio Damasceno Soares, D.Sc.

Livros Grátis

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

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

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

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

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