

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGEM)

**DIMENSIONAMENTO DE DEFEITOS EM BLOCOS DE AÇO CARBONO
ATRAVÉS DA TÉCNICA TOFD**

Ricson Rocha de Souza

Dissertação para a obtenção do título de Mestre em Engenharia

Porto Alegre

2009

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Escola de Engenharia

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

**DIMENSIONAMENTO DE DEFEITOS EM BLOCOS DE AÇO CARBONO
ATRAVÉS DA TÉCNICA TOFD**

Ricson Rocha de Souza

Engenheiro de Materiais

Trabalho realizado no Departamento de Metalurgia da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGEM), como parte dos requisitos para exame de qualificação de mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Ciência e Tecnologia dos Materiais

Porto Alegre

2009

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

Orientador: Prof. Dr. Afonso Reguly

Banca Examinadora

Dr. Eng. Mário Wolfart Junior – Andreas Stihl Motosserras Ltda.

Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker – PPGEM – UFRGS.

Prof. Dr. Felipe Amorim Berutti – Unipampa

Prof. Dr. Carlos Perez Bergmann
Coordenador do PPGEM

Dedico esta dissertação ao meu eterno pai por sempre demonstrar seu orgulho a cada obstáculo vencido e, por mostrar que devemos enfrentar muitas dificuldades para se conseguir êxito na vida e que, com muita garra e dedicação podemos alcançar nossos objetivos.

AGRADECIMENTOS

Ao Laboratório de Metalurgia Física da UFRGS (LAMEF) que, sob coordenação do Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker, me recebeu de portas abertas, disponibilizando todos os recursos necessários para que este trabalho fosse desenvolvido;

Ao meu orientador Prof. Dr. Afonso Reguly pela orientação, amizade, ensinamentos e confiança depositada durante este período;

Ao meu co-orientador Msc. Eng. Rubem Manoel Braga (Rubão) pelos ensinamentos na área de ultra-som, pela amizade, pela parceria, pela confiança e pela persistência para que este trabalho fosse concretizado;

Aos demais integrantes da equipe de ultra-som, em especial ao bolsista Felipe Goettens, pela colaboração no início dos desenvolvimentos;

À equipe do CPTI/Cetuc da PUC-RIO, em especial ao Miguel e ao Marcelo, pela grande contribuição na calibração do equipamento e também ao Dr. Eng. Sergio Damasceno Soares do CENPES/PETROBRÁS pelo suporte na confecção dos corpos de prova;

Agradecimentos especiais aos colegas e amigos: M.Sc. Eng. Toni Lima pela parceria durante este período e ao Dr. Eng. Carlos Martins (Shaq), pela parceria e por todo o apoio fornecido, principalmente, na edição e conclusão deste trabalho;

Aos demais colegas de trabalho do laboratório, pelo qual convivi durante este período, em especial aos amigos: Leite, Toni Chiossi, Tiago Rech, Facundo, Leandro, Marante, Gisela, Elisângela, Odair, Sonaldo, Gilnei, Rogério, Takimi, Val, Pingo, Petry, Charles, Gabriel, Tonilson, Viti, Beto, Bob, Dona Neiva, Susi e Osvaldo;

Aos amigos da empresa Andreas Stihl Motosserras Ltda., em especial ao Dr. Eng. Mário Wolfart, expresso minha gratidão pelo apoio, amizade e contribuição na minha formação profissional e pessoal;

Aos amigos do Laboratório de Materiais Cerâmicos da UFRGS (LACER), em especial ao Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann, expresso também minha gratidão pelo período de Iniciação Científica em que fiz grandes amizades e que foi muito importante para o início de minha formação pessoal e profissional;

Ao CNPq pelo apoio financeiro;

A toda minha família, à minha namorada Vanessa e aos demais grandes amigos, por todo o carinho, amizade, orgulho, amor e confiança indispensáveis para a conclusão desta etapa.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	IV
SUMÁRIO.....	V
ÍNDICE DE FIGURAS	VI
ÍNDICE DE TABELAS	X
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS.....	XI
RESUMO	XII
ABSTRACT	XIII
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 OBJETIVOS.....	3
2.1 Geral	3
2.2 Específicos.....	3
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
3.1 A Técnica TOFD – Tempo de Vôo da Onda Difrataada.....	4
3.1.1 Defeito aflorando na superfície de varredura do ensaio	9
3.1.2 Defeito aflorando na superfície oposta à varredura do ensaio.....	10
3.1.3 Defeitos no interior do material.....	11
3.1.4 Cálculo de tamanho e profundidade de defeitos no interior do material	12
3.1.5 Trincas abertas à superfície	13
3.1.6 Medição de profundidade e altura (via software).....	15
3.1.7 Detecção de trincas próximas à superfície	19
3.1.8 Calibração do ganho da onda difratada	19
3.1.9 Vantagens e limitações da técnica.....	21
3.1.10 Condições superficiais da amostra	24
3.1.11 Aplicações	24
4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	26
4.1 Materiais e Métodos	27
4.1.1 Confeção dos corpos de prova	27
4.2 Calibração e Interpretação da técnica.....	29
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
5.1 CP1: bloco com entalhe em V	36
5.2 CP2: bloco com entalhe reto.....	40
5.3 CP3: amostra com entalhes de diferentes profundidades	46
5.4 CP4: amostra com furos de diferentes profundidades	58
6 CONCLUSÕES.....	73
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	74
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	75
9 ANEXOS.....	77
9.1 Caracterização do material	77
9.2 Conceitos básicos	78
9.2.1 Som e ultra-som.....	78
9.2.2 Freqüência, velocidade e comprimento de onda	80
9.2.3 O campo sônico	81
9.2.4 Atenuação sônica.....	84
9.2.5 Acoplamento de cabeçotes	85
9.2.6 Divergência do feixe sônico	86
9.2.7 Reflexão e transmissão em incidência oblíqua.....	86
9.2.8 Ondas superficiais ou ondas de Rayleigh.....	89
9.3 Fenômeno da difração	90

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Desenho esquemático do ensaio TOFD: (1) Onda lateral, (2) Eco de fundo, (3) Difração superior, (4) Difração inferior e (5) Sinais de conversão de modo (FLOTTÉ, 2005).	5
Figura 2 – Ecograma típico do ensaio TOFD para uma amostra isenta de defeitos obtido com o equipamento utilizado nesta dissertação; B-scan (acima) e A-scan (abaixo).....	6
Figura 3 – Diagrama esquemático mostrando os tipos de onda gerada a partir de uma onda longitudinal incidindo em um defeito (SILVA et al., 2002).	7
Figura 4 – Diagrama esquemático mostrando os três principais tipos de defeitos detectados pela técnica TOFD. (1) onda lateral, (2) eco(s) da descontinuidade e (3) eco de fundo. (DARMON et al., 2008).....	8
Figura 5 – Ecograma para um defeito aflorando na superfície de varredura do ensaio. (1) onda lateral, (2) descontinuidade e (3) eco de fundo; A-scan (abaixo) e B-scan (acima).....	9
Figura 6 – Ecograma para um defeito aflorando na superfície oposta à varredura do ensaio. (1) onda lateral, (2) descontinuidade e (3) eco de fundo; A-scan (abaixo) e B-scan (acima).....	10
Figura 7 – Ecograma para um defeito que se encontra no interior do material. (1) onda lateral, (2a) extremidade superior da descontinuidade, (2b) extremidade inferior da descontinuidade e (3) eco de fundo; A-scan (abaixo) e B-scan (acima).	11
Figura 8 – Parâmetros dimensionais para o ensaio de TOFD	12
Figura 9 – Percurso difratado (A+B) na extremidade da descontinuidade (BARROS e CALDEIRA, 2004).....	13
Figura 10 – Representação da zona quase linear existente entre as duas sondas para detectar a difração de uma descontinuidade (BARROS e CALDEIRA, 2004).....	14
Figura 11 – Métodos 1, 2 e 3 para posicionamento adequado dos <i>gates</i> . (FLOTTÉ, 2005)....	16
Figura 12 - Exemplo de arranjo dos cabeçotes para duas zonas (acima de 50 mm de espessura <i>h</i>) (SZAFARSKA, 2008).....	19
Figura 13 - Fluxograma detalhado das etapas da metodologia adotada neste trabalho. CP = corpo de prova.	26
Figura 14 – Equipamento de TOFD utilizado no ensaio.....	27
Figura 15 – Bloco usinado com entalhe em “V” segundo Norma BS7706. CP=1.	28
Figura 16 - Bloco usinado com entalhe reto segundo Norma BS7706. CP=2.	28
Figura 17 - Bloco usinado com entalhes em diferentes profundidades. CP=3.....	29
Figura 18 - Bloco usinado com furos em diferentes profundidades. CP=4.....	29
Figura 19 – Exemplo de um ecograma obtido mostrando a onda lateral e o eco de fundo em uma região isenta de descontinuidades. O círculo em vermelho nos mostra o valor da espessura calibrado.....	31
Figura 20 – Esquema representativo da refração da onda, com seus respectivos ângulos, ao passar do acrílico para o aço.....	32
Figura 21 – Representação das principais ondas que incidem em uma descontinuidade, oriundas da refração no meio	33
Figura 22 – Ecograma do CP1 para uma frequência de 5MHz e sapatas de 60°. Os círculos em vermelho indicam o valor experimental da profundidade e a localização do eco da difração do entalhe no B-scan. (1) onda lateral; (2) difração e (3) fundo. A-scan (abaixo) e B-scan (acima).	36
Figura 23 – Ecograma do CP1 para uma frequência de 5MHz e sapatas de 70°. Os círculos em vermelho indicam o valor experimental da profundidade e a localização do eco da difração do entalhe no B-scan. (1) onda lateral; (2) difração e (3) fundo. A-scan (abaixo) e B-scan (acima).	37
Figura 24 - Ecograma do CP1 para uma frequência de 10MHz e sapatas de 60°. Os círculos em vermelho indicam o valor experimental da profundidade e a localização do eco da difração	

do entalhe no B-scan. (1) onda lateral; (2) difração e (3) fundo. A-scan (abaixo) e B-scan (acima).....	38
Figura 25 – Ecograma do CP1 para uma frequência de 10MHz e sapatas de 70°. Os círculos em vermelho indicam o valor experimental da profundidade e a localização do eco da difração do entalhe no B-scan. (1) onda lateral; (2) difração e (3) fundo. A-scan (abaixo) e B-scan (acima).....	39
Figura 26 – Gráfico comparando os valores experimentais de profundidade para cada frequência/ângulo adotados com o valor real de 12,5mm referente ao entalhe do CP1. A linha horizontal vermelha ($y=12,5$) representa o valor da profundidade real.	40
Figura 27 – Ecograma do CP2 para uma frequência de 5MHz e sapatas de 60°. Os círculos em vermelho indicam o valor experimental da profundidade e a localização do eco da difração do entalhe no B-scan. (1) onda lateral; (2) difração e (3) fundo. A-scan (abaixo) e B-scan (acima).	41
Figura 28 - Ecograma do CP2 para uma frequência de 5MHz e sapatas de 70°. Os círculos em vermelho indicam o valor experimental da profundidade e a localização do eco da difração do entalhe no B-scan. (1) onda lateral; (2) difração e (3) fundo. A-scan (abaixo) e B-scan (acima).	42
Figura 29 - Ecograma do CP2 para uma frequência de 10MHz e sapatas de 60°. Os círculos em vermelho indicam o valor experimental da profundidade e a localização do eco da difração do entalhe no B-scan. (1) onda lateral; (2) difração e (3) fundo. A-scan (abaixo) e B-scan (acima).....	43
Figura 30 - Ecograma do CP2 para uma frequência de 10MHz e sapatas de 70°. Os círculos em vermelho indicam o valor experimental da profundidade e a localização do eco da difração do entalhe no B-scan. (1) onda lateral; (2) difração e (3) fundo. A-scan (abaixo) e B-scan (acima).....	44
Figura 31 - Gráfico comparando os valores experimentais de profundidade para cada frequência/ângulo adotados com o valor real de 8 mm referente ao entalhe do CP2. A linha horizontal vermelha ($y=8$) representa o valor da profundidade real.	45
Figura 32 – Ecogramas com entalhes de 12,5mm (à esquerda) e 8mm (à direita) aflorando na superfície. Nota-se o bloqueio da onda lateral na região da descontinuidade (círculo escuro). O círculo vermelho indica o valor da medição para o eco difratado.....	46
Figura 33 - Ecogramas com entalhes de 12,5mm (à esquerda) e 17mm (à direita) aflorando na superfície oposta. Nota-se o enfraquecimento e a distorção do eco de fundo (círculo escuro). O círculo vermelho indica o valor da medição para o eco difratado.....	47
Figura 34 – Esquema mostrando o efeito das zonas mortas na medição da profundidade de uma descontinuidade de 8mm no corpo de prova com entalhes, utilizando cabeçote de 5MHz e sapata de 60 graus. A unidade Y (mm) representa a distância dos cabeçotes e a unidade Z (mm) representa a profundidade. PCS = 51mm; T = Cabeçote transmissor; R = Cabeçote Receptor.....	49
Figura 35 - Ecogramas com entalhes de 12,5mm (à esquerda) e 8mm (à direita) aflorando na superfície. Nota-se o bloqueio da onda lateral na região da descontinuidade (círculo escuro). O círculo vermelho indica o valor da medição.....	49
Figura 36 - Ecogramas com entalhes de 12,5mm (à esquerda) e 17mm (à direita) aflorando na superfície oposta. Nota-se o enfraquecimento e a distorção do eco de fundo (círculo escuro). O círculo vermelho indica o valor da medição.....	50
Figura 37 - Esquema mostrando o efeito das zonas mortas na medição da profundidade de uma descontinuidade de 8mm no corpo de prova com entalhes, utilizando cabeçote de 5MHz e sapata de 70 graus. A unidade Y (mm) representa a distância dos cabeçotes e a unidade Z (mm) representa a profundidade. PCS = 75mm; T = Cabeçote transmissor; R = Cabeçote Receptor.....	51

Figura 38 - Ecogramas com entalhes de 12,5mm (à esquerda) e 8mm (à direita) aflorando na superfície. Nota-se o bloqueio da onda lateral na região da descontinuidade (círculo escuro). O círculo vermelho indica o valor da medição.....	52
Figura 39 - Ecogramas com entalhes de 12,5mm (à esquerda) e 17mm (à direita) aflorando na superfície oposta. Nota-se o enfraquecimento e a distorção do eco de fundo (círculo escuro). O círculo vermelho indica o valor da medição.....	52
Figura 40 - Esquema mostrando o efeito das zonas mortas na medição da profundidade de uma descontinuidade de 8mm no corpo de prova com entalhes, utilizando cabeçote de 10MHz e sapata de 60 graus. A unidade Y (mm) representa a distância dos cabeçotes e a unidade Z (mm) representa a profundidade. PCS = 51mm; T = Cabeçote transmissor; R = Cabeçote Receptor.....	53
Figura 41 - Ecogramas com entalhes de 12,5mm (à esquerda) e 8mm (à direita) aflorando na superfície. Nota-se o bloqueio da onda lateral na região da descontinuidade (círculo escuro). O círculo vermelho indica o valor da medição.....	54
Figura 42 - Ecogramas com entalhes de 12,5mm (à esquerda) e 17mm (à direita) aflorando na superfície oposta. Nota-se o enfraquecimento e a distorção do eco de fundo (círculo escuro). O círculo vermelho indica o valor da medição.....	55
Figura 43 - Esquema mostrando o efeito das zonas mortas na medição da profundidade de uma descontinuidade de 8mm no corpo de prova com entalhes, utilizando cabeçote de 10MHz e sapata de 70 graus. A unidade Y (mm) representa a distância dos cabeçotes e a unidade Z (mm) representa a profundidade. PCS = 75mm; T = Cabeçote transmissor; R = Cabeçote Receptor.....	56
Figura 44 – Gráfico comparativo mostrando as profundidades experimentais obtidas para cada variação do ensaio no CP3.....	57
Figura 45 – Imagem revelando os furos do corpo de prova obtidos por difração no sentido crescente. (1)difração superior do furo; (2)difração inferior do furo.	58
Figura 46 - Imagem revelando os furos do corpo de prova obtidos por difração no sentido decrescente. (1) difração superior do furo; (2) difração inferior do furo.	58
Figura 47 – Imagem mostrando o efeito da zona morta para os furos de 2,5mm (à direita) e 5mm (à esquerda). As linhas amarelas delimitam a região do furo e a linha vermelha marca o limite da zona morta superior.	61
Figura 48 - Imagem revelando os furos do corpo de prova obtidos por difração no sentido crescente. (1)difração superior do furo; (2)difração inferior do furo.	62
Figura 49 - Imagem revelando os furos do corpo de prova obtidos por difração no sentido decrescente. (1)difração superior do furo; (2)difração inferior do furo.	63
Figura 50 – Diagrama esquemático mostrando o efeito da zona morta para os furos de 2,5mm (à direita) e 5mm (à esquerda). As linhas amarelas delimitam a região do furo e a linha vermelha marca o limite da zona morta superior.	65
Figura 51 - Imagem revelando os furos do corpo de prova obtidos por difração no sentido crescente. (1)difração superior do furo; (2)difração inferior do furo.	66
Figura 52 - Imagem revelando os furos do corpo de prova obtidos por difração no sentido decrescente. (1)difração superior do furo; (2)difração inferior do furo.	66
Figura 53 - Imagem mostrando o efeito da zona morta para os furos de 2,5mm (à direita) e 5mm (à esquerda). As linhas amarelas delimitam a região do furo e a linha vermelha marca o limite da zona morta superior.	68
Figura 54 - Imagem revelando os furos do corpo de prova obtidos por difração no sentido crescente. (1)difração superior do furo; (2)difração inferior do furo.	69
Figura 55 - Imagem revelando os furos do corpo de prova obtidos por difração no sentido decrescente. (1)difração superior do furo; (2)difração inferior do furo.	69

Figura 56 - Imagem mostrando o efeito da zona morta para os furos de 2,5mm (à direita) e 5mm (à esquerda). As linhas amarelas delimitam a região do furo e a linha vermelha marca o limite da zona morta superior.	71
Figura 57 – Gráfico mostrando as profundidades experimentais obtidas comparando com a profundidade real de cada um dos sete furos para o CP4.	72
Figura 58 - Micrografias mostrando microestrutura ferrítica e perlítica, no sentido transversal.	77
Figura 59 - Micrografia mostrando os grãos, tamanho 10.	77
Figura 60 – Faixa de frequência de interesse para o ensaio ultra-sônico (ANDREUCCI, 2002).	78
Figura 61 - H é a amplitude (intensidade) da onda, v a velocidade e λ o comprimento da onda.	81
Figura 62 – Representação das três principais zonas que constituem um feixe sônico (BRAGA, 2007).	82
Figura 63 - Representação mostrando as relações ente frequência, diâmetro e divergência do feixe sônico (BRAGA, 2007).	83
Figura 64 – Efeito de ondas planas longitudinais incidentes obliquamente em uma fronteira de plano PQ, separando dois materiais distintos (BLITZ e SIMPSON, 1996).	87
Figura 65 – Efeito do ângulo de incidência nas ondas que passam do meio 1 para o meio 2. Ângulos acima do crítico determinam a passagem apenas das ondas transversais para o meio 2 (BLITZ e SIMPSON, 1996).	88
Figura 66 – Variação de ρ_o com r ao longo do eixo da fonte (BLITZ e SIMPSON, 1996).	91
Figura 67 - Fonte ultra-sônica propagando sobre uma banda larga finita pelo qual a curva representa a soma das curvas individuais (BLITZ e SIMPSON, 1996).	92
Figura 68 – Gráfico mostrando (i) a variação de $2J_1(x)/x$ com x e (ii) a variação conseqüente da razão ρ_o/ρ_{max} com o parâmetro $\text{sen}\theta(a/\lambda)$ (BLITZ e SIMPSON, 1996).	93
Figura 69 – Gráfico ilustrando as variações da razão ρ_o/ρ_{max} com direção: curvas direcionalmente, quando (i) $ka = \pi/2$, (ii) $ka = \pi$ e (iii) $ka = 5\pi$ (BLITZ e SIMPSON, 1996).	94

INDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Fórmulas utilizadas para definir os principais parâmetros do ensaio.....	13
Tabela 2 - Guia de calibração para ensaio TOFD (ENV 583-6, 2000).	17
Tabela 3 – Efeito da variação da frequência do cabeçote para o ensaio TOFD (BS 7706, 1993).	17
Tabela 4 – Efeito da variação do diâmetro do cristal do cabeçote para o ensaio TOFD (BS 7706, 1993).....	18
Tabela 5 – Separação dos cabeçotes definida para cada ângulo de sapata.....	35
Tabela 6 – Resumo dos valores de profundidade e tempo de onda de todas as situações testadas para o CP1.....	39
Tabela 7– Resumo dos valores de profundidade e tempo de onda de todas as situações testadas para o CP2.....	44
Tabela 8 - Dados experimentais dos entalhes inspecionados para os cabeçotes de 5MHz e sapata de 60°.....	48
Tabela 9 - Dados experimentais de todas as profundidades dos entalhes inspecionados.....	50
Tabela 10 - Dados experimentais de todas as profundidades dos entalhes inspecionados.....	53
Tabela 11 - Dados experimentais de todas as profundidades dos entalhes inspecionados.....	55
Tabela 12 – Dados experimentais de todas as profundidades dos furos inspecionadas.....	60
Tabela 13 - Dados experimentais de todas as profundidades dos furos inspecionadas.....	64
Tabela 14 - Dados experimentais de todas as profundidades dos furos inspecionadas.....	67
Tabela 15 - Dados experimentais de todas as profundidades dos furos inspecionadas.....	70
Tabela 16 - Análise química.....	78
Tabela 17 – Velocidades de propagação das ondas longitudinais (ANDREUCCI, 2002).....	79
Tabela 18 – Velocidades de propagação das ondas transversais (ANDREUCCI, 2002).....	80
Tabela 19 – Valores de atenuação sônica para os principais tipos de materiais (ANDREUCCI, 2002).....	84
Tabela 20 - Impedância Acústica de Alguns Materiais e Acoplantes (ANDREUCCI, 2002).	85

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

2S	Separação dos cabeçotes na superfície da amostra
α	Ângulo de incidência da onda no meio acrílico
a	Tamanho do defeito
A+B	Caminho percorrido pela onda difratada do cabeçote transmissor ao receptor
a_{crit}	Tamanho do defeito crítico
A-scan	Apresentação da tela na forma A-scan
β	Ângulo de refração da onda transversal no meio aço
B-scan	Apresentação da tela na forma B-scan
CP	Corpo de prova
CP1	Corpo de prova 1
CP2	Corpo de prova 2
CP3	Corpo de prova 3
CP4	Corpo de prova 4
d	Profundidade do defeito
d_{inv}	Profundidade do defeito aflorando na superfície oposta a partir da superfície de varredura
END	Ensaio não-destrutivo
h	Espessura da amostra
ID	Zona morta inferior
φ	Ângulo de refração da onda longitudinal no meio aço
K_{IC}	Tenacidade à fratura do material
L	Comprimento do defeito
v_i	Velocidade de propagação da onda longitudinal no acrílico
v_L	Velocidade de propagação da onda longitudinal no aço
v_t	Velocidade de propagação da onda transversal no aço
OD	Zona morta superior
PCS	Probe Center Separation
PE	Pulso eco
POD	Probabilidade de detecção de defeito
R	Cabeçote receptor
S	Ponto equidistante de separação dos cabeçotes
σ	Limite de escoamento do material
SNR	Signal-noise-to-ratio
T	Cabeçote transmissor
t	Tempo do percurso difratado
t_1	Tempo de chegada da difração superior
t_1+t_2	Tempo percorrido pela onda difratada do cabeçote transmissor ao receptor
t_2	Tempo de chegada da difração inferior
t_{bw}	Tempo de chegada da onda de fundo
t_L	Tempo de chegada da onda lateral
TOF	Time of Flight
TOFD	Time of Flight Diffraction
US	Ultra-som
x	Distância do defeito com relação ao ponto equidistante de separação dos cabeçotes

RESUMO

A possibilidade da utilização de sistemas eficientes para inspeção tem despertado o interesse da indústria. Isto porque descontinuidades com diferentes geometrias e orientações podem surgir em um componente durante sua fabricação ou durante seu funcionamento, podendo ocasionar uma falha catastrófica no material, gerando prejuízos à empresa. Métodos tradicionais como o ensaio radiográfico e o ensaio manual por ultra-som não garantem uma inspeção totalmente confiável, devido a suas limitações, principalmente, na monitoração e no dimensionamento destes defeitos. Assim, este trabalho apresenta a técnica TOFD como uma ferramenta eficiente na determinação da profundidade de refletos artificiais usinados em blocos de aço SAE 1022. Visando o desenvolvimento de metodologias que facilitem a compreensão da técnica, este trabalho serve de referência para aplicações mais avançadas, como por exemplo, o monitoramento do crescimento de trincas em serviço e a inspeção de materiais soldados. Quatro corpos de provas com espessuras de, aproximadamente, 25mm, apresentando diferentes geometrias e profundidades de entalhes, foram confeccionados. Fatores como o ângulo da sapata, frequência e separação dos cabeçotes são determinantes para se alcançar a variação ideal para cada tipo de defeito. Os resultados mostram que tanto para defeitos aflorando na superfície de varredura quanto para defeitos aflorando na superfície oposta, o dimensionamento pode ser bem preciso, se a variação adequada para cada caso for selecionada. Além disso, para a análise de defeitos esféricos internos, é possível obter um erro experimental dentro do tolerável para todas as profundidades dimensionadas.

ABSTRACT

The possibility of the use of efficient systems for inspection has attracted the interest of industry. This is because discontinuities with different geometries and orientations may arise in a component during its manufacture or in service and may cause a catastrophic failure in the material, generating damage to the company. Traditional methods as radiographic test and ultrasound manual test does not guarantee an inspection totally reliable, because of their limitations, mainly, in the monitoring and in the sizing of this defects. Then, this work to present TOFD technique as an efficient tool to determine the height of artificial reflectors machined in samples of SAE 1022 steel. To develop methodologies to facilitate the understanding of the technique, this work serves as a reference for more advanced applications, for example, the monitoring of cracks growth in service and the inspection of welded materials. Four samples with thickness around 25mm, having different notches geometries and heights were made. Factors as shoe angle, frequency and probe separation are determinants to reach ideal variation for each defect type. Results show that as for notches breaking in the surface inspected as for notches breaking in the inside surface, opposite the scanned surface, sizing can be precise, if the correct variation was chosen. Besides, for spherical defects inside the material it is possible to obtain an experimental error tolerable for all heights sized.

1 INTRODUÇÃO

Na fabricação de peças ou durante sua utilização em serviço podem surgir descontinuidades que, se não forem inspecionadas ou monitoradas, podem ocasionar uma falha catastrófica no material. Isto pode acarretar grandes prejuízos financeiros para a empresa, que poderiam ser evitados com o investimento em manutenção de equipamentos. Para o caso das indústrias de energia e petróleo, o rompimento de uma tubulação durante operação ocasionaria danos ambientais e sociais. Assim, os ensaios não-destrutivos têm sido utilizados como uma importante ferramenta para avaliar a integridade estrutural de componentes aplicados na indústria.

Dentre as diversas técnicas de ensaios não-destrutivos se destacam o uso do controle manual por ultra-som e o método radiográfico para a localização e dimensionamento de descontinuidades. Entretanto, em inspeções de campo, devido ao desconhecimento freqüente da orientação, tamanho e localização das descontinuidades, verifica-se a necessidade de se recorrer à utilização de diferentes ângulos de incidência e à análise da amplitude dos ecos, resultando num processo lento e subjetivo, o que constitui mais contratempo à utilização do ensaio (BARROS e CALDEIRA, 2004). Além disso, dificuldades encontradas na inspeção de materiais metálicos com o método radiográfico, como a detecção de trincas paralelas ao feixe de raios-x, representam um problema há muitos anos (SILVA et al., 2002). Em virtude disso, torna-se necessário o desenvolvimento de sistemas eficientes de inspeção e monitoramento de componentes e estruturas, tendo uma estimativa da durabilidade destes. Desta forma, com a necessidade destes sistemas serem cada vez mais rápidos e confiáveis, possibilitando uma avaliação precisa do tamanho da trinca, estudos nesta área têm sido feitos e alguns métodos mais avançados têm sido utilizados.

Assim, o uso de técnicas passíveis de automação tem crescido muito nos últimos anos, dentre elas a utilização do TOFD (Time of Flight Diffraction) se destaca no mercado. Recentes pesquisas mostram que a taxa de crescimento médio anual (AAGR) do mercado de TOFD é de 10-20 % maior do que outras técnicas de ensaios não destrutivos (MONDAL, 2000). O método TOFD está ganhando e aumentando popularidade devido à alta probabilidade de detecção (POD), baixa taxa de “chamada falsa”, portabilidade, baixo custo e o mais importante é a precisão intrínseca no dimensionamento de descontinuidades, especialmente na profundidade (GOUJON,

2006). CARNEVAL et al., (2007) mostrou que a técnica TOFD, comparada com outras técnicas não-destrutivas, é a mais apropriada para determinar a profundidade ou a altura de uma trinca. A técnica de intervalo de tempo empregando onda difratada (TOFD – Time of Flight Diffraction) se baseia nas difrações de ultra-som causadas pelas extremidades (superior e inferior) de descontinuidades presentes no material, o que abriu um novo horizonte às inspeções ultra-sônicas. Para isso, pela técnica TOFD é possível incidir no interior do material um feixe de ultra-som inclinado em relação à superfície de inspeção a partir da escolha do ângulo de incidência e frequência do cabeçote adequada para a inspeção proposta.

Este trabalho foi realizado para mostrar a eficiência da técnica TOFD no dimensionamento de refletores artificiais de diferentes geometrias e profundidades, usinados em corpos de provas segundo Norma BS 7706 e também não-padronizados. Isto constitui uma boa referência para avaliar o potencial e a precisão do método, já que a técnica ainda é pouco conhecida no país e os autores não costumam expor com detalhes a essência deste mecanismo. Isto permitirá que seja aplicado em sistemas automatizados, como por exemplo, no monitoramento do crescimento de trincas em tubulações ou em cordões de solda.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

- Apresentar a técnica TOFD como uma ferramenta eficiente no dimensionamento de descontinuidades.

2.2 Específicos

- Dimensionar, pela técnica do tempo de vôo da onda difratada (TOFD), refletores artificiais de diferentes geometrias e profundidades conhecidas usinados em corpos de prova de aço carbono baixa liga.
- Comparar os valores dimensionais reais dos refletores artificiais com os valores obtidos pela difração da onda via técnica TOFD, analisando o erro percentual para cada uma das variações (frequência/ângulo) do ensaio.
- Verificar a variação (frequência/ângulo) mais precisa para cada geometria e profundidade de entalhe utilizado.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 A Técnica TOFD – Tempo de Vôo da Onda Difrata

O tempo de vôo da onda difratada (Time of Flight Diffraction – TOFD) é um método de teste ultra-sônico relativamente novo e foi primeiramente desenvolvido no laboratório de Harwell no final do ano de 1977 por Maurice Silk. Até então, a detecção e dimensionamento de descontinuidades em materiais por técnicas ultra-sônicas utilizava somente a amplitude do eco obtido e relacionava diretamente com a dimensão da descontinuidade.

A mais significativa distinção entre TOFD e os outros métodos de ultra-som é que ele monitora apenas a energia difratada espalhada a partir das pontas de defeitos em vez das energias refletidas. Para isso, dois cabeçotes de ângulo de feixe largos são usados no modo transmissor-receptor. Assim, cabeçotes com uma boa abertura de feixe são usados para que o máximo da área a ser inspecionada seja coberta pelo feixe incidente, conseqüentemente, o volume total pode ser inspecionado usando um passe de varredura simples ao longo da linha de inspeção. Pelo fato da técnica depender da detecção dos sinais difratados espalhados originados nas extremidades das trincas, a medição precisa do tamanho da trinca, localização e orientação são possíveis de ser realizadas.

Para se realizar o ensaio TOFD são requeridos alguns itens básicos:

- Dois cabeçotes de ângulos ultra-sônicos, 45-70° longitudinal, mínimo de 5 MHz de frequência;
- Um porta-sondas (*scanner*) para posicionar/movimentar os cabeçotes;
- Componente a ser inspecionado;
- Placa de aquisição de dados (hardware);
- Computador pessoal e um software para aquisição de dados.

A técnica TOFD usa um transmissor e um receptor colocados sobre a mesma superfície do objeto teste. A separação dos cabeçotes, também chamada de PCS (Probe Center Separation), é ajustada de acordo com a espessura da parede. O *scanner* com os cabeçotes é freqüentemente movido paralelo à região provável de conter defeitos, como

por exemplo, uma linha de solda. Uma onda longitudinal é enviada pelo transmissor em direção ao receptor. O primeiro sinal a chegar é o de uma onda próxima à superfície viajando em direção ao receptor, chamada de onda lateral. Devido à abertura do feixe a onda também alcançará a parede de fundo, sendo que as diferenças no tempo dão uma leitura da espessura de parede precisa e será usado para calibrações com base no tempo, geralmente em micro-segundos. Os dois outros sinais, sinal difratado da ponta da trinca superior e sinal difratado da ponta da trinca inferior, aparecem devido à falta de homogeneidade no material, ou seja, quando algum defeito está presente.

Parâmetros como o tamanho de trinca, posição, localização e/ou forma são relativamente irrelevantes para a técnica TOFD. Os sinais difratados serão enviados para o receptor, assim, as diferenças no caminho de tempo darão uma medição mais precisa da descontinuidade.

Uma onda transversal é também emitida dentro do material que se transforma em uma onda longitudinal (ou vice-versa). Estes sinais são chamados de sinais de conversão de modo. Os sinais de conversão de modo podem dar informações adicionais às indicações detectadas e algumas vezes permitir detectar anomalias bem próximas à superfície, no qual o TOFD utilizando onda longitudinal não detecta com precisão.

BASKARAN et al., (2006) solucionou o problema da superposição do sinal da onda lateral com a extremidade do defeito, quando este é próximo à superfície. Para isso ele utilizou o sinal da onda difratada transversal, também chamada de S-TOFD, e superou esta limitação da técnica. BABY et al., (2002) afirmam que ondas longitudinais são preferidas comparadas às ondas transversais por reduzir a ambigüidade nas fontes de sinais.

A Figura 1 mostra um desenho esquemático do ensaio TOFD identificando as principais ondas presentes durante a inspeção de um componente com um defeito interno.

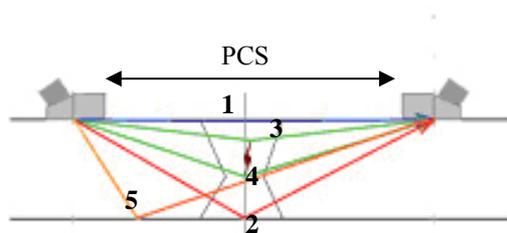


Figura 1 – Desenho esquemático do ensaio TOFD: (1) Onda lateral, (2) Eco de fundo, (3) Difração superior, (4) Difração inferior e (5) Sinais de conversão de modo (FLOTTÉ, 2005).

Nesta dissertação as ondas representadas pelos números 1 a 4 são utilizadas para o dimensionamento, na maioria dos casos. Já, os sinais de conversão de modo, representado pelo número 5, são importantes para espessuras muito finas, no qual as ondas difratadas transversais são utilizadas, ao invés das ondas longitudinais.

Já a Figura 2 apresenta um ecograma típico do ensaio TOFD (A-scan e B-scan) obtido a partir do ensaio de uma amostra isenta de defeitos, com as ondas ultra-sônicas correspondentemente devidamente identificadas. As imagens TOFD costumam ser representadas em escala de cinza (B-scan) e o ecograma apresenta um formato de onda RF para capturar a informação da fase (A-scan). Além disso, as imagens no B-scan podem ser representadas por linhas verticais ou por arcos (semi-círculos), dependendo da geometria da trinca e do modo como é realizada a varredura na superfície da amostra.

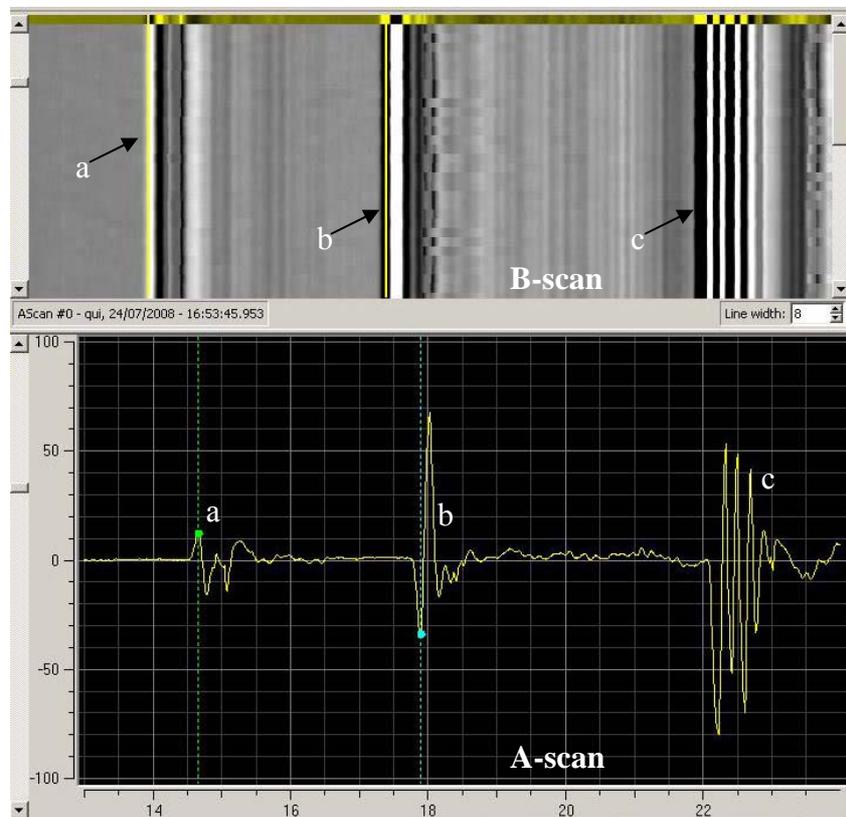


Figura 2 – Ecograma típico do ensaio TOFD para uma amostra isenta de defeitos obtido com o equipamento utilizado nesta dissertação; B-scan (acima) e A-scan (abaixo).

A partir da verificação dos diferentes tempos de chegada das indicações numa representação em escala de cinza, no qual as linhas verticais brancas no B-scan correspondem a sinais de amplitude positiva e as linhas verticais negras correspondem aos sinais de amplitude negativa, temos a seguinte representação TOFD:

1. O primeiro sinal será o de uma onda “*creeping*”, freqüentemente chamada de “onda lateral”, constituindo um sinal de uma onda que se propaga na superfície, com o mais curto tempo de chegada. Passará a constituir o “zero” (indicação a) da Figura 2.
2. Uma onda longitudinal chega por reflexão na superfície oposta (letra b) da Figura 2.
3. Qualquer outra indicação que ocorre entre (a) e (b) corresponderá aos ecos difratados longitudinais das extremidades de discontinuidades presentes no material. Estes sinais são identificados pelas suas fases, diferenciadas no A-scan e no B-scan. As extremidades, superior e inferior das discontinuidades, apresentam uma fase reversa.
4. Aparecem ainda outras indicações, após o eco de fundo, correspondentes à emissão, reflexão e difração de ondas transformadas, com tempos de chegada superiores. Como, por exemplo, a (letra c) da Figura 2 indica o eco de fundo da primeira onda transversal obtida por conversão de modo após reflexão.

Todas as indicações são importantes na detecção, interpretação e dimensionamento de discontinuidades presentes em um componente.

Assim, é fundamental conhecer cada tipo de onda que é gerada a partir de uma onda longitudinal incidindo em um defeito, conforme mostra a Figura 3.

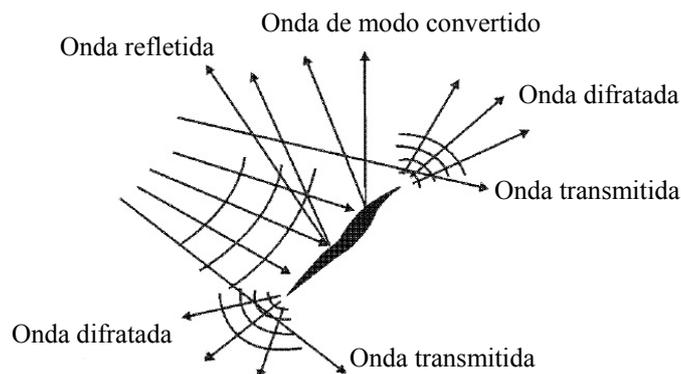


Figura 3 – Diagrama esquemático mostrando os tipos de onda gerada a partir de uma onda longitudinal incidindo em um defeito (SILVA et al., 2002).

Deste modo, tem-se um diagrama geral que mostra todas as ondas de interesse para a técnica. Sabe-se então que as ondas difratadas surgem nas extremidades do

defeito e que as ondas transmitidas chegarão até o fundo do material, gerando o eco de fundo.

MONDAL (2000) destaca que o método TOFD avalia ecos difratados, que são 20 dB menores do que os ecos refletidos. Além disso, as ondas longitudinais difratadas têm uma velocidade diferente das ondas longitudinais refletidas.

Além disso, BASKARAN et al., (2006) mostrou que o método tradicional usa as ondas longitudinais na detecção de defeitos, em vez das ondas transversais, devido ao maior coeficiente de difração e usa a informação entre a onda lateral longitudinal e a onda longitudinal refletida no fundo. Assim, quando uma onda longitudinal incidente encontra um defeito, a onda é difratada como onda difratada longitudinal e onda difratada transversal. Já que a velocidade da onda transversal é menor (metade da velocidade da onda longitudinal), a onda difratada longitudinal alcança o receptor primeiro seguido pela onda difratada transversal. Além disso, o método TOFD tem sido muito aplicado em seções espessas (>15mm), já que o modo de conversão e a superposição de sinais afetam a interpretação de dados em estruturas de parede mais fina. Nesses casos, a onda difratada transversal pode ser utilizada para melhor identificação da descontinuidade.

MOLES (2008) abordou os três principais tipos de defeitos estudados nesta dissertação, classificando da seguinte maneira: defeito aflorando na superfície do ensaio, defeito aflorando na superfície oposta ao ensaio e defeito no interior do material.

A Figura 4 resume estas situações, representando os tipos de ondas (numeradas de 1 a 3) que surgem (ou desaparecem/enfraquecem) para cada caso.

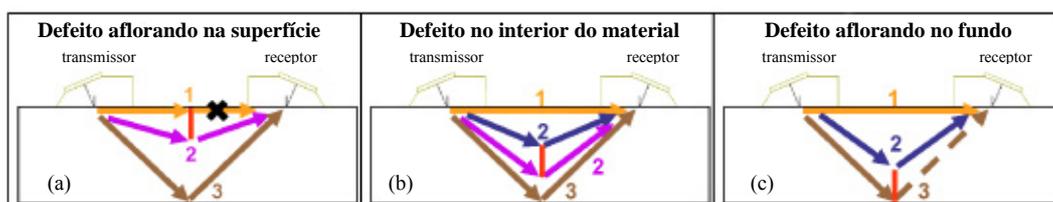


Figura 4 – Diagrama esquemático mostrando os três principais tipos de defeitos detectados pela técnica TOFD. (1) onda lateral, (2) eco(s) da descontinuidade e (3) eco de fundo. (DARMON et al., 2008)

Na seqüência, estas situações estão mais detalhadas, no qual cada um dos três tipos é representado por letras distintas (a, b e c), referentes à identificação mostrada na Figura 4.

3.1.1 Defeito aflorando na superfície de varredura do ensaio

Defeitos aflorando na superfície do ensaio mostram perturbações na onda lateral. O defeito interrompe a onda lateral, de acordo com a situação (a) da Figura 4, então o TOFD pode ser usado para determinar se o defeito está aflorando na superfície ou não. O sinal mais baixo pode ser usado para medir a profundidade do defeito. A Figura 5 revela, na forma de A-scan e B-scan, o tipo de ecograma gerado quando se tem um defeito aflorando na superfície.

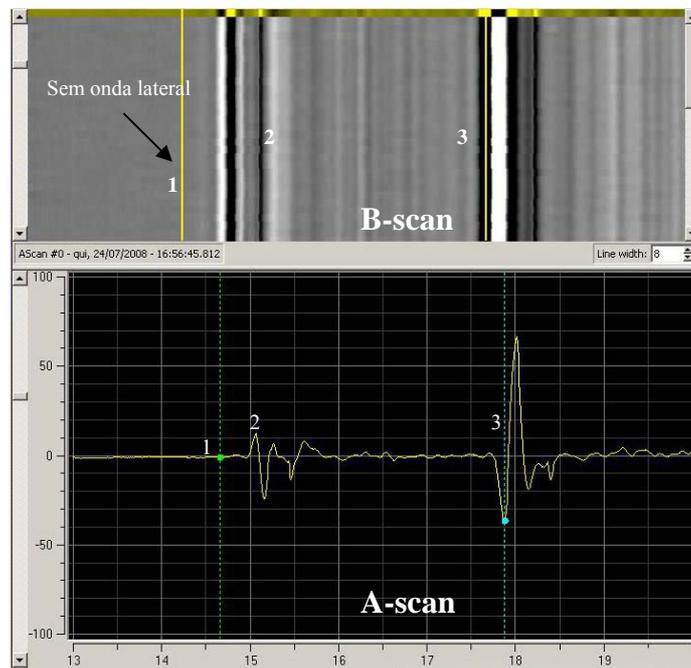


Figura 5 – Ecograma para um defeito aflorando na superfície de varredura do ensaio. (1) onda lateral, (2) descontinuidade e (3) eco de fundo; A-scan (abaixo) e B-scan (acima).

Assim, a onda lateral, representada pelo número 1, é interrompida na região do defeito. Já a descontinuidade, representada pelo número 2, aparece no A-scan com três picos, com a seqüência de cores BRANCO, PRETO e BRANCO no B-scan, para este caso. Se o defeito não está aflorando na superfície, isto é, é apenas sub-superficial, a onda lateral não será interrompida. Se o defeito está próximo da região sub-superficial e é raso (poucos milímetros de profundidade), a onda lateral não será interrompida, porém será provavelmente invisível ao TOFD. O eco de fundo neste caso não sofre qualquer alteração na amplitude do sinal.

3.1.2 Defeito aflorando na superfície oposta à varredura do ensaio

Este tipo de defeito, conforme situação (c) da Figura 4, mostra nenhuma interrupção na onda lateral, um sinal próximo à parede de fundo (extremidade da trinca) e uma interrupção ou enfraquecimento do sinal de fundo (representado pela linha pontilhada, identificada pelo número 3, que chega ao receptor). O sinal da ponta da trinca pode ser usado para medir a profundidade do defeito. Além disso, o ecograma é similar ao que ocorre nos materiais soldados, quando se tem falta de penetração na junta (MOLES, 2008). Na Figura 6 tem-se a representação A-scan e B-scan desta situação.

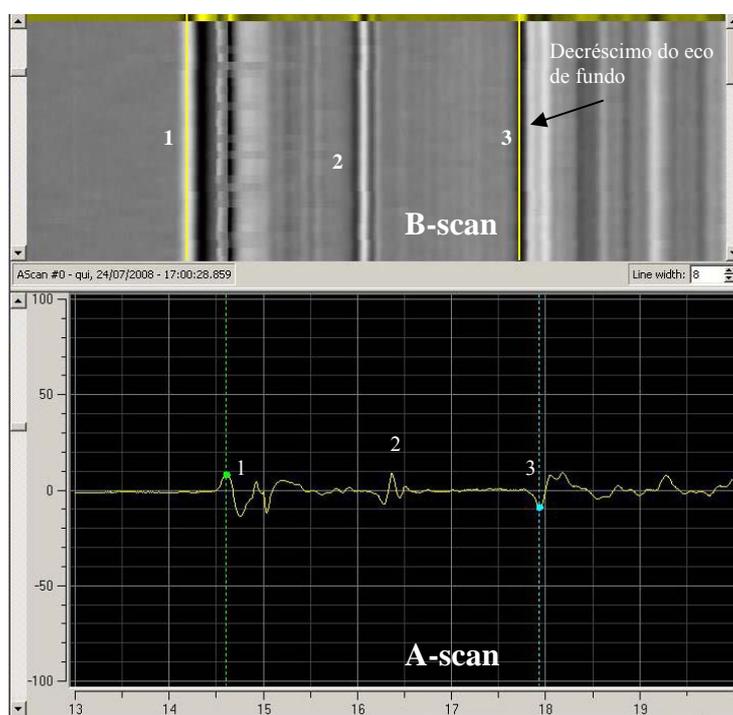


Figura 6 – Ecograma para um defeito aflorando na superfície oposta à varredura do ensaio. (1) onda lateral, (2) descontinuidade e (3) eco de fundo; A-scan (abaixo) e B-scan (acima).

Importante notar que a descontinuidade, representada pelo número 2, aparece no A-scan também com três picos, porém resultando numa seqüência de cores inversa, comparada ao defeito que aflora na superfície de varredura do ensaio, que é PRETO, BRANCO e PRETO na representação B-scan. Nota-se o enfraquecimento do sinal de fundo, representado pelo número 3, comparada com a Figura 5.

3.1.3 Defeitos no interior do material

Defeitos no interior do material mostram sinais da onda lateral e do eco de fundo de maneira completa, somados aos sinais de difração da parte superior e inferior do defeito. Quando ocorre falta de fusão em materiais soldados, o ecograma gerado é similar a este caso. Adicionalmente, CARVALHO A.A. et al., (2008), comparando diferentes técnicas de ensaios não-destrutivos, após inserir defeitos artificiais em uma amostra de tubo API 5L X70 com 19mm de espessura, verificou que a técnica TOFD alcança uma probabilidade de detecção de 100% para defeitos do tipo falta de fusão e 93,7% para defeitos do tipo falta de penetração, o que comprova a viabilidade da técnica para estes casos. Na Figura 7 tem-se a representação A-scan e B-scan desta situação de defeitos intrínsecos no material.

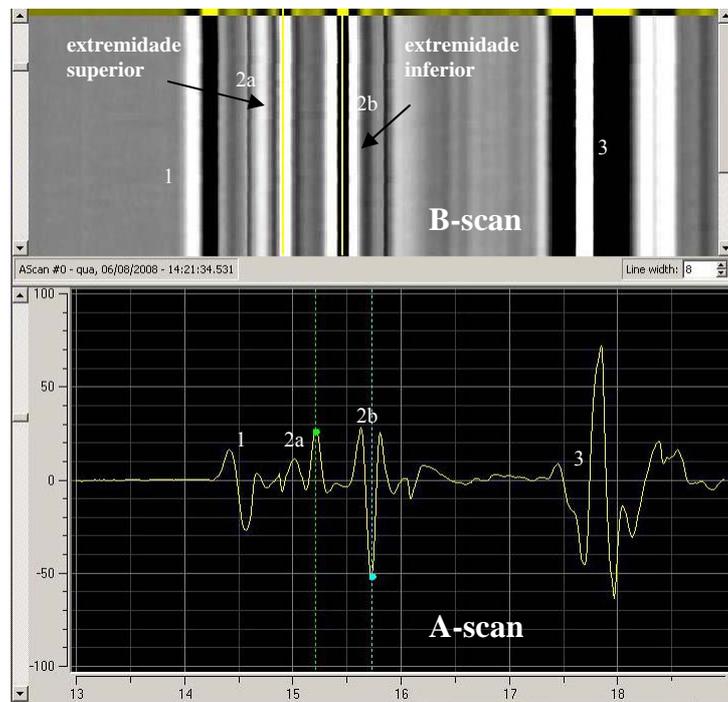


Figura 7 – Ecograma para um defeito que se encontra no interior do material. (1) onda lateral, (2a) extremidade superior da descontinuidade, (2b) extremidade inferior da descontinuidade e (3) eco de fundo; A-scan (abaixo) e B-scan (acima).

Assim, o tamanho e a profundidade das trincas podem ser facilmente medidos a partir destas indicações. Existe uma inversão de fase: eco superior aparece no B-scan na seqüência de cores PRETO-BRANCO-PRETO enquanto o eco inferior aparece como sendo BRANCO-PRETO-BRANCO.

3.1.4 Cálculo de tamanho e profundidade de defeitos no interior do material

MONDAL (2000) demonstrou esse procedimento, utilizando o Teorema de Pitágoras para calcular o tamanho do defeito e a profundidade a partir da superfície de inspeção. Assim, deve-se supor que o defeito é orientado em um plano perpendicular a ambas as superfícies de inspeção e a linha que unem transmissor e receptor ao longo da superfície de inspeção. A Figura 8 apresenta um bloco de aço com todos os parâmetros dimensionais identificados, supondo que o defeito esteja localizado no meio do caminho entre o transmissor e o receptor.

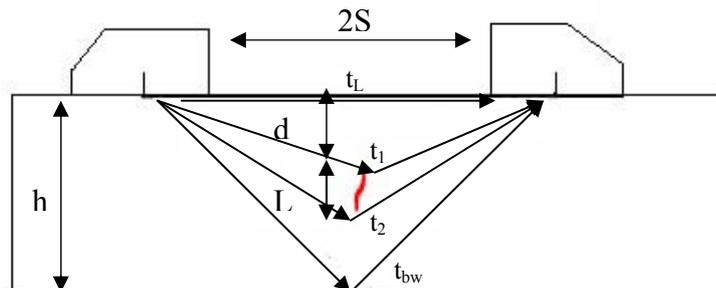


Figura 8 – Parâmetros dimensionais para o ensaio de TOFD

Assim, a posição do defeito abaixo da superfície de inspeção é chamada de profundidade, representada pela letra “ d ” (mm). Já a distância de separação dos dois cabeçotes é dada por “ $2S$ ” (mm), o comprimento do defeito é dado pela letra “ L ” (mm) e a espessura da chapa de aço é representada pela letra “ h ” (mm). Os tempos de chegada de cada onda (μs) são identificados na Figura 8 como: t_L = tempo de chegada da onda lateral, t_1 = tempo de chegada da difração superior, t_2 = tempo de chegada da difração inferior e t_{bw} = tempo de chegada da onda de fundo. A tabela 1 mostra a fórmula utilizada para o cálculo de cada um dos principais parâmetros do ensaio TOFD.

Tabela 1 – Fórmulas utilizadas para definir os principais parâmetros do ensaio.

Parâmetro	Equação
Tempo de chegada da onda lateral	$t_L = 2S \div v_L$
Tempo de chegada da difração superior	$t_1 = 2 \cdot \sqrt{(d^2 + S^2)} \div v_L$
Tempo de chegada da difração inferior	$t_2 = 2 \cdot \sqrt{[(d+L)^2 + S^2]} \div v_L$
Tempo de chegada da onda de fundo	$t_{bw} = 2 \cdot \sqrt{h^2 + S^2} \div v_L$
Valor da profundidade “d” do defeito	$d = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{(v_L^2 \cdot t_1^2 - 4 \cdot S^2)}$
Valor do tamanho do defeito “L”	$L = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{(v_L^2 \cdot t_2^2 - 4 \cdot S^2)} - d$
Valor de separação dos cabeçotes “2S”	$2S = \sqrt{(v_L^2 \cdot t_{bw}^2 - 4 \cdot h^2)}$

Logo, a velocidade de propagação da onda longitudinal no aço é dada por “ v_L ” (m/s). Deste modo, tendo todas as informações necessárias para a realização dos cálculos, é possível determinar os tempos de chegada de cada um dos picos (μs). Além disso, se o interesse for dimensionar o defeito, pode-se determinar também o valor da profundidade, do tamanho e, até mesmo, a separação dos cabeçotes na superfície do ensaio. Nestes casos o valor é dado em mm.

3.1.5 Trincas abertas à superfície

BARROS e CALDEIRA (2004) demonstraram, conforme a Figura 9, que o percurso difratado na extremidade da descontinuidade (A+B) é mínimo, quando as sondas emissoras e receptoras estão equidistantes da descontinuidade, isto é, quando $x=0$. Para isto basta diferenciar (A+B) em ordem a x, o qual tem uma raiz em $x=0$. Assim, pelo sinal da derivada à esquerda ou à direita ou calculando a segunda derivada, prova-se que na realidade o percurso (A+B) é mínimo.

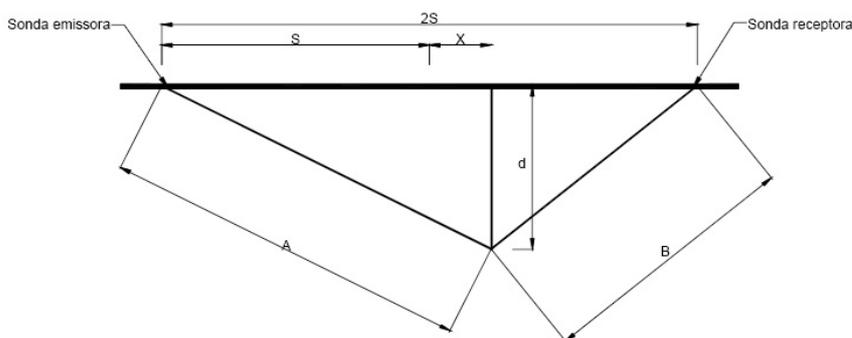


Figura 9 – Percurso difratado (A+B) na extremidade da descontinuidade (BARROS e CALDEIRA, 2004).

O termo “2S” representa na Figura 9 a separação dos cabeçotes (PCS), sendo que “S” é o ponto equidistante entre as sondas (x=0) e “d” a profundidade do defeito.

Desta maneira, a profundidade da descontinuidade (d) é dada pela seguinte expressão:

$$d = \sqrt{[(vt)^2 \div 4 - s^2]} \quad [1]$$

onde:

d = profundidade (mm)

v = velocidade da onda longitudinal (m/s)

t = tempo do percurso difratado (A+B) (μ s)

2S = separação entre sondas (mm)

Como complemento, CHARLESWORTH e TEMPLE (2001) estudaram a influência do desalinhamento das sondas na detecção e dimensionamento de descontinuidades. A Figura 10 esquematiza diferentes posicionamentos da extremidade de uma descontinuidade. Para as várias posições do par de sondas relativamente ao defeito, a sua extremidade será posicionada numa elipse.

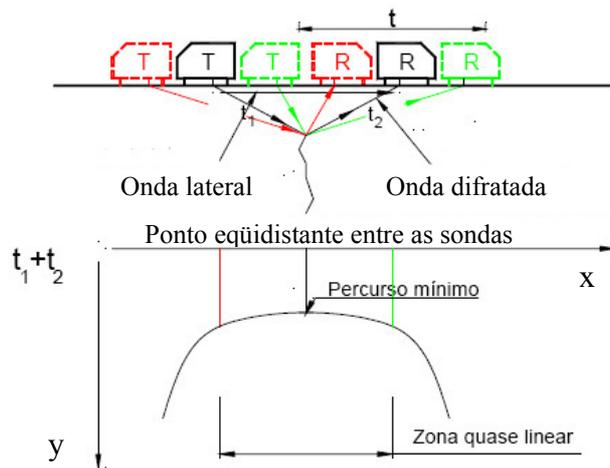


Figura 10 – Representação da zona quase linear existente entre as duas sondas para detectar a difração de uma descontinuidade (BARROS e CALDEIRA, 2004).

O eixo x no gráfico determina o ponto equidistante das duas sondas e o eixo y determina o tempo da onda difratada ($t_1 + t_2$). Assim, são mostradas três montagens distintas utilizando os cabeçotes transmissores (T) e os receptores (R). A primeira montagem, representada pela cor preta, no qual o percurso da onda difratada é mínimo

$(t_1 + t_2)$, equivale à posição equidistante ao defeito. A segunda, representada pela cor verde, equivale ao posicionamento das sondas deslocadas para a direita (defeito próximo ao cabeçote transmissor). Já a terceira, representada pela cor vermelha, equivale ao posicionamento das sondas deslocadas para a esquerda (defeito próximo ao cabeçote receptor). Então, não é necessário as sondas estarem equidistantes ao defeito para que este seja detectado, ou seja, existe uma “*zona quase linear*”, delimitada pelas três montagens, que permite que a descontinuidade seja detectada em posições deslocadas. Assim, se a extremidade da descontinuidade estiver posicionada nesta zona, o erro é mínimo.

3.1.6 Medição de profundidade e altura (via software)

Uma alternativa mais prática é a utilização dos recursos do software para realizar automaticamente os cálculos dos parâmetros, através dos modelos matemáticos que foram implantados no aplicativo. Para isso utilizam os *gates* (*gate 1* e *gate 2*) do aparelho de ultra-som, no qual, a partir da posição em que eles são dispostos na tela, temos um resultado de distância através da subtração entre eles. Por exemplo, para calibrar a espessura de uma amostra, o *gate 1* deve ser posicionado na onda lateral e o *gate 2* no pico do eco de fundo da onda longitudinal. Logo, a diferença entre eles é o valor da espessura. Normalmente, os *gates* nos dão valores em μs e o software converte a escala de tempo em escala de distância, nos fornecendo assim valores em *mm*.

Seguindo o exemplo dos três tipos de defeitos abordados neste trabalho, FLOTTÉ (2005) adotou o seguinte procedimento para realizar estas medições mencionadas:

1. Para descontinuidades aflorando na superfície de varredura do ensaio: altura determinada pela medição da distância entre a superfície do ensaio e o sinal da difração da ponta inferior da indicação.
2. Para descontinuidades aflorando na superfície oposta à varredura do ensaio: altura determinada pela medição da distância entre a superfície oposta ao ensaio e o sinal da difração da ponta superior da indicação.
3. Para descontinuidades no interior do material: altura determinada pela diferença na profundidade entre a difração da ponta superior e da ponta inferior. Para indicações exibindo variação da profundidade ao longo de seu comprimento, a

altura é determinada na posição ao longo do comprimento da descontinuidade onde a diferença é a maior.

FLOTTÉ (2005) demonstrou que existem três métodos (Figura 11) para posicionar adequadamente os *gates* no dimensionamento via software, que servem como roteiro para um ensaio de TOFD, seja qual deles for adotado na interpretação do ecograma obtido.

Os métodos são descritos na seqüência:

1. Pela medição do tempo de trânsito do sinal crescente ou decrescente: *gate 1* e *gate 2* são posicionados ambos no início de primeiro pico ou vale do sinal da onda (por exemplo, *gate 1* na onda lateral e *gate 2* no eco de fundo).
2. Pela medição do tempo de trânsito do primeiro máximo: *gate 1* posicionado no primeiro máximo e *gate 2* no primeiro mínimo.
3. Pela medição do tempo de trânsito da amplitude do pico: *gate 1* posicionado no pico de amplitude negativa (escala preta no B-scan) e *gate 2* posicionado no pico de amplitude positiva (escala branca no B-scan).

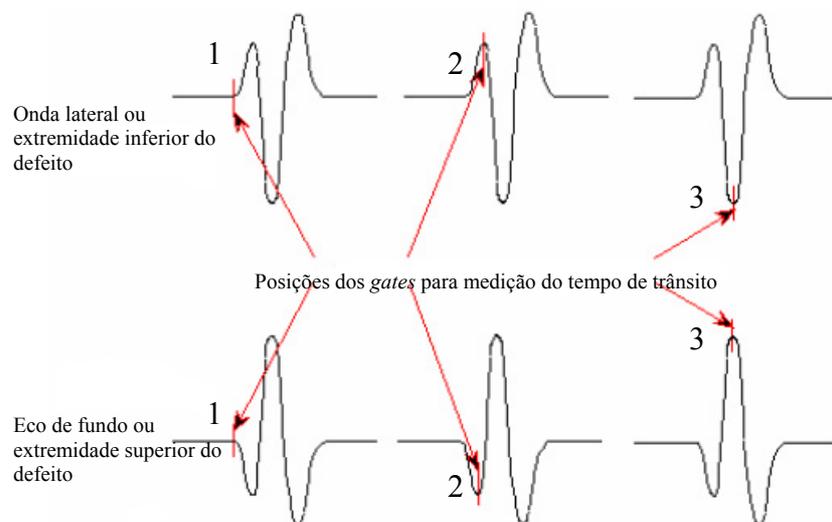


Figura 11 – Métodos 1, 2 e 3 para posicionamento adequado dos *gates*. (FLOTTÉ, 2005).

É importante manter esta inversão de fase no posicionamento dos *gates*, ou seja, quando o *gate 1* for posicionado no pico de amplitude negativa (-) o *gate 2* deve ser posicionado no pico de amplitude positiva (+), e vice-versa.

Para a calibração do ensaio TOFD, é importante considerar a espessura do material que se quer inspecionar. Quando a peça analisada tem uma espessura de, no máximo, 50mm, um par de cabeçotes é suficiente para a confiabilidade do método (uma

zona). Já, para espessuras de material entre 50mm e 100mm, são necessários dois pares de cabeçotes (duas zonas) para efetuar a inspeção (ENV 583-6, 2000).

De acordo com a tabela 2, à medida que cresce a espessura da amostra, a frequência requerida diminui e o diâmetro do cristal piezolétrico no cabeçote aumenta. A linha com os caracteres destacados em negrito (tabela 2) indica os parâmetros utilizados que serviram como guia para esta dissertação.

Tabela 2 - Guia de calibração para ensaio TOFD (ENV 583-6, 2000).

Espessura "h" [mm]	Número de zonas	Profundidade da zona [mm]	f [MHz]	Ângulo do feixe [°]	Diâmetro do cristal [mm]	Ponto de intersecção dos feixes
6 - 10	1	0 - h	15	70	2 - 3	2/3 h
10 - 15	1	0 - h	10 - 15	70	2 - 3	2/3 h
15 - 35	1	0 - h	5 - 10	60 - 70	2 - 6	2/3 h
35 - 50	1	0 - h	3 - 5	60 - 70	3 - 6	2/3 h
50 -100	2	0 - ½ h	3 - 5	60 - 70	3 - 6	1/3 h
		½ h - h	3 - 5	45 - 60	6 -12	5/6 h ou h para 45 °

Importante destacar que a máxima frequência permitida para cada uma das faixas de espessura deveria ser priorizada para fins de ensaio. Além disso, frequências mais baixas podem ser usadas se a sensibilidade necessária não puder ser alcançada com frequências mais altas. A tabela 3 mostra o tipo de efeito que gera nos resultados quando variamos a frequência ou o diâmetro do cabeçote:

Tabela 3 – Efeito da variação da frequência do cabeçote para o ensaio TOFD (BS 7706, 1993).

Aumentando a frequência do cabeçote	Diminuindo a frequência do cabeçote
comprimentos de ondas mais curtos;	aumenta o comprimento de onda;
aumenta a resolução da análise;	diminui a resolução da análise;
tempo de duração da onda lateral mais curto (menos intensa);	aumenta o tempo de duração e a intensidade da onda lateral;
diminui a divergência do ângulo incidente;	aumenta a divergência do ângulo incidente;
aumenta o comprimento do campo próximo;	diminui o comprimento do campo próximo;
diminui a penetração (atenuação mais alta);	aumenta a penetração;

Já, no que se refere à influência do diâmetro do cristal do cabeçote na inspeção, temos as seguintes afirmações, de acordo com a tabela 4:

Tabela 4 – Efeito da variação do diâmetro do cristal do cabeçote para o ensaio TOFD (BS 7706, 1993).

Diminuindo o diâmetro do cristal do cabeçote	Aumentando o diâmetro do cristal do cabeçote
diminui <i>output</i> ;	aumenta <i>output</i> ;
aumenta a divergência do ângulo;	diminui a divergência do feixe;
diminui o comprimento do campo próximo;	aumenta o comprimento do campo próximo;
diminui a área de contato, ponto de emissão mais próximo da frente da sapata.	aumenta a área de contato.

No ensaio de TOFD é fundamental direcionar o feixe sônico para a região de interesse no material a ser inspecionado, ou seja, aquela no qual a probabilidade de encontrar um defeito é maior. De acordo com a (ENV 583-6, 2000), para espessuras de até 50 mm, utiliza-se uma convenção inicial de direcionar o feixe em 2/3 da espessura do material, quando não se tem idéia da localização do defeito na amostra.

Para espessuras maiores do que 50 mm, deve-se dividir a profundidade em duas zonas iguais (zona 1 e zona 2), sendo que em cada uma deve ser focalizado um par de cabeçotes TOFD. Assim, nessas condições, o primeiro par de cabeçotes deve ser focalizado, com uma separação de cabeçotes menor (PCS 1), à 1/3 da espessura do material (foco na zona 1). Já o segundo par de cabeçotes, com uma separação maior (PCS 2), deve ser focalizado a 5/6 da espessura do material (foco na zona 2). A Figura 12 apresenta este caso.

Resumindo, a separação ideal dos cabeçotes (PCS), para determinada inspeção, deve ser ajustada a fim de:

- direcionar o feixe ultra-sônico na área de interesse da amostra;
- assegurar que a energia difratada adequada a partir das pontas da trinca seja obtida;
- manter uma resolução aceitável.

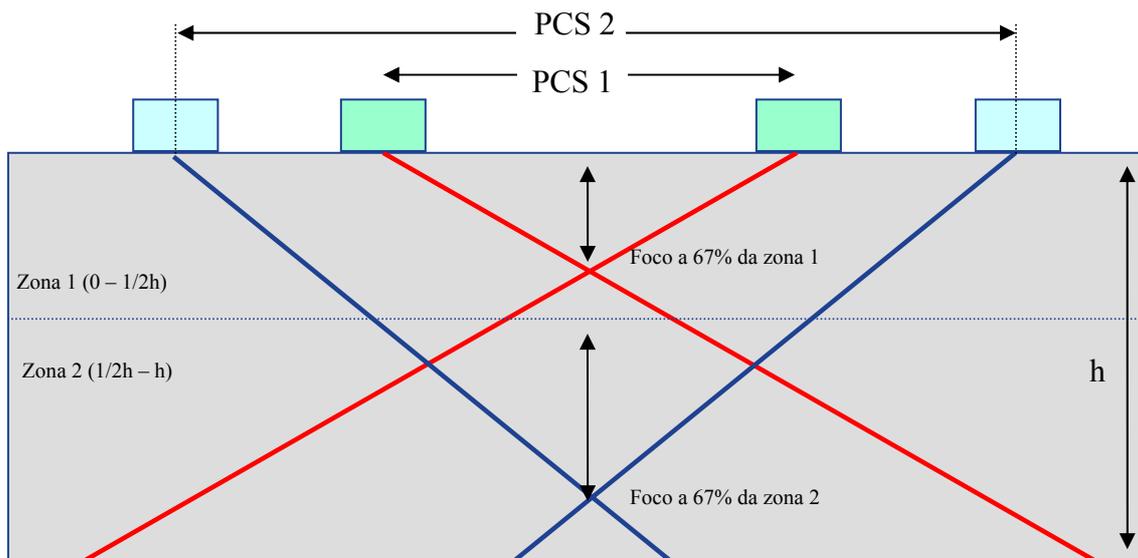


Figura 12 - Exemplo de arranjo dos cabeçotes para duas zonas (acima de 50 mm de espessura h) (SZAFARSKA, 2008)

3.1.7 Detecção de trincas próximas à superfície

A norma BS 7706 afirma que a probabilidade de detectar trincas próximas à superfície da amostra é aumentada se os cabeçotes são trazidos para perto um do outro. Alternativamente, a detecção de trincas próximas à parede de fundo da amostra é favorecida se as trincas estão próximas à linha de centro do cabeçote. Para outros tipos de trincas, a detecção pode ser mais eficiente a partir do aumento da separação dos cabeçotes.

Se a detecção com estas medidas não for efetivada existem outras opções que podem ser avaliadas, como:

- o uso de cabeçotes com um pulso mais curto;
- o uso de técnicas de análise especial para remover a onda lateral ou o eco de fundo;
- o uso de uma frequência de transdutores mais alta;

3.1.8 Calibração do ganho da onda difratada

Antes de se realizar qualquer inspeção é importante a calibração do equipamento. Segundo a Norma Britânica BS 7706, existem quatro métodos recomendados para estabelecer a calibração do ganho, sendo eles:

1. Calibração de ganho usando sinais difratados a partir de rasgos ou entalhes
2. Calibração do ganho usando amostra de trinca representativa
3. Calibração do ganho usando furos passantes
4. Calibração do ganho usando ruído do grão

A escolha de quaisquer destes métodos de calibração é o suficiente para avaliar o comportamento do cabeçote utilizado na detecção da difração de refletores artificiais. Os mais utilizados na prática são os três primeiros métodos, sendo que fica a critério do operador selecionar qualquer um deles de acordo com o trabalho a ser realizado, o que dará uma boa base para realizar uma inspeção determinada. É claro que cada uma das técnicas tem suas restrições que devem ser respeitadas para a eficiência da análise. No caso desta dissertação, foi selecionada a primeira, que utiliza sinais difratados a partir de rasgos ou entalhes, que será melhor detalhada na seqüência.

Calibração de ganho usando sinais difratados a partir de rasgos ou entalhes

O uso de difratores artificiais na forma de rasgos usinados por eletroerosão ou entalhes em 'V' pode fornecer um meio apropriado de determinação de calibrações do ganho. Para o caso de rasgos usinados por eletroerosão é recomendado que a largura do rasgo máximo não deva ser mais do que a quarta parte do comprimento de onda ultrassônico a ser utilizado. Idealmente, blocos de calibração deveriam ser construídos com uma espessura igual a da tarefa de inspeção a ser realizada e de um material similar.

Quando apenas um par de cabeçotes for necessário (espessuras menores do que 50mm), é recomendada que a calibração na forma de rasgo ou entalhe seja usinada até uma profundidade máxima igual a metade da espessura do bloco. Já quando mais de um par for utilizado (espessuras maiores do que 50mm), é recomendado que uma série de calibração de entalhes seja produzida com profundidades máximas no ponto de intersecção dos eixos do feixe para cada distância de cabeçote individual.

Para calibrar o ganho, o par de cabeçotes é posicionado simetricamente em ambos os lados do entalhe tal que um sinal difratado seja obtido a partir da ponta do entalhe. Deveria ser notado que isso requer que o entalhe seja aberto na superfície de varredura do ensaio em vez de na superfície oposta. Se o último caso fosse usado o sinal conteria um componente refletido indesejado além do sinal difratado. Usando um display A-scan não retificado, o ganho do sistema pode ser ajustado tal que o sinal

difratado a partir do entalhe tenha um pico apropriado para a amplitude do eco (por exemplo, 80% de altura na tela cheia) e isso deve ser levado em conta.

3.1.9 Vantagens e limitações da técnica

Dentre as vantagens da técnica TOFD estão as seguintes:

- A detecção de defeito *não depende da orientação do defeito*, ao contrário da técnica de ultra-som convencional (pulso eco).
- Como a radiografia é mais apropriada para detecção de descontinuidades volumétricas (ex: porosidade e escória) em materiais de espessura e densidade moderada e o ultra-som tem a tendência de detectar mais facilmente descontinuidades planares (ex. falta de fusão e trincas) devido à boa refletividade do feixe acústico incidente, o TOFD associa estas duas características, sendo extremamente sensível tanto para *descontinuidades planares como para não-planares*.
- A altura do defeito pode ser exatamente determinada, portanto é mais apropriado para *monitoração de crescimento ou mudanças de defeitos conhecidos*.
- Os *resultados da inspeção são imediatamente disponíveis*, por apresentar uma gravação permanente.
- Devido à alta velocidade de ensaio, os custos são menores do que para o método radiográfico para espessuras de parede acima de 25 mm. É possível realizar varreduras com uma velocidade de centenas de milímetros por segundo.
- O TOFD economiza custos, principalmente, se aplicado antes da operação do componente a ser inspecionado, já que é possível distinguir os defeitos que ocorrem nesta etapa dos que ocorrem em serviço. Além disso, a unidade pode estar distante da produção, já que é um ensaio seguro.
- Alta probabilidade de detecção de defeito (POD).
- O método TOFD pode ser usado para observar e registrar degradação microscópica causada pela fadiga e corrosão-fadiga – tem provado ser possível quantificar micro-fissuras causadas pela dilatação do cobre através da contaminação do eletrodo de solda, antecipando-se à falha do mecanismo.

- O volume total da zona crítica pode ser inspecionado usando um simples passe uniaxial ao longo do comprimento da solda.
- O TOFD comparado à radiografia é mais seguro, principalmente, por não utilizar radiações nocivas ao meio-ambiente.

Em contrapartida, a principal limitação do TOFD são as zonas mortas superior e inferiores (OD e ID, respectivamente), nos quais os defeitos são tipicamente não detectáveis. Estas duas zonas são localizadas próximas a onda lateral e próxima a reflexão de fundo, respectivamente. A profundidade destas duas zonas mortas depende da configuração TOFD, frequência e amortecimento. Para um cabeçote de 7,5 MHz, por exemplo, a zona morta superior (OD) é em torno de 3 mm, enquanto a zona morta inferior (ID) é em torno de 1 mm (MOLES, 2008).

A extensão deste mascaramento, ou seja, a profundidade de descontinuidades onde as indicações não são detectadas depende de três fatores. (BARROS E CALDEIRA, 2004):

1. Comprimento do pulso;
2. Separação entre sondas;
3. Frequência e amortecimento das sondas.

Assim, quanto menor forem os dois primeiros fatores e maior for o terceiro fator, diminuiremos a influência das zonas mortas e aumentaremos o POD nas zonas em consideração.

Para superar esta limitação aplicam-se normalmente duas soluções:

1. Ensaio complementar para a detecção de descontinuidades superficiais (ex. Partículas Magnéticas ou Líquidos Penetrantes) ou utilizando um cabeçote de onda *creeping*.
2. Algoritmos de anulação por software da onda lateral ou do eco de fundo.

Além disso, a técnica TOFD apresenta limitações consideráveis em materiais de grão grosseiro (BARROS E CALDEIRA, 2004), como por exemplo, o aço inox austenítico e ligas de inconel (níquel-cromo-ferro). Isto se deve ao tamanho de grão e aos seus contornos, que são responsáveis não só pela difração, mas também pela

reflexão, produzindo sinais (ruídos) que mascaram e podem ser confundidos com indicações relevantes, prejudicando a confiabilidade do ensaio.

A técnica TOFD apresenta algumas outras limitações que devem ser consideradas na realização do ensaio, a fim de garantir a confiabilidade dos resultados, dentre elas:

1. Nível de sensibilidade: Se a sensibilidade do instrumento (ganho) atinge um valor muito baixo, a imagem do TOFD não mostra nenhum eco difratado. Se a sensibilidade do instrumento for muito alta, a imagem TOFD mostra uma grande quantidade de ecos em virtude do ruído, o que prejudica a interpretação do ecograma, podendo mascarar o resultado.
2. Uma desvantagem do TOFD é que o ganho deve ser muito alto, o que produz um eco de parede de fundo muito alto, o que justifica o fato de não ser apropriado para materiais de grão grosseiro.
3. As frequências de cabeçotes abaixo de 5 MHz não são aplicáveis.
4. As fronteiras da trinca deveriam ser “agudas”, para intensificar o eco da difração, porém isso nem sempre acontece.
5. Excessiva sensibilidade às pequenas discontinuidades, o que pode conduzir a um dispêndio de tempo na análise de indicações não relevantes.
6. Relação sinal/ruído (SNR = Signal-Noise-to-Ratio) é baixa, principalmente, em materiais de grãos grosseiros no qual o ruído é elevado.
7. Não existe ainda um critério de aceitação consolidado. Nos últimos anos apareceram dois critérios de um modo mais concreto: ASME Code Case 2235-4 (Estados Unidos) e um resultante de um projeto denominado KINT (Holanda). O mais recente, na Europa, é o TOFDPROOF (FLOTTÉ, 2005). Na prática, tem-se utilizado a Norma BS 7706 como guia para a calibração da técnica.

Para obter 100% de cobertura, o TOFD deveria ser combinado com a técnica pulso eco. O pulso-eco tem uma alta taxa de detecção de defeito para defeitos aflorando na superfície e próximos a ela, mas é pobre na detecção de defeitos internos.

Convenientemente, TOFD e PE são complementares; os pontos fortes do pulso-eco são pontos fracos do TOFD e vice versa. As técnicas TOFD e pulso-eco combinadas são usadas para inspeções de tubos e soldas em geral (MOREIRA and GINZEL, 2003), com as vantagens de ambos, o que será escopo de desenvolvimento futuro.

Além disso, MOLES (2008) enumerou problemas típicos em varreduras (scans) utilizando a técnica TOFD que afetam a qualidade da imagem (B-scan), dentre eles:

- Níveis de ganho no equipamento incorretos (muito alto ou muito baixo);
- Posições dos *gates* incorretas;
- Separação dos cabeçotes incorreta;
- Acoplamento insuficiente;
- Interferência de ruído.

3.1.10 Condições superficiais da amostra

Segundo a norma BS 7706, a condição da superfície inspecionada da amostra pode afetar a precisão dos resultados obtidos. Portanto, superfícies usinadas, laminadas ou levemente corroídas não são problemas para o uso desta técnica. Contudo, superfícies repletas de pite, altamente corroídas ou soldadas apresentam normalmente um pobre acoplamento em pelo menos uma parte da área a ser inspecionada.

A condição de superfície oposta à da varredura da amostra é quase insignificante para essa técnica contanto que limites de bom senso sejam aplicados. Portanto, a distância de uma extremidade da trinca pode ser localizada com uma precisão melhor do que 1 mm com relação à superfície inspecionada, mas isso não se aplica para sua distância a partir da superfície oposta se essa estiver repleta de pites. Contudo, a posição do eco da parede de fundo fornece uma estimativa precisa da espessura local da amostra.

3.1.11 Aplicações

A técnica do tempo de vôo da onda difratada (TOFD) é, normalmente, aplicada, industrialmente, com automação. Se o componente não for tão extenso e a localização da zona crítica for conhecida, a inspeção manual também é viável para o dimensionamento e, se necessário, o monitoramento do defeito. Assim, indústrias petrolíferas têm realizado estudos para a inspeção de seus equipamentos utilizando a técnica, principalmente, nos dutos que trabalham com alta pressão transportando combustível. Outras companhias importantes como: Exxon, Shell, Fluor Daniel, Texaco e Chevron estão usando TOFD para substituir a radiografia na inspeção de seus componentes depois do tratamento térmico final.

Assim, as principais aplicações para a técnica TOFD são as seguintes:

1. Dimensionamento de defeitos.
2. Detecção, monitoramento, registro e avaliação de defeitos durante a produção.
3. Controle de qualidade na fabricação de vasos de pressão e dutos.
4. A técnica pode ser aplicada sobre componentes hemisféricos e cordões de solda. A combinação com o ultra-som convencional (pulso-eco) possibilita uma varredura completa do cordão de solda (uma técnica complementa a outra), detectando os defeitos mais típicos como: falta de fusão, falta de penetração, porosidades, trincas, entre outros.
5. Atualmente, a técnica tem sido adaptada para vasos de pressão em indústrias de processo químico, forjados complexos e fundidos (exemplo, disco de turbina) e configurações nodulares sobre estruturas tubulares.

4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O fluxograma da Figura 13 apresenta a seqüência da metodologia adotada na parte experimental deste trabalho.

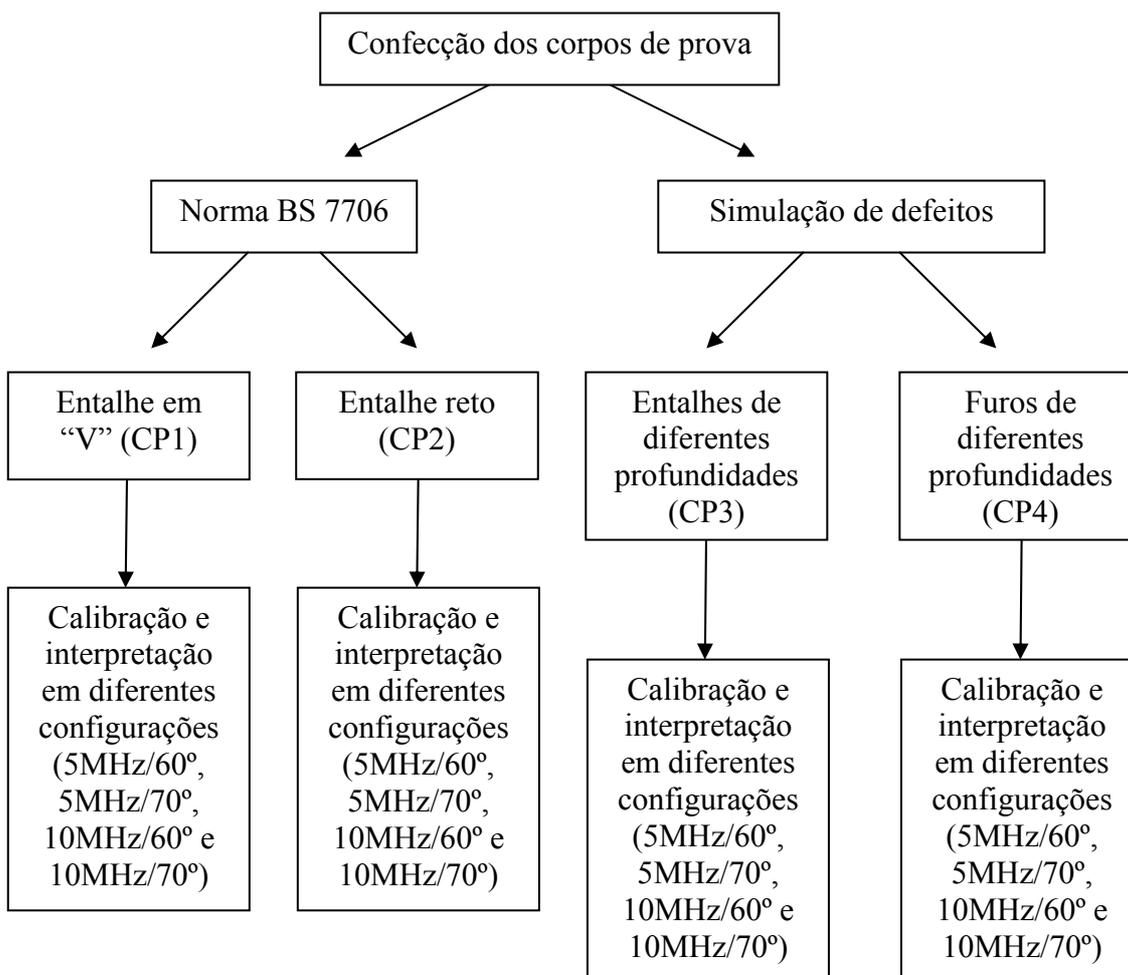


Figura 13 - Fluxograma detalhado das etapas da metodologia adotada neste trabalho. CP = corpo de prova.

A confecção dos corpos de prova para serem analisados pela técnica TOFD foi dividida em duas partes. Assim, foram confeccionados 4 corpos de prova (CP1, CP2, CP3 e CP4) de 200mm de comprimento, 50mm de largura e 24,8mm de espessura do aço SAE 1022, sendo que CP1 e CP2 foram usinados segundo a Norma Britânica BS7706 por eletroerosão e CP3 e CP4 tiveram defeitos simulados por eletroerosão e por fresagem. A espessura dos blocos pelo desenho do corpo de prova era de 25mm, mas devido a perda de material na usinagem dos corpos de prova, a espessura final ficou em 24,8mm (aproximadamente). Todos os corpos de prova foram calibrados e interpretados

utilizando cada uma das quatro variações propostas: 5MHz/60°, 5MHz/70°, 10MHz/60° e 10MHz/70°.

4.1 Materiais e Métodos

Para a realização dos experimentos, foi utilizado um equipamento de ultra-som de 16 canais, no qual a parte de hardware e software foi desenvolvida pela equipe da CPTi/PUC-Rio, que permite trabalhar tanto no modo pulso-eco (ultra-som convencional) quanto no modo TOFD, sendo o último, escopo deste trabalho. A Figura 14 apresenta o conjunto TOFD, com todos os acessórios necessários para o seu funcionamento.

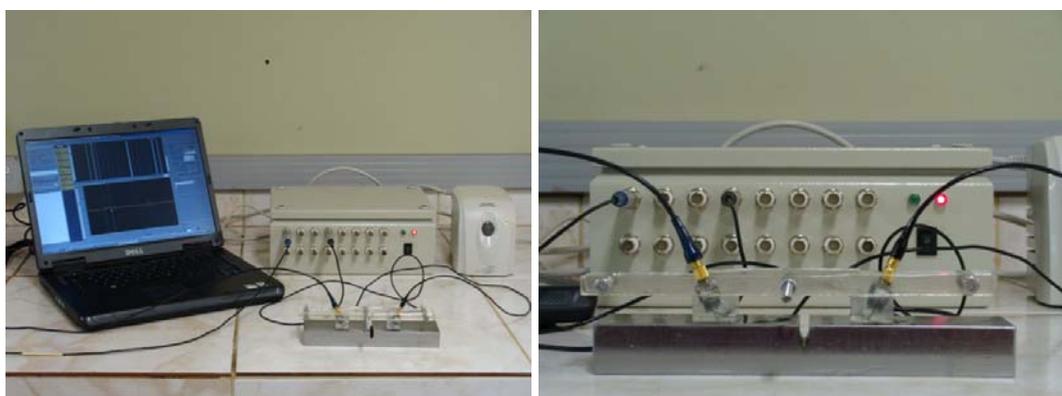


Figura 14 – Equipamento de TOFD utilizado no ensaio.

Assim, para tais procedimentos foram utilizados diferentes conjuntos de cabeçotes e sapatas desenvolvidos pela PANAMETRICS, cujas referências estão descritas na seqüência:

- 2 transdutores de 5 MHz com diâmetro do cristal de 6 mm C543-SM ST1.
- 2 transdutores de 10 MHz com diâmetro do cristal de 6 mm C544-SM ST1.
- 2 sapatas de acrílico ST1-60L (60 ° LW).
- 2 sapatas de acrílico ST1-70L (70 ° LW).

4.1.1 Confeção dos corpos de prova

Para a usinagem do CP1 foi inserido um entalhe em “V” (como mostra o desenho na Figura 15) de acordo com o especificado na Norma BS 7706, que determina uma largura de 5mm aberto na superfície, e com uma profundidade de ½ da espessura

do corpo de prova, sendo que o entalhe em “V” na ponta faz um ângulo de 60 ° com a vertical.

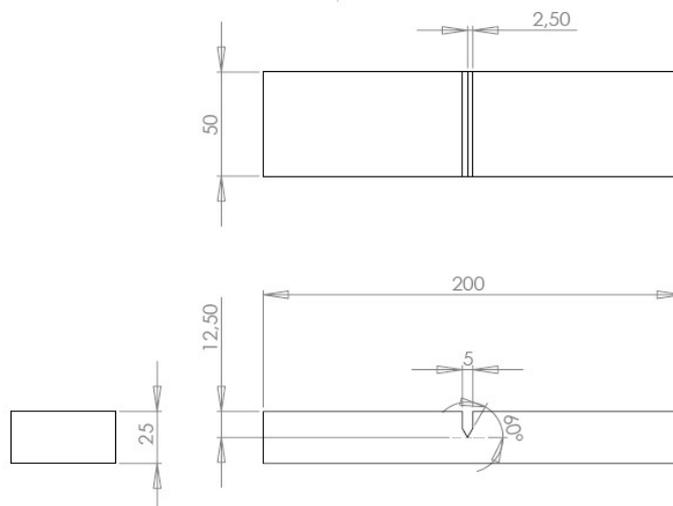


Figura 15 – Bloco usinado com entalhe em “V” segundo Norma BS7706. CP=1.

Já o CP2 foi usinado (Figura 16), também de acordo com a Norma BS7706, com um entalhe de 0,3mm aberto na superfície no sentido da largura do corpo de prova, com uma profundidade de 1/3 da espessura do corpo de prova. O entalhe tinha uma largura de no máximo 1/4 do comprimento de onda utilizado.

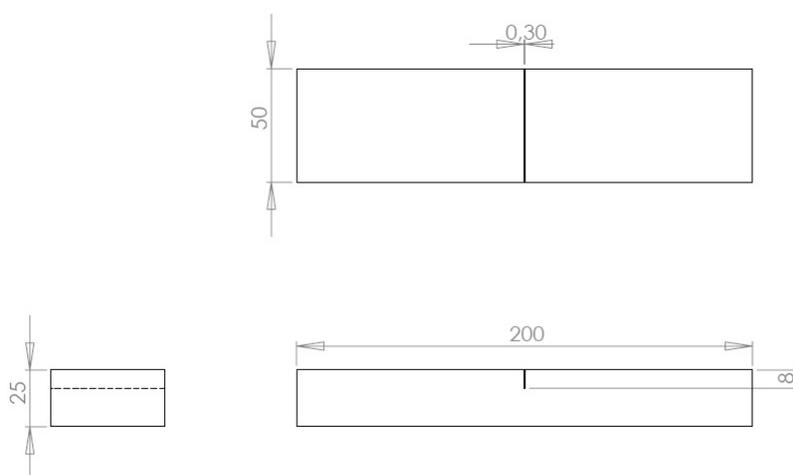


Figura 16 - Bloco usinado com entalhe reto segundo Norma BS7706. CP=2.

Quanto ao CP3, segundo mostra o desenho (Figura 17), foram usinados dois entalhes de 0,7mm de largura por eletroerosão por penetração, sendo um à 1/3 (8mm) e outro à 1/2 (12,50mm) de profundidade, a partir da superfície, com um comprimento de 10mm cada. Invertendo o corpo de prova, foi possível dimensionar também o entalhe usinado à 2/3 da espessura (17mm).

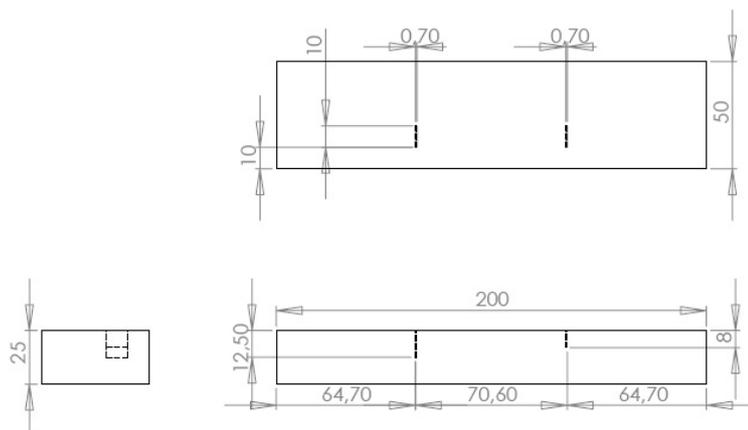


Figura 17 - Bloco usinado com entalhes em diferentes profundidades. CP=3.

Finalmente, no CP4, segundo mostra o desenho (Figura 18), foram realizados quatro furos de profundidade diferente no sentido da largura do corpo de prova, com 3mm de diâmetro cada (FLOTTÉ, 2005), o que garante uma boa difração, tanto na parte superior quanto na parte inferior do furo. Os furos foram distribuídos ao longo do comprimento do corpo de prova, espaçados em 40mm, para evitar a interferência da difração de um furo em outro furo próximo, ao se colocar o par de cabeçotes sobre a superfície.

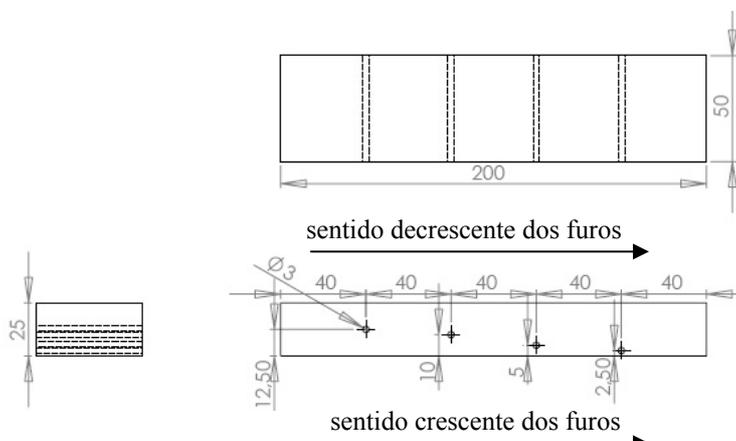


Figura 18 - Bloco usinado com furos em diferentes profundidades. CP=4.

4.2 Calibração e Interpretação da técnica

Para a inspeção dos quatro corpos de prova foram adotadas diferentes variações utilizando os cabeçotes e as sapatas, conforme listagem que segue:

- Par de cabeçotes de 5 MHz com sapatas de ângulo da onda longitudinal de 60 graus.

- Par de cabeçotes de 10 MHz com sapatas de ângulo da onda longitudinal de 60 graus.
- Par de cabeçotes de 5 MHz com sapatas de ângulo da onda longitudinal de 70 graus.
- Par de cabeçotes de 10 MHz com sapatas de ângulo da onda longitudinal de 70 graus.

A partir destas variações pode-se realizar uma comparação dos ecogramas obtidos pelo software, considerando a precisão no dimensionamento dos entalhes de acordo com os desenhos dos corpos de prova. Assim, foi possível concluir qual a frequência e o ângulo mais apropriado para a espessura e característica do material que se deseja inspecionar.

Primeiramente, antes de iniciar a inspeção dos CPs, foi identificada em cada variação a onda lateral e o eco de fundo para cada corpo de prova em uma região isenta de descontinuidades, através de movimentos de aproximação e afastamento dos cabeçotes transmissor e receptor sobre a superfície do corpo de prova em questão, para que estes ecos sejam maximizados na tela, até encontrar a separação ideal dos cabeçotes (PCS). É indispensável o uso de acoplante (vaselina) entre a peça e os cabeçotes e o auxílio de um guia para as sondas (*scanner*), a fim de manter o paralelismo e o alinhamento dos cabeçotes, o que mantém os picos maximizados. Os *gates* registram inicialmente os valores de tempo da chegada das ondas, dado em μs . Após calibração do software, estes valores são convertidos para unidade de distância, dados em *mm*, no qual o *gate 1* registra o “0mm” da medição e o *gate 2* registra o valor da espessura da peça, que no caso desta dissertação, ficou em 24,8mm. Assim, o *gate 1* foi posicionado na onda lateral e o *gate 2* no eco de fundo conforme mostra a Figura 19. O ganho ideal no software ficou em 82dB, sem interferência de ruído. Em seguida, o conjunto (*cabeçotes + scanner*) foi posicionado na região em que se encontravam os refletores artificiais nos corpos de prova (usinados perpendicular à superfície), procurando manter a relação de equidistância, para não sair da “*zona quase linear*”, no qual o erro de interpretação é mínimo. Portanto, o pico que surgisse entre os dois *gates* seria referente à difração nestes refletores, tanto para o CP1 quanto para o CP2 e o CP3.

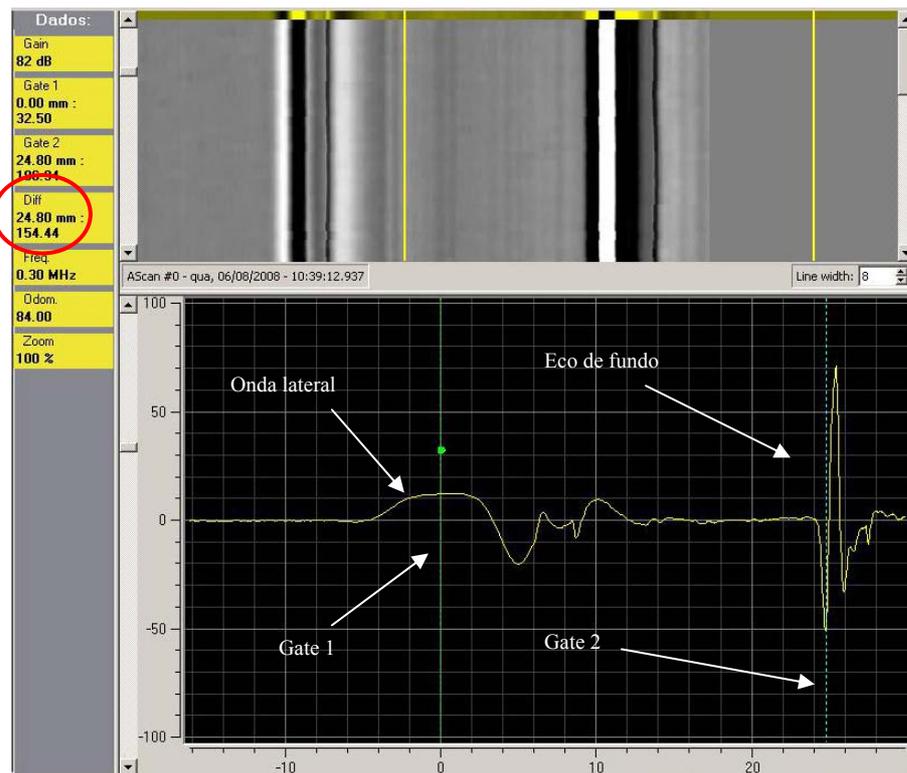


Figura 19 – Exemplo de um ecograma obtido mostrando a onda lateral e o eco de fundo em uma região isenta de discontinuidades. O círculo em vermelho nos mostra o valor da espessura calibrado.

Particularmente, no CP4, temos a presença de dois ecos de difração entre a onda lateral (*gate 1*) e o eco de fundo (*gate 2*), referentes à difração superior e à difração inferior dos furos. Então, o dispositivo neste caso foi posicionado na superfície, perpendicular à direção dos furos usinados nos corpos de provas. Em seguida, deslocando os cabeçotes no sentido decrescente dos furos, isto é, da esquerda para a direita de acordo com o desenho da Figura 18, detectou-se a difração em ambas as extremidades, possibilitando determinar tanto a profundidade quanto o diâmetro dos furos. Invertendo o corpo de prova, e deslocando os cabeçotes da esquerda para a direita novamente, mantendo o espaçamento, determinou-se a difração no sentido crescente dos furos. Assim, foi possível também determinar e visualizar a zona morta para este corpo de prova na região próxima à superfície e ao fundo.

Para compreender o cálculo do espaçamento dos cabeçotes (PCS), é necessário verificar os efeitos que as ondas incidentes sofrem ao passar de um meio para o outro, conforme descrito pela Lei de Snell, que é mostrada pela equação 2 e indicada na Figura 20:

$$v_i \div \text{sen} \alpha = v_T \div \text{sen} \beta = v_L \div \text{sen} \varphi \quad [2]$$

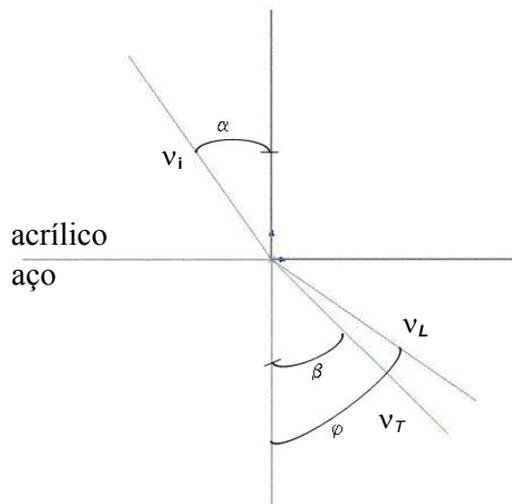


Figura 20 – Esquema representativo da refração da onda, com seus respectivos ângulos, ao passar do acrílico para o aço

Onde:

$$v_i = 2730 \text{ m/s (acrílico)}$$

$$v_T = 3240 \text{ m/s (aço)}$$

$$v_L = 5920 \text{ m/s (aço)}$$

v_i = velocidade longitudinal do som no acrílico

v_T = velocidade transversal do som no aço

v_L = velocidade longitudinal do som no aço

α = ângulo de incidência da onda no meio acrílico

β = ângulo de refração da onda transversal no meio aço

φ = ângulo de refração da onda longitudinal no meio aço

É possível observar que a onda longitudinal incide no acrílico com uma velocidade v_i e um ângulo α , mas ao passar para o aço ela sofre uma refração mudando o ângulo de direção dentro do material. Portanto, ela se divide em duas componentes, sendo uma referente à velocidade longitudinal no aço v_L dada pelo ângulo φ e uma outra, de ângulo menor β , que é referente à velocidade transversal no aço v_T .

Assim, para se observar na prática a aplicação da Lei de Snell na técnica TOFD deve-se analisar o que acontece com as ondas presentes considerando um corpo de prova com defeito, conforme mostra a Figura 21:

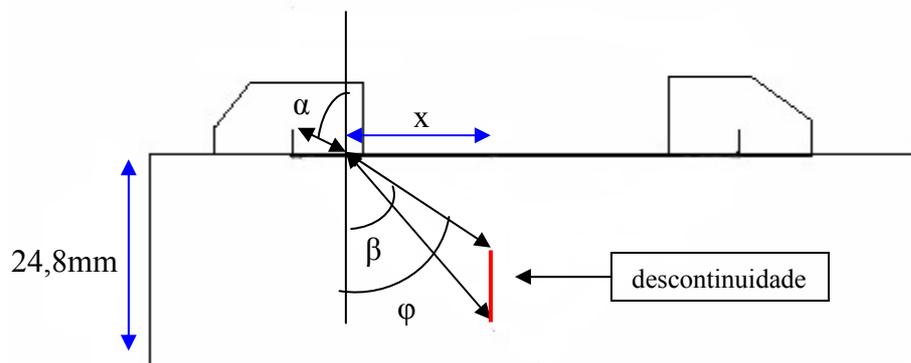


Figura 21 – Representação das principais ondas que incidem em uma descontinuidade, oriundas da refração no meio

Para um ângulo da onda longitudinal incidente no aço φ de 60° temos um ângulo de saída no acrílico α de $23,53^\circ$, conforme mostra a equação 3:

$$5920 \div \text{sen}60^\circ = 2730 \div \text{sen}\alpha \quad [3]$$

$$\alpha = 23,53^\circ \text{ (acrílico)}$$

Entretanto, o ângulo de refração da onda transversal β é de $28,30^\circ$, sendo menor que o da onda longitudinal no aço φ , conforme mostra a equação 4:

$$5920 \div \text{sen}60^\circ = 3240 \div \text{sen}\beta \quad [4]$$

$$\beta = 28,30^\circ$$

Logo, temos os três ângulos de interesse:

$$\alpha = 23,53^\circ$$

$$\beta = 28,30^\circ$$

$$\varphi = 60^\circ$$

Para fins de cálculo de PCS, devido à espessura dos corpos de prova utilizados para calibração, consideramos o ângulo da onda longitudinal no aço. Nota-se que a espessura é multiplicada por $\frac{1}{2}$, nos cálculos desta dissertação, em virtude do foco direcionado para o centro do corpo de prova (metade da espessura), conforme explicado na revisão bibliográfica, o que maximizou os ecos para estes corpos de prova. Assim,

como a localização das pontas das descontinuidades é próxima ao centro, foi adotado esse critério.

Portanto, segundo a Figura 21, para uma espessura de 24,8 mm e um ângulo da onda longitudinal de 60°, temos a seguinte relação dada pela equação 5:

$$\operatorname{tg} \varphi = x \div 24,8\text{mm} \cdot \frac{1}{2} \quad [5]$$

$$x = 24,8\text{mm} \times \operatorname{tg} 60^\circ *$$

$$x = 24,8\text{mm}$$

Logo:

Sabendo que,

$$PCS = 2 \cdot x \quad [6]$$

Temos como resultado teórico do PCS utilizado para o ângulo de 60° de 49,6mm. Na prática, o valor exato medido ficou em 51,0mm, devido a pequenos ajustes para maximizar os picos de interesse.

Já para o ângulo da onda longitudinal de 70°, temos a seguinte relação:

$$\operatorname{tg} \beta = x \div 24,8\text{mm} \cdot \frac{1}{2} \quad [7]$$

$$x = 24,8\text{mm} \times \operatorname{tg} 70^\circ *$$

$$x = 37,2 \text{ mm}$$

Logo:

Pela equação 7, temos como resultado teórico do PCS utilizado para o ângulo de 70° de 74,4mm. Na prática, o valor exato medido ficou em 75,0mm.

* Apenas para fins de facilitar um cálculo antes de uma inspeção, já que a técnica não exige uma precisão milimétrica, adota-se o critério do arredondamento para cálculo de tangente, assim: $\text{tg}60^\circ = 2$ e $\text{tg}70^\circ = 3$.

Assim, a tabela 5 resume os dois tipos de espaçamentos de cabeçotes utilizados nesta dissertação para cada ângulo da sapata de acrílico, independente da frequência adotada:

Tabela 5 – Separação dos cabeçotes definida para cada ângulo de sapata.

Ângulo da sapata de acrílico	Espaçamento dos cabeçotes (PCS)
60° longitudinal	51mm
70° longitudinal	75mm

Estes valores de espaçamento se referem então ao foco dos feixes sônicos incidindo próximo ao centro da amostra (metade da espessura), o que maximizou os ecos para estes corpos de prova.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com a inspeção dos corpos de prova, foi possível dimensionar as descontinuidades com uma boa precisão, conforme mostram os ecogramas e as tabelas a seguir. Para os casos mais críticos, no qual a descontinuidade esteve numa região próxima ou dentro da zona morta, foi mostrado um gráfico (adaptado de GINZEL e FEHER, 2005) representando com detalhes esta situação.

5.1 CP1: bloco com entalhe em V

Para o CP1, utilizando os cabeçotes de 5MHz colocados na sapata de 60°, posicionados na região do entalhe, obteve-se o seguinte ecograma (A-scan e B-scan) representado pela Figura 22.

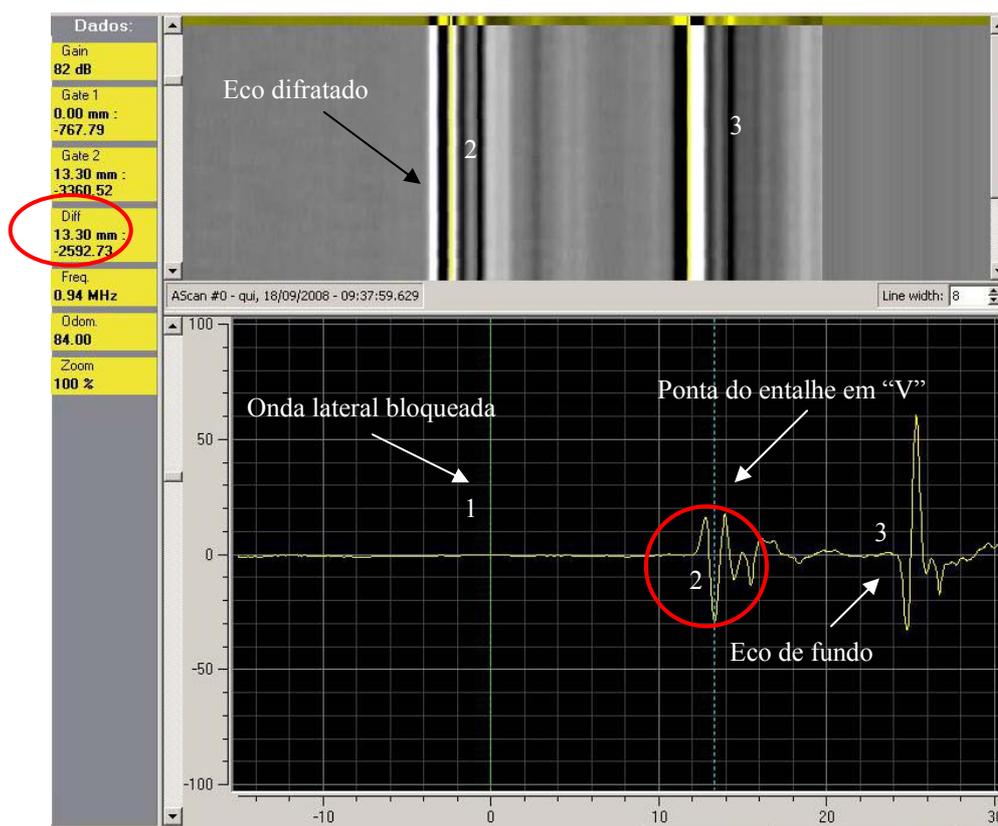


Figura 22 – Ecograma do CP1 para uma frequência de 5MHz e sapatas de 60°. Os círculos em vermelho indicam o valor experimental da profundidade e a localização do eco da difração do entalhe no B-scan. (1) onda lateral; (2) difração e (3) fundo. A-scan (abaixo) e B-scan (acima).

Pode-se verificar um eco bem definido da difração, cujo valor experimental ficou em 13,30 mm. A onda lateral foi bloqueada e o eco de fundo apareceu bem definido. O bloqueio da onda lateral se deve ao entalhe estar aberto à superfície. Já, a

boa resolução do eco difratado se relaciona com a geometria do entalhe (BS 7706, 1993) que propicia uma difração bem intensa em virtude de a extremidade ser bem aguda.

Já utilizando os cabeçotes de 5MHz colocados na sapata de 70°, posicionados na região do entalhe, obteve-se o seguinte ecograma (A-scan e B-scan) representado pela Figura 23.

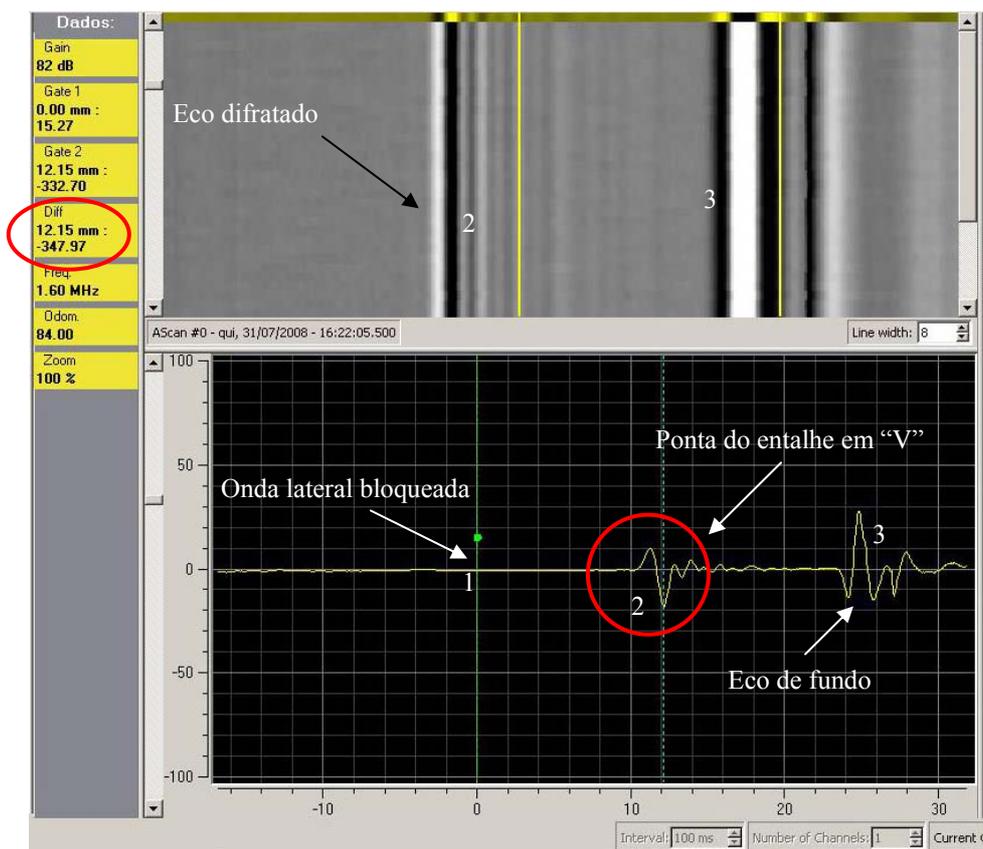


Figura 23 – Ecograma do CP1 para uma frequência de 5MHz e sapatas de 70°. Os círculos em vermelho indicam o valor experimental da profundidade e a localização do eco da difração do entalhe no B-scan. (1) onda lateral; (2) difração e (3) fundo. A-scan (abaixo) e B-scan (acima).

Neste caso, a onda lateral segue bloqueada e a ponta do entalhe bem definida, embora com uma intensidade menor do que a apresentada na Figura 22. Este fato é representado por um enfraquecimento do contraste no eco difratado no B-scan da Figura 23, comparada com a Figura 22. O valor experimental da profundidade ficou em 12,15mm para este caso. O eco de fundo também aparece com uma intensidade menor da que a apresentada anteriormente.

Posteriormente, aumentando a frequência dos cabeçotes utilizados, no caso 10MHz, colocados na sapata de 60°, posicionados na região do entalhe, obteve-se o seguinte ecograma (A-scan e B-scan) representado pela Figura 24.

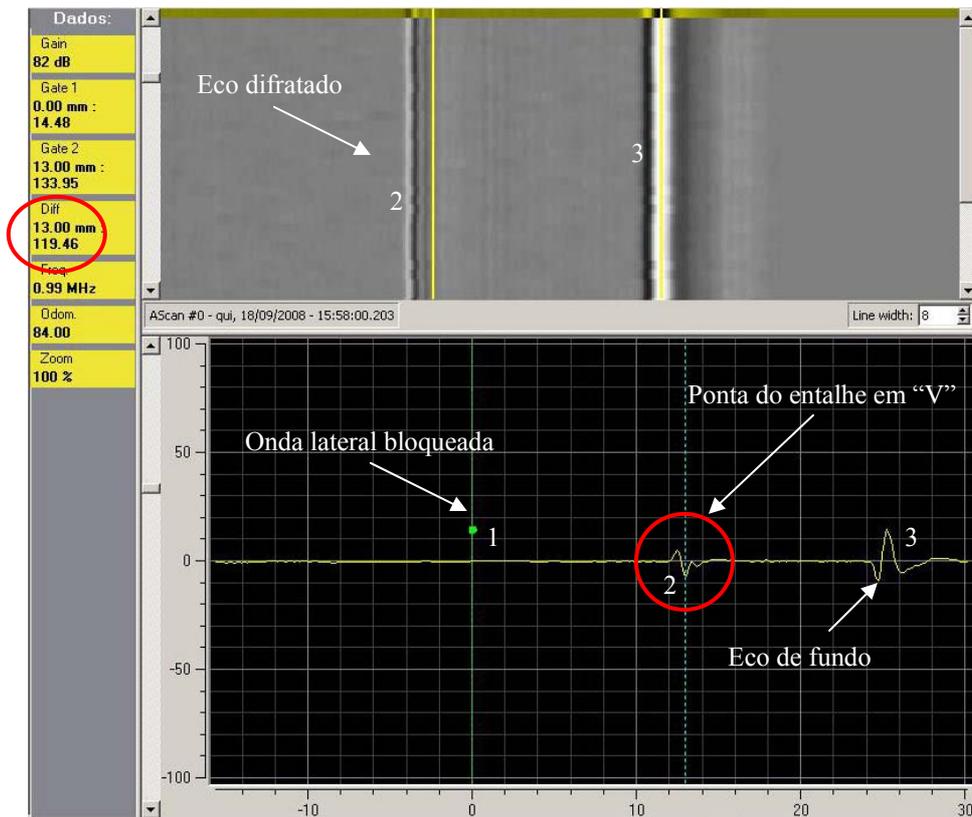


Figura 24 - Ecograma do CP1 para uma frequência de 10MHz e sapatas de 60°. Os círculos em vermelho indicam o valor experimental da profundidade e a localização do eco da difração do entalhe no B-scan. (1) onda lateral; (2) difração e (3) fundo. A-scan (abaixo) e B-scan (acima).

Desta maneira, ainda é possível observar a difração, porém com uma intensidade mais fraca, cujo valor experimental ficou em 13mm. As linhas verticais (claras e escuras) no B-scan aparecem bem mais finas. A onda lateral segue bloqueada e o eco de fundo aparece bem enfraquecido comparado com o apresentado nas Figuras 22 e 23.

Finalizando os ensaios para o CP1, mantendo a frequência dos cabeçotes em 10 MHz, porém colocando-os em sapatas de 70°, posicionados na região do entalhe, obteve-se o seguinte ecograma (A-scan e B-scan) representado pela Figura 25.

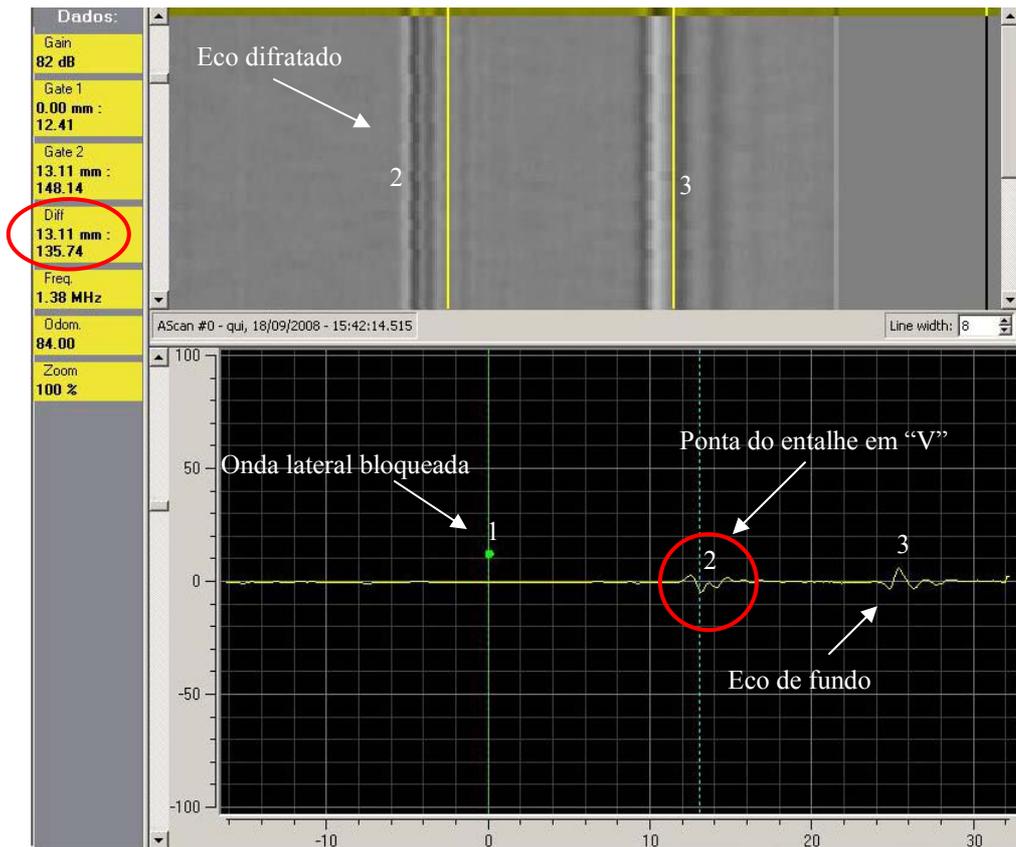


Figura 25 – Ecograma do CP1 para uma frequência de 10MHz e sapatas de 70°. Os círculos em vermelho indicam o valor experimental da profundidade e a localização do eco da difração do entalhe no B-scan. (1) onda lateral; (2) difração e (3) fundo. A-scan (abaixo) e B-scan (acima).

Conseqüentemente, observa-se o bloqueio da onda que se desloca pela superfície, como em todos os testes para o CP1, e um enfraquecimento bem acentuado na intensidade do sinal difratado e do eco de fundo comparada com as três situações anteriores. O valor experimental ficou em 13,11mm.

Complementando os resultados para o CP1, a tabela 6 apresenta os valores de profundidade experimentais, em resumo, encontrados para cada situação testada.

Tabela 6 – Resumo dos valores de profundidade e tempo de onda de todas as situações testadas para o CP1.

Profundi dade real do entalhe (mm)	Onda	5MHz 60°		5MHz 70°		10MHz 60°		10MHz 70°	
		TOF (μ s)	d (mm)						
12,5mm	Lateral	14,36	13,30	18,18	12,15	14,43	13,00	18,09	13,11
	Difração	15,43		20,62		15,45		18,81	
	Fundo	17,88		18,80		17,98		20,61	

É possível observar tanto os tempos de onda para cada eco do experimento, em μs , bem como os valores de profundidade obtidos em cada caso, comparando com o valor da profundidade real do entalhe. A Figura 26 nos mostra um gráfico comparativo, apresentando de outra forma os resultados obtidos para o CP1.

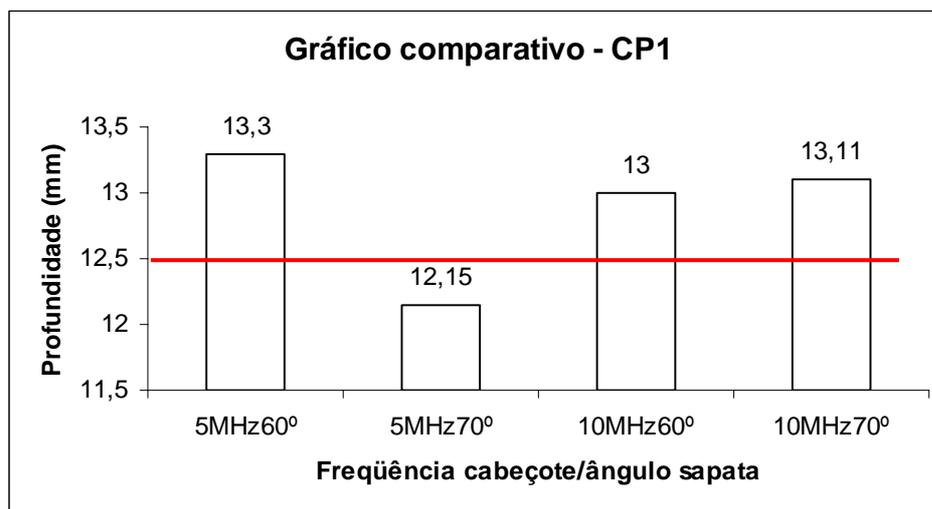


Figura 26 – Gráfico comparando os valores experimentais de profundidade para cada frequência/ângulo adotados com o valor real de 12,5mm referente ao entalhe do CP1. A linha horizontal vermelha ($y=12,5$) representa o valor da profundidade real.

Sabendo que a profundidade de 12,5mm representa o 100% (valor real) observa-se que a variação que utilizou o cabeçote de 5MHz e a sapatas de 70° nos revela uma maior precisão experimental, comparado com o valor real, com um erro experimental de 2,8%. Isto se deve ao maior espaçamento dos cabeçotes com a sapatas de 70°, o que permite uma incidência do feixe mais precisa no entalhe em “V”. Por outro lado, a variação que utiliza o cabeçote de 5MHz e a sapatas de 60°, apesar de apresentar um ecograma bem definido, ocasionou o maior erro experimental para o CP1 (6,4%). Para os cabeçotes de 10MHz, os erros percentuais ficaram em 4% para as sapatas de 60° e 4,9% para as sapatas de 70°.

5.2 CP2: bloco com entalhe reto

Para o CP2, utilizando os cabeçotes de 5MHz colocados nas sapatas de 60°, posicionados na região do entalhe reto, obteve-se o seguinte ecograma (A-scan e B-scan) representado pela Figura 27.

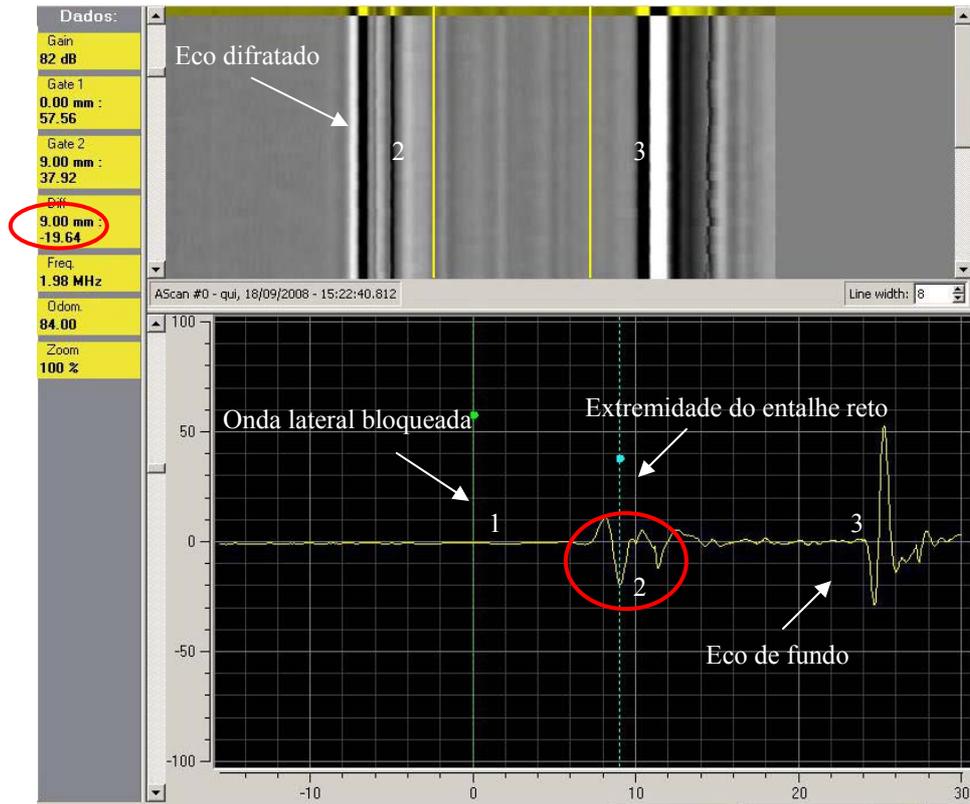


Figura 27 – Ecograma do CP2 para uma frequência de 5MHz e sapatas de 60°. Os círculos em vermelho indicam o valor experimental da profundidade e a localização do eco da difração do entalhe no B-scan. (1) onda lateral; (2) difração e (3) fundo. A-scan (abaixo) e B-scan (acima).

Em virtude do entalhe reto estar também aberto à superfície, a onda lateral segue bloqueada. Além disso, o sinal da difração aparece bem definido e intenso no A-scan, apresentando um valor experimental de 9mm. Da mesma forma, o eco de fundo também aparece com uma forma bem definida.

Por conseguinte, utilizando os cabeçotes de 5MHz colocados nas sapatas de 70°, posicionados na mesma região do entalhe reto, obteve-se o seguinte ecograma (A-scan e B-scan) representado pela Figura 28.

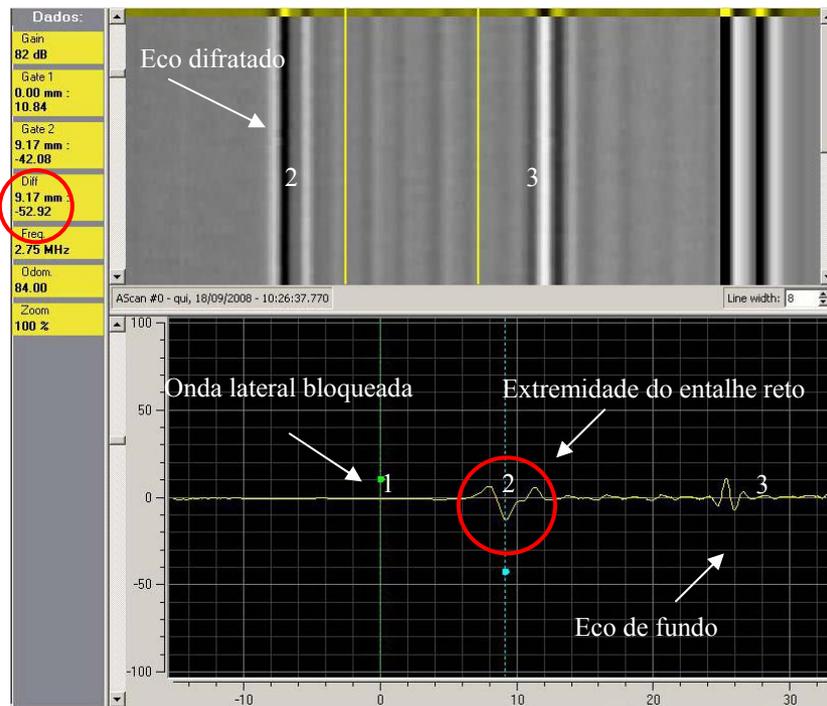


Figura 28 - Ecograma do CP2 para uma frequência de 5MHz e sapatas de 70°. Os círculos em vermelho indicam o valor experimental da profundidade e a localização do eco da difração do entalhe no B-scan. (1) onda lateral; (2) difração e (3) fundo. A-scan (abaixo) e B-scan (acima).

Observa-se uma diminuição da intensidade tanto do eco difratado, cujo valor experimental ficou em 9,17mm, quanto do eco de fundo para este caso do entalhe reto. Isto é visível no B-scan pelo enfraquecimento das cores que representam as fases das ondas em questão, comparando com a Figura 27.

A partir de um aumento de frequência, para a variação utilizando os cabeçotes de 10MHz colocados nas sapatas de 60°, posicionados na mesma região do entalhe reto, obteve-se o seguinte ecograma (A-scan e B-scan) representado pela Figura 29.

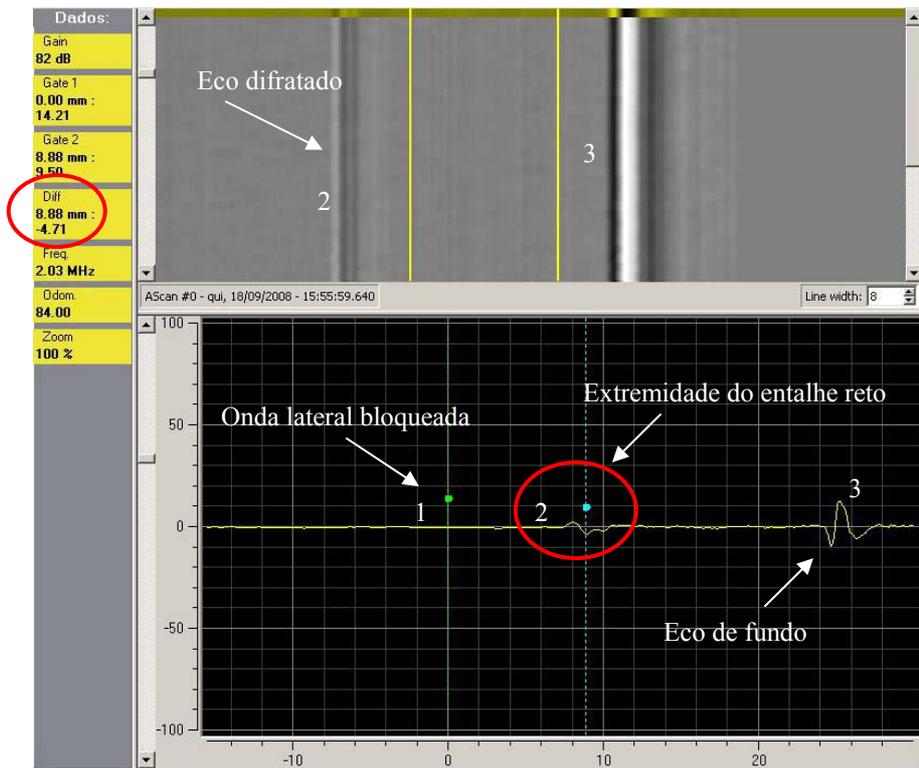


Figura 29 - Ecograma do CP2 para uma frequência de 10MHz e sapatas de 60°. Os círculos em vermelho indicam o valor experimental da profundidade e a localização do eco da difração do entalhe no B-scan. (1) onda lateral; (2) difração e (3) fundo. A-scan (abaixo) e B-scan (acima).

Portanto, temos um enfraquecimento significativo da intensidade tanto do eco difratado quanto do eco de fundo (A-scan). Da mesma forma, no B-scan, as cores ficaram menos intensas. Além disso, a onda lateral que corre na superfície segue bloqueada. Desta maneira, o valor experimental da profundidade do entalhe reto ficou em 8,88mm.

Finalmente, para os cabeçotes de 10MHz colocados nas sapatas de 70°, posicionados na mesma região do entalhe reto, obteve-se o seguinte ecograma (A-scan e B-scan) representado pela Figura 30.

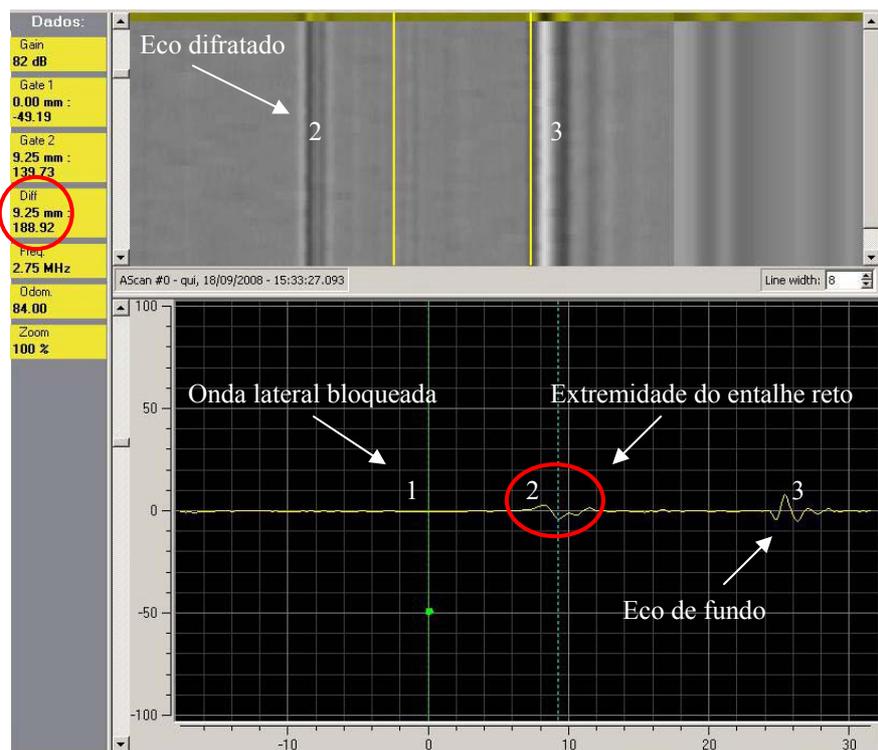


Figura 30 - Ecograma do CP2 para uma frequência de 10MHz e sapatas de 70°. Os círculos em vermelho indicam o valor experimental da profundidade e a localização do eco da difração do entalhe no B-scan. (1) onda lateral; (2) difração e (3) fundo. A-scan (abaixo) e B-scan (acima).

Desta forma, temos novamente a onda lateral bloqueada e um eco difratado com uma forma semelhante ao apresentado anteriormente na Figura 29, porém com um valor experimental de 9,25mm. O eco de fundo, comparado ao verificado no ecograma anterior, teve a intensidade um pouco enfraquecida.

A tabela 7 resume todos os resultados de profundidade experimentais obtidos para o CP2.

Tabela 7– Resumo dos valores de profundidade e tempo de onda de todas as situações testadas para o CP2.

Profundi dade real do entalhe (mm)	Onda	5MHz 60°		5MHz 70°		10MHz 60°		10MHz 70°	
		TOF (μ s)	d (mm)						
8mm	Lateral	14,65	9,00	17,96	9,17	14,43	8,88	18,27	9,25
	Difração	14,93		18,32		14,92		18,64	
	Fundo	17,88		20,48		17,95		20,51	

A partir dela, podem-se verificar os tempos de chegada das principais ondas, em μs , para cada uma das variações adotadas e também, o valor da profundidade, comparado com o valor real da extremidade do entalhe reto. Assim, na Figura 31, tem-se um gráfico comparativo para o CP2, mostrando todos os principais valores obtidos durante o ensaio.

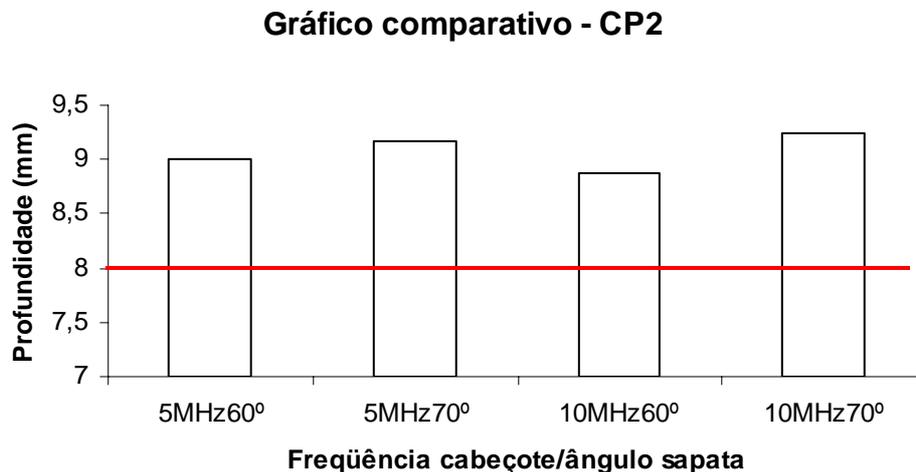


Figura 31 - Gráfico comparando os valores experimentais de profundidade para cada frequência/ângulo adotados com o valor real de 8 mm referente ao entalhe do CP2. A linha horizontal vermelha ($y=8$) representa o valor da profundidade real.

Portanto, sabendo que a profundidade de 8mm para o valor real do entalhe reto representa o 100%, obteve-se com o cabeçote de 10MHz e a sapata de 60° um erro percentual de 11%, que foi o menor encontrado nesta configuração. BASKARAN et al. (2005) mostrou que para defeitos em profundidades menores do que 10mm, utilizando a onda transversal, quanto maior a frequência dos cabeçotes e menor o ângulo da sapata (menor ou igual a 60°), a tendência é que o erro percentual seja menor, tendo em vista que para um entalhe usinado a 6,5mm de profundidade, utilizando cabeçotes de 5MHz, o erro percentual encontrado ficou em 13,8%. Já para cabeçotes de 10MHz, o erro ficou em 4,9%. Esta análise coincide com o melhor resultado obtido para o CP2 nesta dissertação, utilizando cabeçotes de 10MHz e sapatas de 60°.

Quanto a variação que utiliza o cabeçote de 10MHz e a sapata de 70°, ocorreu o maior erro percentual para o CP2, com o valor de 15,6%. Complementando a análise, com os cabeçotes de 5MHz tivemos valores intermediários de erros percentuais, sendo eles 12,5% para a sapata de 60° e 14,6% para a sapata de 70°. MONDAL (2000), utilizando cabeçotes de 5MHz sobre sapatas de 60° de ângulo obteve um erro de apenas

1,1% para dimensionar um entalhe usinado a 9mm de profundidade, em um chapa de aço com as dimensões de 350x340x13mm.

De acordo com a mecânica da fratura linear elástica (MFLE), esta margem de erro no tamanho de trinca de, aproximadamente, 1mm, estaria dentro do aceitável à nível de cálculo de resistência² do material (ANDERSON, 1994). Assim, para uma liga de aço 1040 com trinca superficial, por exemplo, os valores tabelados (CALLISTER, 2002) indicam que a tenacidade à fratura do material vale $54\text{MPa}\cdot\text{m}^{0,5}$ e o limite de escoamento vale 260 MPa, à temperatura ambiente. Utilizando estes valores na equação 8:

$$K_{IC} = \sigma \cdot (\pi \cdot a)^{0,5} \quad [8]$$

Encontra-se um valor de $a_{\text{crítico}}$ de 13,73mm nestas condições. Então, para uma trinca de 8mm, por exemplo, o limite de resistência alcançaria 337MPa e para uma trinca de 9mm, este limite teria um pequeno decréscimo, atingindo o valor de 318MPa, resultando numa diferença percentual de tensão menor do que 6%, o que não representaria uma mudança significativa no comportamento mecânico do material.

5.3 CP3: amostra com entalhes de diferentes profundidades

Para o CP3, utilizando os cabeçotes de 5MHz colocados na sapata de 60°, com o corpo de prova posicionado com os entalhes de 12,5mm e 17mm de profundidade aflorando na superfície, obteve-se os seguintes ecogramas (A-scan e B-scan) representado pela Figura 32.

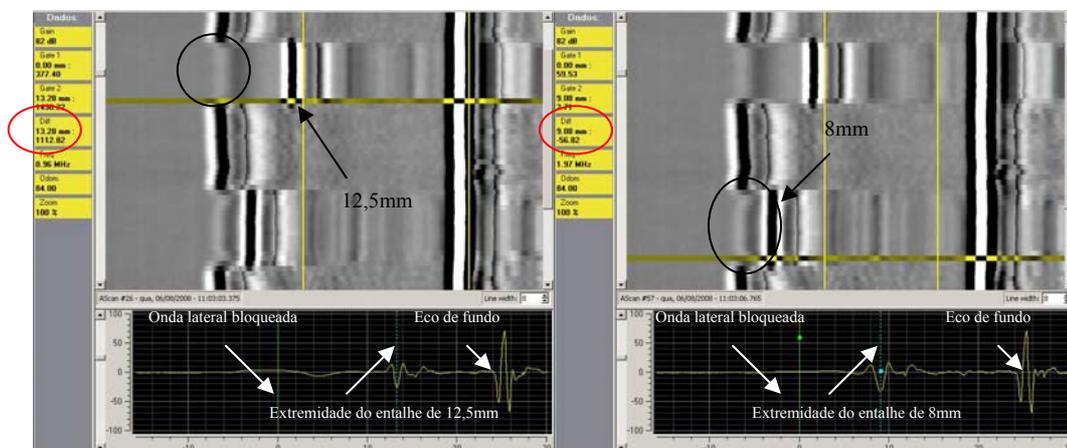


Figura 32 – Ecogramas com entalhes de 12,5mm (à esquerda) e 8mm (à direita) aflorando na superfície. Nota-se o bloqueio da onda lateral na região da descontinuidade (círculo escuro). O círculo vermelho indica o valor da medição para o eco difratado.

Ambos os ecogramas mostram a onda lateral bloqueada na região dos entalhes. A difração aparece bem definida, sendo que, para o entalhe apresentado à esquerda na Figura 42, o valor ficou em 13,28mm. Já para o ecograma referente ao entalhe de 8mm (à direita na Figura 32), o valor ficou em 9,08mm. O eco de fundo para ambos os ecogramas se mostrou bem intenso e definido.

Em seguida, invertendo o corpo de prova, isto é, posicionando-o sobre os mesmos entalhes, porém aflorando na superfície oposta, foi possível obter os seguintes ecogramas apresentados na Figura 33.

Observa-se o aparecimento da onda lateral, pois nesta configuração os entalhes estão abertos na superfície oposta à varredura e não na superfície do ensaio. Logo, o eco de fundo aparece distorcido na região (B-scan), diminuindo a sua intensidade (A-scan) comparando com o mesmo eco em uma região isenta de discontinuidades. A difração aparece bem definida, apresentando o valor de 12,60mm para o entalhe de 12,5mm e 16,86mm para o entalhe de 17mm.

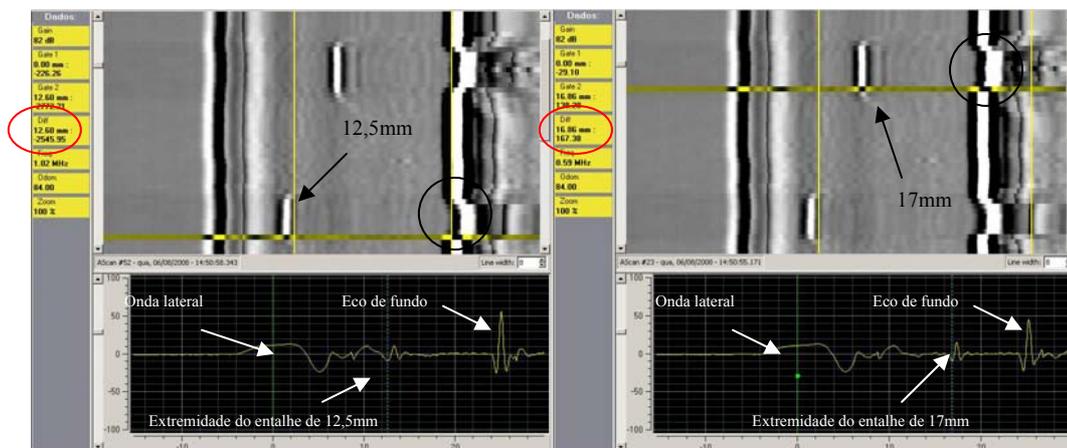


Figura 33 - Ecogramas com entalhes de 12,5mm (à esquerda) e 17mm (à direita) aflorando na superfície oposta. Nota-se o enfraquecimento e a distorção do eco de fundo (círculo escuro). O círculo vermelho indica o valor da medição para o eco difratado.

A tabela 8 apresenta, em resumo, todos os valores obtidos para o ensaio realizado com o cabeçote de 5MHz e a sapata de 60°, tanto das profundidades experimental e real, quanto do tempo de vôo da onda difratada.

Tabela 8 - Dados experimentais dos entalhes inspecionados para os cabeçotes de 5MHz e sapata de 60°.

Profundidade real do entalhe (mm)	Onda	Dados Experimentais	
		TOF (μs)	Profundidade (mm)
8mm	Lateral	14,52	d=9,08mm
	Difração na extremidade	15,04	
	Fundo	17,79	
12,5mm	Lateral	14,52	d=13,28mm d _{inv} =12,60mm
	Difração na extremidade	15,63	
	Fundo	17,79	
17mm	Lateral	14,52	d _{inv} =16,86mm
	Difração na extremidade	16,08	
	Fundo	17,79	

Baseado nisso, calculando o erro percentual para cada um dos resultados obtidos, o erro ficou em 13,5% para o valor experimental d=9,08mm. Este resultado ficou próximo ao erro percentual encontrado por MOURA e VASCONCELOS (2006), para um entalhe usinado a uma profundidade de 8mm, por eletroerosão, em uma chapa de 18mm de espessura por 600mm de comprimento, que ficou em 16,25%. Já para os valores experimentais de d=13,28mm e d_{inv}=12,60mm, referentes ao entalhe de 12,5mm do CP2, os erros percentuais ficaram, respectivamente, em 1% e 0,8%. Estes erros são menores do que o encontrado por MOURA e VASCONCELOS (2006) para um entalhe usinado a 13mm de profundidade, cujo erro percentual ficou em 1,6%. Já, NATH et al. (2007), ao analisar trincas verticais simuladas de 0,5mm de largura aflorando na superfície de um bloco de alumínio de geometria complexa, utilizando cabeçotes de 4MHz em sapatas de 60°, obteve para um entalhe com profundidade real de 12,5mm um valor experimental médio de 11,87mm, o que fornece um erro percentual médio de 5%. Finalmente, para o valor experimental d_{inv}=16,86mm obtido nesta dissertação, o erro percentual com relação ao valor real ficou em apenas 0,8%.

Na Figura 34, foi feita uma demonstração que possibilita a visualização do tamanho da zona morta para cada caso. Assim, é possível identificar se a profundidade da descontinuidade a ser detectada cairá nestas zonas, impossibilitando ou mascarando a análise, ou ficará em uma zona detectável. Para o cabeçote de 5MHz com a sapata de 60° não houve problemas na detecção, ou seja, todas as descontinuidades ficaram em zonas detectáveis, como pôde ser evidenciado na prática, analisando as Figuras 32 e 33.

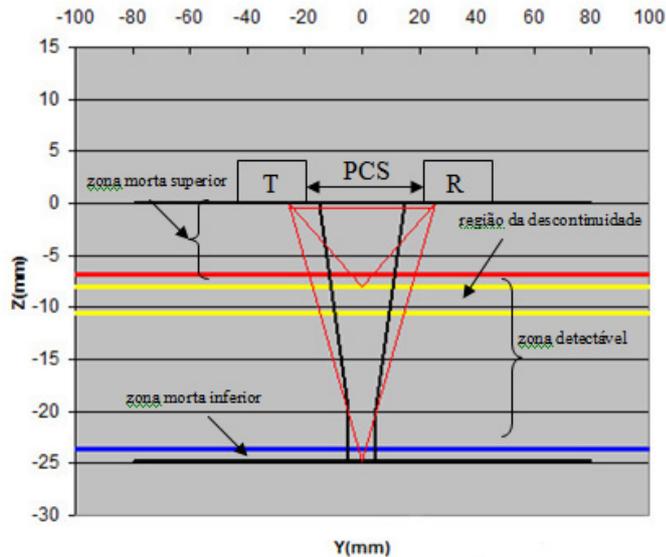


Figura 34 – Esquema mostrando o efeito das zonas mortas na medição da profundidade de uma descontinuidade de 8mm no corpo de prova com entalhes, utilizando cabeçote de 5MHz e sapata de 60 graus. A unidade Y (mm) representa a distância dos cabeçotes e a unidade Z (mm) representa a profundidade. PCS = 51mm; T = Cabeçote transmissor; R = Cabeçote Receptor.

O entalhe de 8mm (região delimitada pelas linhas amarelas) foi escolhido para ser representado. Isto porque nesta região a possibilidade da zona morta superior estar presente é grande. Porém, o tamanho da zona morta superior ficou em torno de 7mm, ou seja, abaixo da profundidade do entalhe, não interferindo na difração.

Utilizando os cabeçotes de 5MHz colocados na sapata de 70°, com o corpo de prova posicionado com os entalhes de 12,5mm e 17mm de profundidade aflorando na superfície, obteve-se os seguintes ecogramas (A-scan e B-scan) representado pela Figura 35.

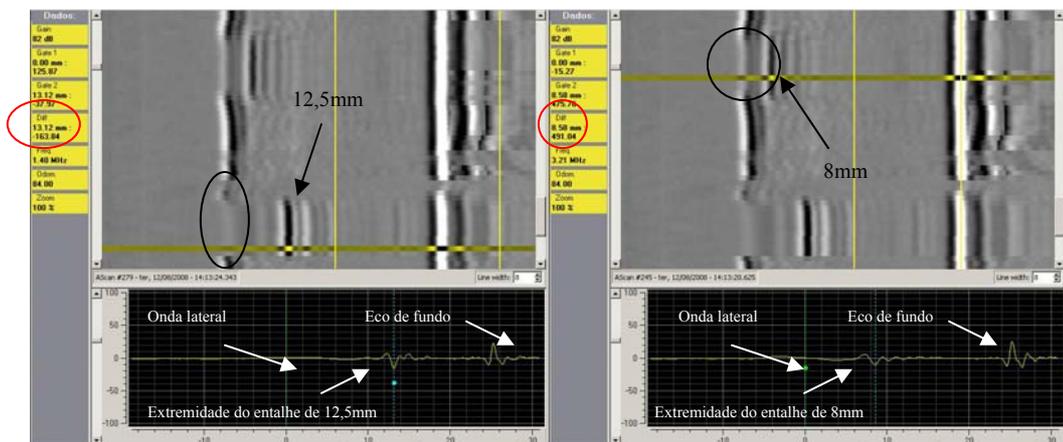


Figura 35 - Ecogramas com entalhes de 12,5mm (à esquerda) e 8mm (à direita) aflorando na superfície. Nota-se o bloqueio da onda lateral na região da descontinuidade (círculo escuro). O círculo vermelho indica o valor da medição.

Nesta situação é possível observar a onda lateral bloqueada na região do entalhe, sendo que a difração ficou bem definida na visualização tanto A-scan quanto B-scan, apresentando um valor de 13,12mm para o entalhe de 12,5mm e 8,58mm para o entalhe de 8mm. Posteriormente, invertendo o corpo de prova, isto é, posicionando-o sobre os mesmos entalhes, porém aflorando na superfície oposta, foi possível obter os seguintes ecogramas apresentados na Figura 36.

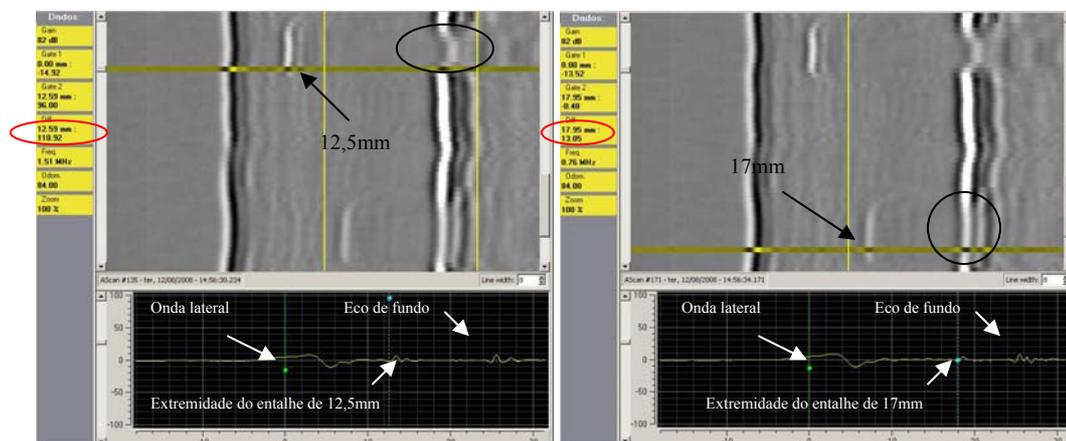


Figura 36 - Ecogramas com entalhes de 12,5mm (à esquerda) e 17mm (à direita) aflorando na superfície oposta. Nota-se o enfraquecimento e a distorção do eco de fundo (círculo escuro). O círculo vermelho indica o valor da medição.

Nestas condições, a onda lateral reaparece e o eco de fundo enfraquece (tanto no A-scan quanto no B-scan) na região dos entalhes. A difração foi possível identificar, entretanto não tão nitidamente quanto apresentado na Figura 45. Logo, os valores ficaram em 12,59mm para o entalhe de 12,5mm e 17,95mm para o entalhe de 17mm.

A tabela 9 resume os valores experimentais encontrados para cada entalhe, tanto com os refletores aflorando na superfície de varredura quanto aflorando na superfície oposta.

Tabela 9 - Dados experimentais de todas as profundidades dos entalhes inspecionados

Profundidade real do entalhe (mm)	Onda	Dados Experimentais	
		TOF (μ s)	Profundidade (mm)
8mm	Lateral	18,52	d=8,58mm
	Difração na extremidade	18,89	
	Fundo	20,91	
12,5mm	Lateral	18,52	d=13,12mm d _{inv} =12,59mm
	Difração na extremidade	19,07	
	Fundo	20,91	
17mm	Lateral	18,52	d _{inv} =17,95mm
	Difração na extremidade	19,58	
	Fundo	20,91	

Sabendo que o valor real do entalhe representa o 100%, foi possível obter o erro percentual para cada caso, utilizando o cabeçote de 5MHz com a sapata de 70°. Portanto, para o valor experimental de 8,58mm tivemos o maior erro percentual, que foi de 7,2%. Já para o valor experimental de 12,59mm tivemos o menor erro percentual, com o valor de 0,7%. Com relação às profundidades experimentais de 13,12mm e 17,95mm tivemos erros percentuais de 4,9% e 5,6%, respectivamente.

Para o cabeçote de 5MHz com a sapata de 70° também não houve problemas na detecção, ou seja, todas as descontinuidades ficaram em zonas detectáveis, conforme mostra a Figura 37 para o caso mais crítico.

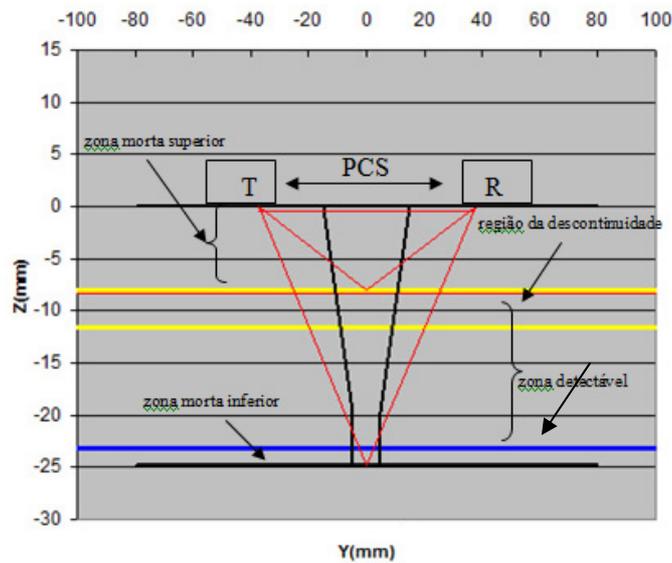


Figura 37 - Esquema mostrando o efeito das zonas mortas na medição da profundidade de uma descontinuidade de 8mm no corpo de prova com entalhes, utilizando cabeçote de 5MHz e sapata de 70 graus. A unidade Y (mm) representa a distância dos cabeçotes e a unidade Z (mm) representa a profundidade. PCS = 75mm; T = Cabeçote transmissor; R = Cabeçote Receptor.

O entalhe de 8mm (faixa delimitada pelas linhas amarelas) coincide com o limite de detecção da zona morta superior, que está em torno de 8mm, porém isto não foi um problema para o dimensionamento da difração, conforme foi mostrado na Figura 35.

Na seqüência, utilizando os cabeçotes de 10MHz colocados na sapata de 60°, com o corpo de prova posicionado com os entalhes de 12,5mm e 17mm de profundidade aflorando na superfície, obteve-se os seguintes ecogramas (A-scan e B-scan) representado pela Figura 38.

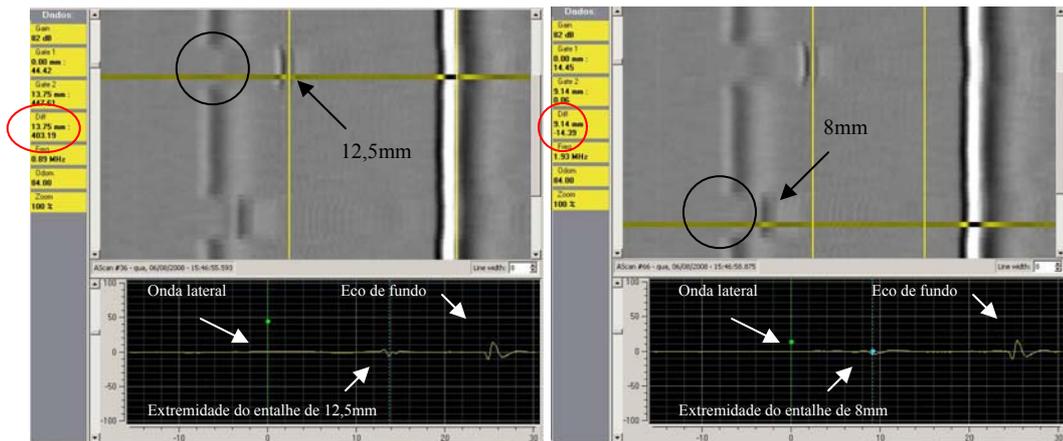


Figura 38 - Ecogramas com entalhes de 12,5mm (à esquerda) e 8mm (à direita) aflorando na superfície. Nota-se o bloqueio da onda lateral na região da descontinuidade (círculo escuro). O círculo vermelho indica o valor da medição.

A onda lateral ficou bloqueada na região dos refletores e se apresentou mais enfraquecida, comparando com o cabeçote de 5MHz. O eco de fundo apareceu bem definido, apesar de estar também menos intenso. Logo, os valores de difração ficaram em 13,75mm para o entalhe de 12,5mm e 9,14mm para o entalhe de 8mm.

Posteriormente, posicionando o CP3 com os entalhes aflorando na superfície oposta, foi possível obter os ecogramas apresentados na Figura 39.

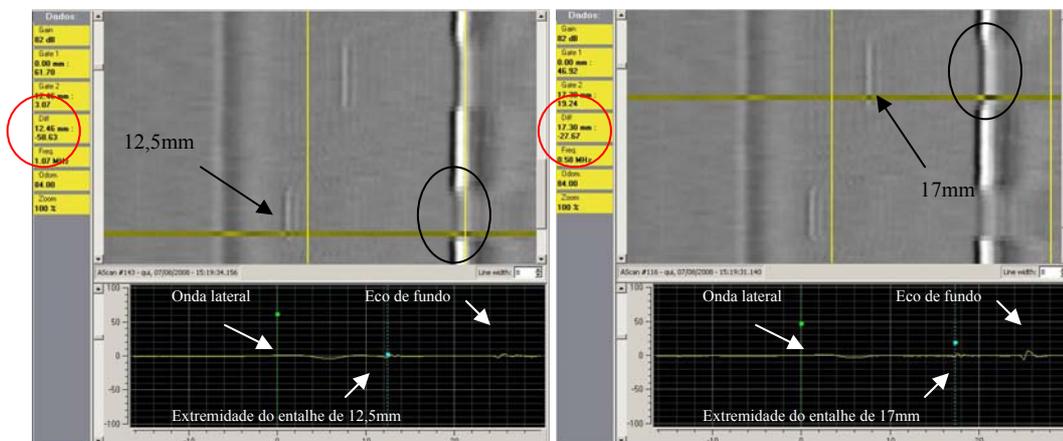


Figura 39 - Ecogramas com entalhes de 12,5mm (à esquerda) e 17mm (à direita) aflorando na superfície oposta. Nota-se o enfraquecimento e a distorção do eco de fundo (círculo escuro). O círculo vermelho indica o valor da medição.

Portanto, a onda lateral aparece na região dos entalhes, porém com uma intensidade de cores (B-scan) menos intensas do que apresentado na Figura 38. Além disso, o eco de fundo se mostrou enfraquecido na região dos entalhes. Desta forma, no que se refere à difração, ela surge de um modo quase imperceptível nos ecogramas, porém possível de dimensionar, apresentando um valor de 12,46mm para o entalhe de 12,5mm e 17,30mm para o entalhe de 17mm. A tabela 10 resume os valores experimentais encontrados utilizando o cabeçote de 10MHz e a sapata de 60°.

Tabela 10 - Dados experimentais de todas as profundidades dos entalhes inspecionados.

Profundidade real do entalhe (mm)	Onda	Dados Experimentais	
		TOF (μs)	Profundidade (mm)
8mm	Lateral	14,42	d=9,14mm
	Difração na extremidade	14,95	
	Fundo	17,83	
12,5mm	Lateral	14,42	d=13,75mm d _{inv} =12,46mm
	Difração na extremidade	15,53	
	Fundo	17,83	
17mm	Lateral	14,42	d _{inv} =17,30mm
	Difração na extremidade	16,09	
	Fundo	17,83	

Para o valor de 9,14mm obteve-se o maior erro percentual comparado com o valor real, que foi de 14,2%. Já, para a profundidade experimental de 12,46mm o erro percentual ficou em apenas 0,3%. Quanto aos valores de 13,75mm e 17,30mm, obtiveram-se os erros percentuais de 10% e 1,8%, respectivamente.

Adicionalmente, para o cabeçote de 10MHz com a sapata de 60° também não houve problemas na detecção, ou seja, todas as discontinuidades ficaram em zonas detectáveis, conforme mostra a Figura 40.

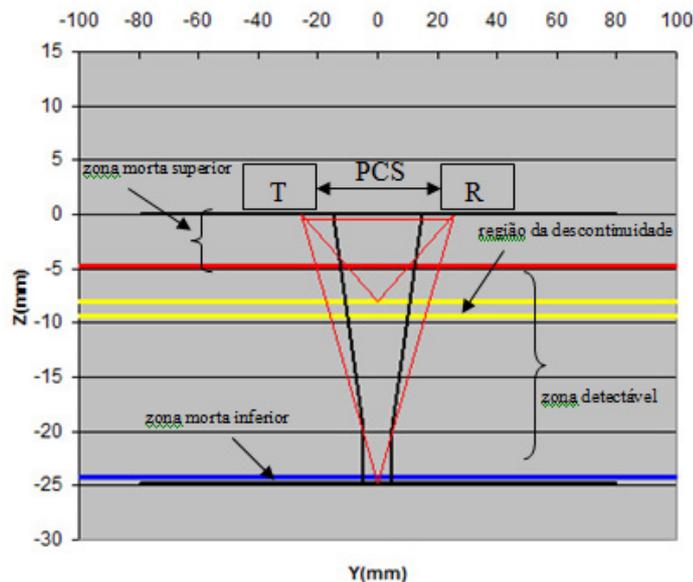


Figura 40 - Esquema mostrando o efeito das zonas mortas na medição da profundidade de uma descontinuidade de 8mm no corpo de prova com entalhes, utilizando cabeçote de 10MHz e sapata de 60 graus. A unidade Y (mm) representa a distância dos cabeçotes e a unidade Z (mm) representa a profundidade. PCS = 51mm; T = Cabeçote transmissor; R = Cabeçote Receptor.

Para o caso mais crítico de 8mm (faixa delimitada pelas linhas amarelas), o entalhe ficou localizado dentro da zona detectável e o limite máximo da zona morta superior ficou em 5mm, o que não prejudicou a visualização da difração.

Finalmente, utilizando os cabeçotes de 10MHz colocados na sapata de 70°, com o CP3 posicionado com os entalhes de 12,5mm e 17mm de profundidade aflorando na superfície, obteve-se os seguintes ecogramas (A-scan e B-scan) representado pela Figura 41.

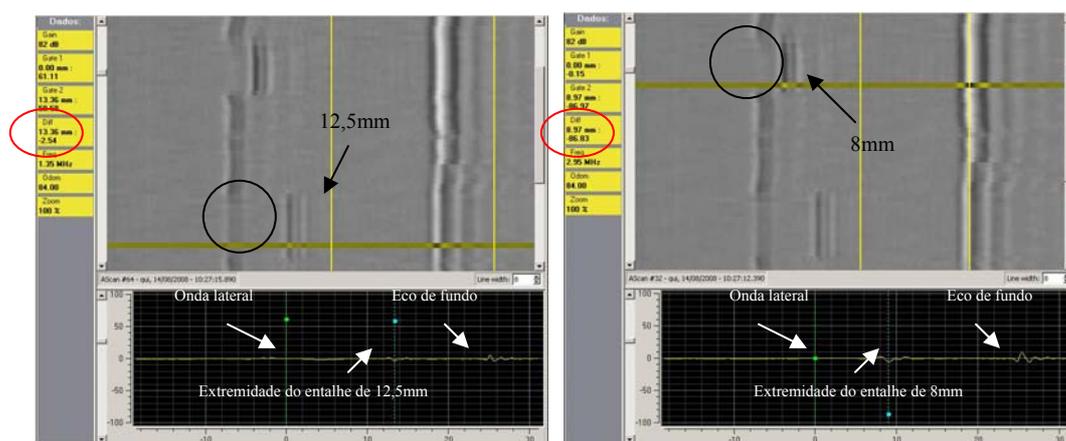


Figura 41 - Ecogramas com entalhes de 12,5mm (à esquerda) e 8mm (à direita) aflorando na superfície. Nota-se o bloqueio da onda lateral na região da descontinuidade (círculo escuro). O círculo vermelho indica o valor da medição.

Isto permite verificar que todos os ecos aparecem bem enfraquecidos nos ecogramas, porém possíveis de ser dimensionados. Desta forma, a onda lateral fica bloqueada na região dos entalhes em virtude do posicionamento do CP. Logo, o valor experimental para o entalhe de 12,5mm ficou em 13,36mm e para o entalhe de 8mm ficou em 8,97mm.

Após a inversão do corpo de prova, isto é, posicionando-o com os entalhes aflorando na superfície oposta, foi possível obter os ecogramas apresentados na Figura 42.

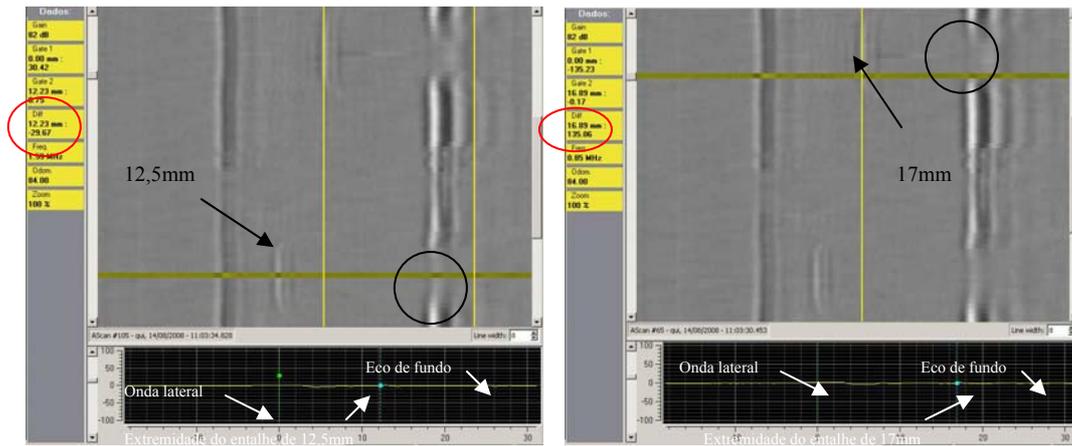


Figura 42 - Ecogramas com entalhes de 12,5mm (à esquerda) e 17mm (à direita) aflorando na superfície oposta. Nota-se o enfraquecimento e a distorção do eco de fundo (círculo escuro). O círculo vermelho indica o valor da medição.

Nesta configuração, a onda lateral surge e o eco de fundo, praticamente, desaparece na região dos entalhes e a difração é quase imperceptível. Os valores experimentais ficaram em 12,23mm para o entalhe de 12,5mm e 16,89mm para o entalhe de 17mm.

Conseqüentemente, os valores experimentais para a utilização do cabeçote de 10MHz com a sapata de 70° foram dispostos resumidos na tabela 11.

Tabela 11 - Dados experimentais de todas as profundidades dos entalhes inspecionados.

Profundidade real do entalhe (mm)	Onda	Dados Experimentais	
		TOF (μ s)	Profundidade (mm)
8mm	Lateral	18,40	d=8,97mm
	Difração na extremidade	18,72	
	Fundo	20,80	
12,5mm	Lateral	18,40	d=13,36mm d _{inv} =12,23mm
	Difração na extremidade	19,14	
	Fundo	20,80	
17mm	Lateral	18,40	d _{inv} =16,89mm
	Difração na extremidade	19,54	
	Fundo	20,80	

Para a profundidade experimental de 8,97mm obteve-se o maior erro percentual para o caso, que foi de 12,1%. Já, para o valor de 16,89mm o erro percentual ficou em apenas 0,6%. Com relação aos valores de 13,36mm e 12,23mm, os erros percentuais ficaram em 6,9% e 2,2%, respectivamente.

Além disso, para o cabeçote de 10MHz com a sapata de 70° também não houve problemas na detecção, ou seja, todas as descontinuidades ficaram em zonas detectáveis, conforme mostra a Figura 43.

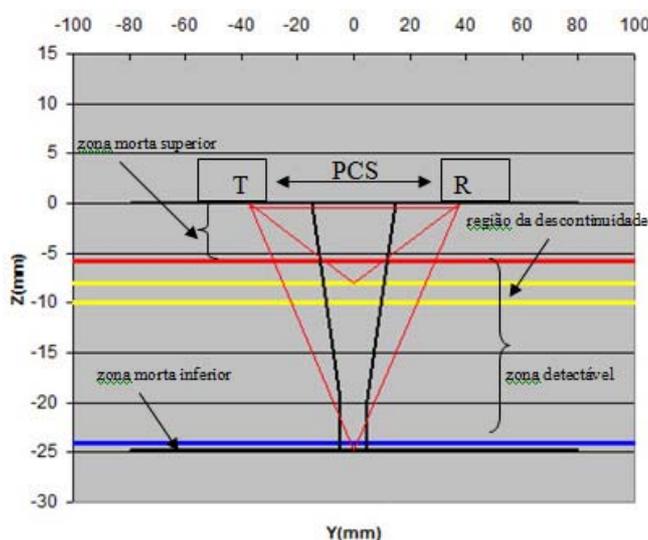


Figura 43 - Esquema mostrando o efeito das zonas mortas na medição da profundidade de uma descontinuidade de 8mm no corpo de prova com entalhes, utilizando cabeçote de 10MHz e sapata de 70 graus. A unidade Y (mm) representa a distância dos cabeçotes e a unidade Z (mm) representa a profundidade. PCS = 75mm; T = Cabeçote transmissor; R = Cabeçote Receptor.

Para o caso mais crítico de 8mm (faixa delimitada pelas linhas amarelas) foi possível dimensionar a difração, pois ela ficou localizada na zona detectável do esquema da Figura 43. Isto porque o limite máximo da zona morta superior ficou em torno de 6mm de profundidade, o que não impediu a análise.

Complementando, na Figura 44, os resultados de profundidades experimentais foram colocados em um gráfico de barras, mostrando o valor para cada variação de ensaio utilizado, em comparação com a profundidade real. Desta forma, no eixo X, a numeração de 1 a 4 se refere aos refletores analisados, sendo os números 1 e 2 referentes aos entalhes aflorando na superfície do ensaio, sendo eles 8mm e 12,5mm respectivamente. Já os números 3 e 4 se referem aos entalhes aflorando na superfície oposta à varredura, sendo eles 12,5mm e 17mm. No eixo Y, tem-se a profundidade dos entalhes em *mm*.

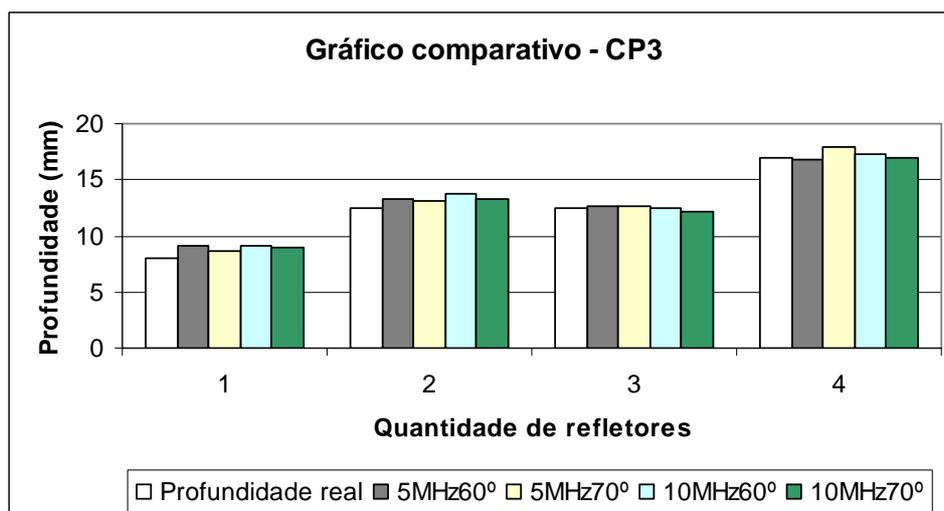


Figura 44 – Gráfico comparativo mostrando as profundidades experimentais obtidas para cada variação do ensaio no CP3.

É possível constatar que a variação que apresentou o melhores resultados foi o dimensionamento do entalhe de 12,5mm aflorando na superfície oposta à varredura, representado pelo número 3 na Figura 44. Este mesmo entalhe dimensionado pela outra superfície (aflorando na superfície de varredura) apresentou uma discrepância de valores bem maior. Com relação aos entalhes aflorando na superfície, tanto na profundidade de 8mm quanto na profundidade de 12,5mm a variação que utiliza os cabeçotes de 5MHz e a sapata de 70° apresentou os resultados de profundidade mais próximos dos valor real, o que não aconteceu para o entalhe de 17mm, aflorando na superfície oposta, no qual teve o pior resultado com esta variação. Já, para os cabeçotes de 5MHz colocados nas sapatas de 60° o erro foi maior para estes entalhes aflorando na superfície de varredura. Já, aumentando a frequência para 10MHz e mantendo o ângulo de sapata de 70°, para o entalhe mais profundo (17mm) o erro no dimensionamento foi mínimo (menor que 1%), conforme valores percentuais mencionados nesta dissertação. Isto também ocorre para os cabeçotes de 10MHz colocados nas sapatas de 60° que tiveram um melhor resultado no entalhe mais profundo de 17mm, representado pelo número 4 na Figura 44.

5.4 CP4: amostra com furos de diferentes profundidades

Inicialmente o CP4 foi inspecionado com os cabeçotes de 5MHz e as sapatas de 60° varrendo no sentido crescente dos furos, ou seja, da profundidade de 12,5mm à profundidade de 2,5mm, conforme mostra o desenho da Figura 28 no procedimento experimental. A Figura 45 mostra o ecograma para esta situação.

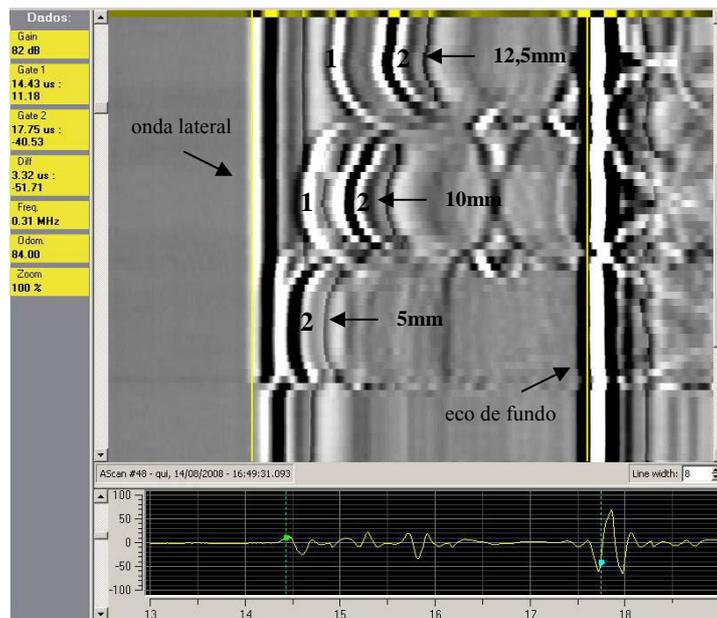


Figura 45 – Imagem revelando os furos do corpo de prova obtidos por difração no sentido crescente. (1) difração superior do furo; (2) difração inferior do furo.

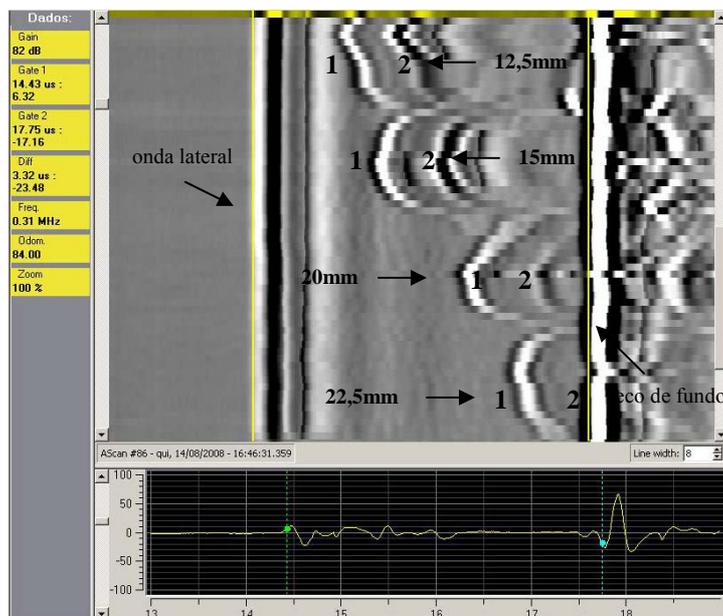


Figura 46 - Imagem revelando os furos do corpo de prova obtidos por difração no sentido decrescente. (1) difração superior do furo; (2) difração inferior do furo.

Tanto a onda lateral quanto o eco de fundo estão presentes no ecograma, pelo fato do CP4 possuir apenas defeitos internos (furos passantes), o que gera dois ecos difratados. Desta forma, a análise pelo B-scan nos mostra todos os furos obtidos durante a varredura. Logo, os entalhes de 12,5 e 10mm, representados na Figura 45, foram possíveis de dimensionar, pois tanto a difração superior quanto a difração inferior do furo aparecem bem definidas. Já no que se refere ao furo de 5mm de profundidade a difração superior ficou mascarada na zona morta superior e apenas a difração inferior ficou visível no B-scan, o que impossibilitou o dimensionamento. Quanto ao furo de 2,5mm de profundidade a análise também não foi possível, isto porque tanto a difração superior quanto a difração inferior do furo ficaram mascaradas. MOURA e VASCONCELOS (2006) mostraram que para um entalhe usinado a uma profundidade de 2mm, a detecção pela técnica TOFD utilizando cabeçotes de 5MHz fixados em sapatas de 60° de ângulo da onda longitudinal não se realizou. Já para um defeito localizado a 5mm de profundidade, MOURA e VASCONCELOS (2006) conseguiram dimensionar com esta configuração, porém com um erro percentual com relação ao valor real bem elevado, sendo de, aproximadamente, 40%. De acordo com BABY et al. (2002), isto é devido a onda lateral que obscurece os sinais difratados na ponta de entalhes próximos à superfície e também devido a inerente falta de tempo de resolução próximo à superfície.

Invertendo o corpo de prova, foi possível realizar a inspeção no sentido decrescente dos furos, conforme mostra a Figura 46.

Pode-se concluir que, os furos localizados nas profundidades de 12,5, 15 e 20mm foram possíveis de dimensionar, pois tanto a difração superior quanto a difração inferior ficaram visíveis no B-scan. No que se refere ao furo de 22,5mm, a difração superior ficou bem visível, porém a difração inferior ficou no limite da zona morta inferior, o que não impediu o dimensionamento.

A tabela 12 resume todos os resultados obtidos utilizando o cabeçote de 5MHz e a sapata de 60° na análise do CP4.

Tabela 12 – Dados experimentais de todas as profundidades dos furos inspeccionadas.

Profundidade real do furo (mm)	Onda	Dados Experimentais	
		TOF (μs)	Profundidade e diâmetro do furo (mm)
d=22,5 mm	Lateral	14,42	d=21,73mm $\Phi=3,22$ mm
	Difração na extremidade superior do furo	17,04	
	Difração na extremidade inferior do furo	17,75	
	Fundo	17,72	
d=20 mm	Lateral	14,42	d=19,14 mm $\Phi=3,55$ mm
	Difração na extremidade superior do furo	16,51	
	Difração na extremidade inferior do furo	17,25	
	Fundo	17,72	
d=15 mm	Lateral	14,42	d=14,38 mm $\Phi=3,46$ mm
	Difração na extremidade superior do furo	15,66	
	Difração na extremidade inferior do furo	16,26	
	Fundo	17,72	
d=12,5 mm	Lateral	14,42	d=11,90 mm $\Phi=3,44$ mm
	Difração na extremidade superior do furo	15,28	
	Difração na extremidade inferior do furo	15,81	
	Fundo	17,72	
d=10 mm	Lateral	14,42	d=9,22 mm $\Phi=3,21$ mm
	Difração na extremidade superior do furo	14,95	
	Difração na extremidade inferior do furo	15,36	
	Fundo	17,72	
d=5 mm	Lateral	14,42	-
	Difração na extremidade superior do furo	-	
	Difração na extremidade inferior do furo	15,11	
	Fundo	17,72	
d=2,5 mm	Lateral	14,42	-
	Difração na extremidade superior do furo	-	
	Difração na extremidade inferior do furo	-	
	Fundo	17,72	

Contudo, analisando os erros percentuais para cada profundidade de furo, considerando a profundidade real 100%, obteve-se para o valor de 21,73mm o menor erro percentual, que foi de 3,4%. Já para o valor experimental de 9,22mm, referente ao furo de 10mm de profundidade, o erro percentual ficou em 7,8%. Este valor é aceitável se comparado ao que MOURA e VASCONCELOS (2006), no dimensionamento do seu corpo de prova, encontraram um erro percentual bem elevado para esta mesma profundidade de 10mm (22%). Já com relação aos valores experimentais de 11,9mm, 14,38mm e 19,14mm (tabela 16), os erros percentuais ficaram em 4,8%, 4,1% e 4,3%, respectivamente. MOURA e VASCONCELOS (2006), para um entalhe localizado a 15mm, comparando ao encontrado nesta dissertação (tabela 16), obtiveram um erro percentual de 1,9%, o que representa também um bom resultado. BETTI et al. (2000), ao confeccionar três blocos (trincas internas, próximas à superfície e na superfície), para um entalhe de 14,6mm interno ao material, obteve 14mm de valor experimental pela técnica TOFD, o que dá um erro percentual de 4,1%, sendo semelhante ao obtido nesta dissertação para o entalhe de 15mm de profundidade. Já no que se refere ao diâmetro, o furo localizado na profundidade de 22,5mm apresentou o resultado mais próximo do real, com um erro percentual de 7,3%. Esta diferença com relação ao valor real pode estar relacionada com o processo de usinagem, possivelmente, pela presença de rebarbas no contorno do furo, que causam este “alargamento” no diâmetro, assim, o eco acaba difratando nas rebarbas e não na circunferência do furo.

A seguir, na Figura 47, foi possível mostrar o efeito da zona morta nos furos com profundidades mais críticas, ou seja, próximos a ela.

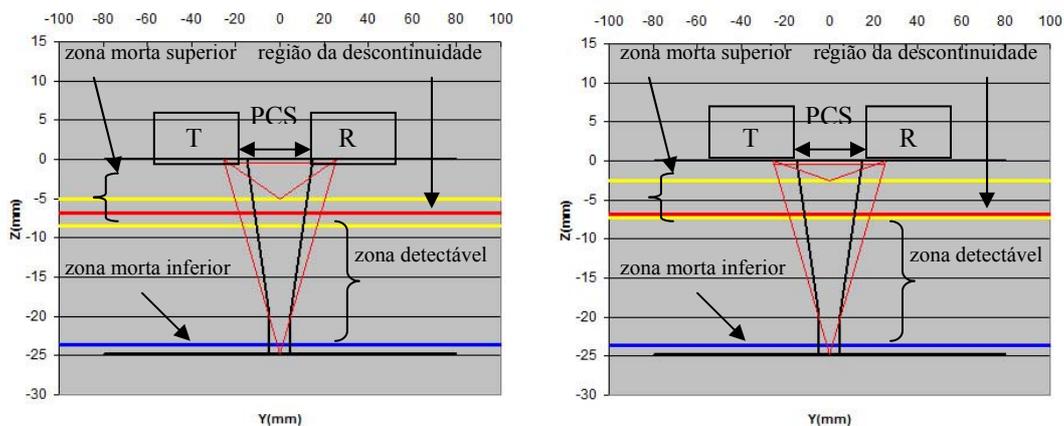


Figura 47 – Imagem mostrando o efeito da zona morta para os furos de 2,5mm (à direita) e 5mm (à esquerda). As linhas amarelas delimitam a região do furo e a linha vermelha marca o limite da zona morta superior.

Portanto, os furos localizados a 2,5mm e a 5mm não puderam ser dimensionados, conforme já foi observado no ecograma da Figura 45, pois o limite da zona morta ficou em torno de 7mm de profundidade (de acordo com a linha vermelha horizontal na Figura 47). O furo de 2,5mm ficou totalmente dentro da zona morta, conforme mostra a faixa de linhas amarelas na Figura 47. Quanto ao furo de 5mm, parte da difração ficou dentro da zona morta superior e a outra parte ficou na zona detectável, o que impediu a análise.

Em seguida, foram utilizados os cabeçotes de 5MHz juntamente com as sapatas de 70° varrendo no sentido crescente dos furos no CP4, conforme mostra o ecograma da Figura 48

O ecograma se mostrou menos intenso do que o apresentado anteriormente (com a sapata de 60°), mesmo assim foi possível identificar os ecos difratados com clareza. Logo, os furos localizados a 12,5mm e 10mm foram dimensionados. Com relação aos furos localizados a 5mm e 2,5mm, o dimensionamento não pôde ser realizado, pois os picos referentes à difração ficaram mascarados na zona morta superior.

Invertendo o corpo de prova, foi possível realizar a inspeção no sentido decrescente dos furos, conforme mostra a Figura 49

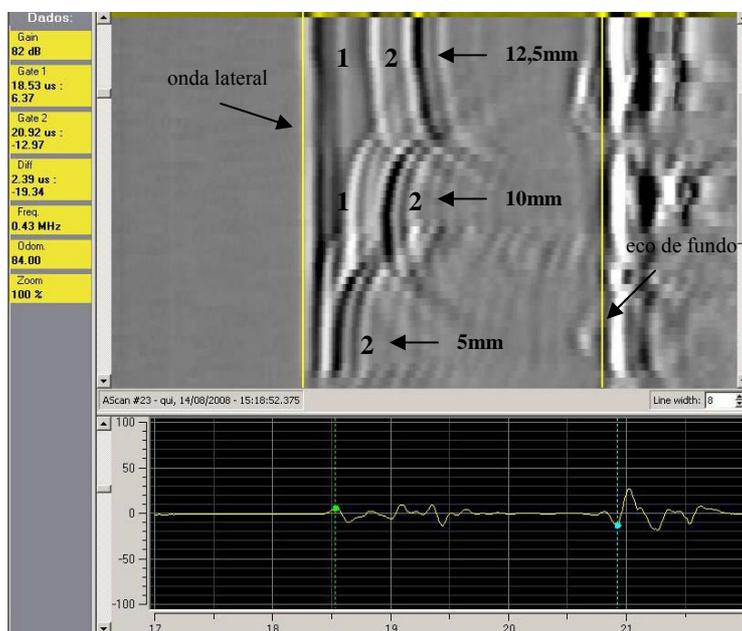


Figura 48 - Imagem revelando os furos do corpo de prova obtidos por difração no sentido crescente. (1)difração superior do furo; (2)difração inferior do furo.

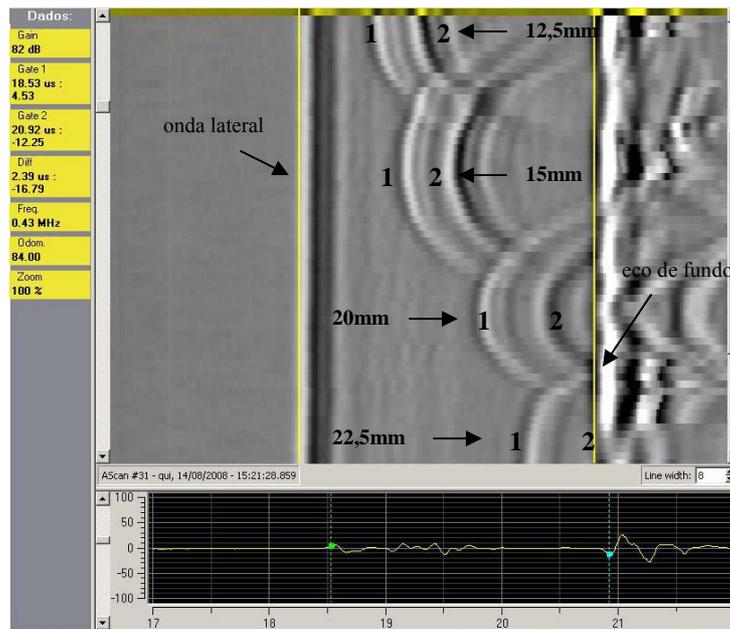


Figura 49 - Imagem revelando os furos do corpo de prova obtidos por difração no sentido decrescente. (1) difração superior do furo; (2) difração inferior do furo.

À medida que a superfície era varrida no sentido decrescente dos furos, o furo em questão aparecia cada vez mais próximo do fundo do CP. Desta forma foi possível dimensionar os furos nas profundidades de 12,5mm, 15mm, 20mm e 22,5mm, sendo que este último ficou próximo ao limite da zona morta inferior, isto é, bem próximo ao fundo (B-scan da Figura 49), o que não impediu a análise. A tabela 13 nos mostra os resultados das profundidades experimentais obtidas e dos diâmetros para cada furo inspecionado.

Todavia, considerando que a profundidade real de cada furo representa o 100%, tem-se que para o valor experimental de 21,32mm o erro percentual ficou em 5,2%, sendo o menor encontrado para este caso. Em contrapartida, para o valor experimental de 8,87mm o erro percentual ficou em 11,3%. Complementando, para os valores experimentais de 18,76mm, 13,59mm e 11,10mm, os erros percentuais ficaram em 6,2%, 9,4% e 11,2%. Quanto ao valor do diâmetro do furo para cada profundidade, o entalhe que se localiza a 22,5mm de profundidade apresentou o menor erro percentual, em torno de 13%.

Tabela 13 - Dados experimentais de todas as profundidades dos furos inspeccionadas.

Profundidade real do furo (mm)	Onda	Dados Experimentais	
		TOF (μs)	Profundidade e diâmetro do furo (mm)
d=22,5 mm	Lateral	18,38	d=21,32 mm $\Phi=3,39$ mm
	Difração na extremidade superior do furo	20,16	
	Difração na extremidade inferior do furo	20,71	
	Fundo	20,73	
d=20 mm	Lateral	18,38	d=18,76 mm $\Phi=3,49$ mm
	Difração na extremidade superior do furo	19,78	
	Difração na extremidade inferior do furo	20,30	
	Fundo	20,73	
d=15 mm	Lateral	18,38	d=13,59 mm $\Phi=3,50$ mm
	Difração na extremidade superior do furo	19,14	
	Difração na extremidade inferior do furo	19,55	
	Fundo	20,73	
d=12,5 mm	Lateral	18,38	d=11,10 mm $\Phi=3,42$ mm
	Difração na extremidade superior do furo	18,89	
	Difração na extremidade inferior do furo	19,24	
	Fundo	20,73	
d=10 mm	Lateral	18,38	d=8,87 mm $\Phi=3,40$ mm
	Difração na extremidade superior do furo	18,71	
	Difração na extremidade inferior do furo	19,00	
	Fundo	20,73	
d=5 mm	Lateral	18,38	-
	Difração na extremidade superior do furo	-	
	Difração na extremidade inferior do furo	18,56	
	Fundo	20,73	
d=2,5 mm	Lateral	18,38	-
	Difração na extremidade superior do furo	-	
	Difração na extremidade inferior do furo	-	
	Fundo	20,73	

Na Figura 50 verifica-se o efeito da zona morta nos furos com profundidades de 2,5mm e 5mm.

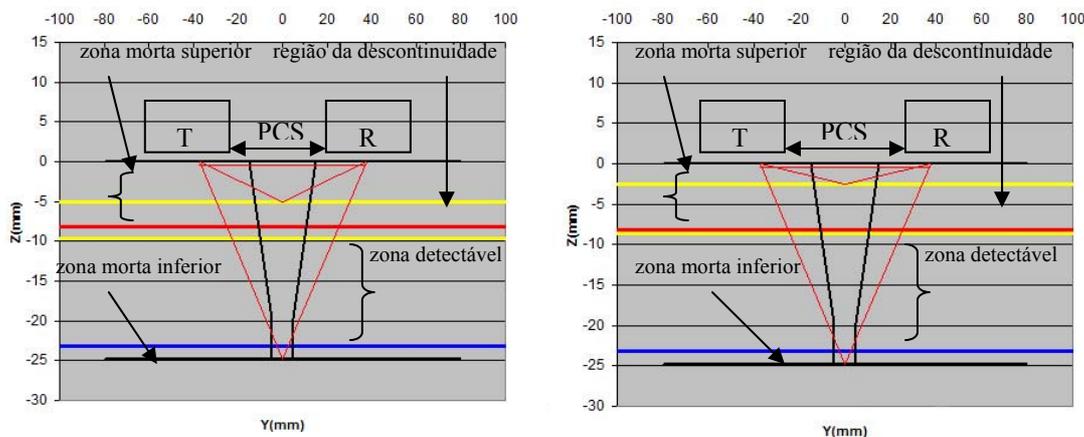


Figura 50 – Diagrama esquemático mostrando o efeito da zona morta para os furos de 2,5mm (à direita) e 5mm (à esquerda). As linhas amarelas delimitam a região do furo e a linha vermelha marca o limite da zona morta superior.

Nota-se que, para ambos os diagramas, a profundidade do entalhe, representada pelas linhas amarelas na Figura 50, caiu dentro da região que limita a zona morta superior, o que impossibilitou o dimensionamento.

Por conseguinte, foram utilizados os cabeçotes de 10MHz juntamente com as sapatas de 60° varrendo no sentido crescente dos furos no CP4, conforme mostra o ecograma da Figura 51.

Com o aumento da frequência, a intensidade do sinal no ecograma diminuiu, mesmo assim foi possível a identificação dos ecos principais. Logo, os ecos difratados referentes à profundidade de 12,5mm e 10mm estão bem definidos na representação B-scan da Figura 51. Quanto aos entalhes de 2,5mm e 5mm de profundidade, o dimensionamento ficou prejudicado também devido a zona morta.

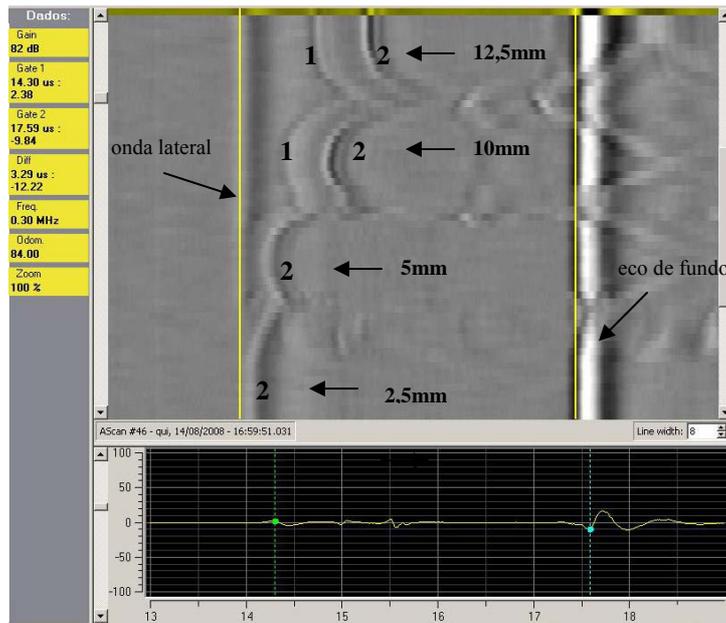


Figura 51 - Imagem revelando os furos do corpo de prova obtidos por difração no sentido crescente. (1)difração superior do furo; (2)difração inferior do furo.

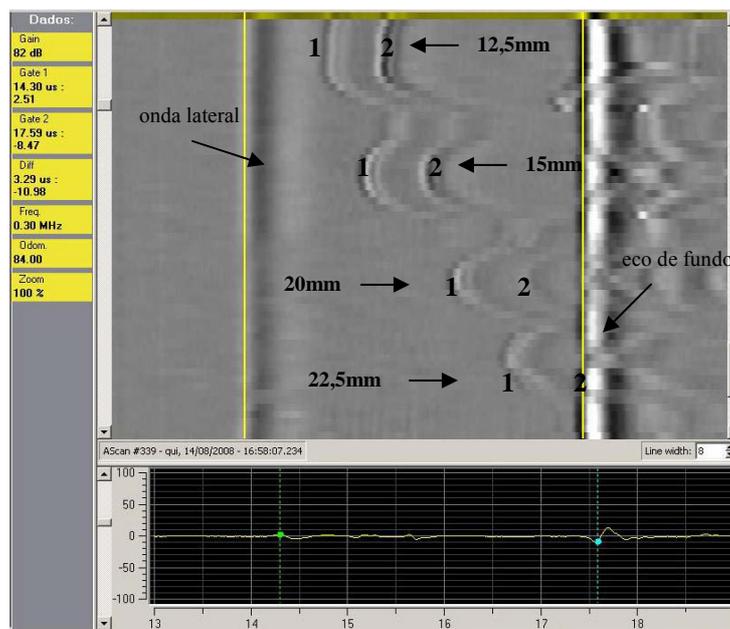


Figura 52 - Imagem revelando os furos do corpo de prova obtidos por difração no sentido decrescente. (1)difração superior do furo; (2)difração inferior do furo.

Conseqüentemente, invertendo o corpo de prova, foi realizada a inspeção no sentido decrescente dos furos, conforme mostra a Figura 52. Assim, todos os entalhes foram possíveis de dimensionar, sendo que o furo na profundidade de 22,5mm ficou quase na zona morta do eco de fundo, porém este fato não impediu a interpretação do ecograma.

A tabela 14 apresenta todos os dados experimentais para os furos inspecionados com os cabeçotes de frequência 10MHz colocados na sapata de 60°.

Tabela 14 - Dados experimentais de todas as profundidades dos furos inspeccionadas

Profundidade real do furo (mm)	Onda	Dados Experimentais	
		TOF (μs)	Profundidade e diâmetro do furo (mm)
d=22,5 mm	Lateral	14,54	d=21,45 mm $\Phi=3,46$ mm
	Difração na extremidade superior do furo	17,06	
	Difração na extremidade inferior do furo	17,81	
	Fundo	17,86	
d=20 mm	Lateral	14,54	d=18,84 mm $\Phi=3,49$ mm
	Difração na extremidade superior do furo	16,54	
	Difração na extremidade inferior do furo	17,24	
	Fundo	17,86	
d=15 mm	Lateral	14,54	d=13,79 mm $\Phi=3,50$ mm
	Difração na extremidade superior do furo	15,67	
	Difração na extremidade inferior do furo	16,35	
	Fundo	17,86	
d=12,5 mm	Lateral	14,54	d=11,21 mm $\Phi=3,48$ mm
	Difração na extremidade superior do furo	15,28	
	Difração na extremidade inferior do furo	15,80	
	Fundo	17,86	
d=10 mm	Lateral	14,54	d=8,33 mm $\Phi=3,60$ mm
	Difração na extremidade superior do furo	14,97	
	Difração na extremidade inferior do furo	15,40	
	Fundo	17,86	
d=5 mm	Lateral	14,54	-
	Difração na extremidade superior do furo	-	
	Difração na extremidade inferior do furo	15,60	
	Fundo	17,86	
d=2,5 mm	Lateral	14,54	-
	Difração na extremidade superior do furo	-	
	Difração na extremidade inferior do furo	-	
	Fundo	17,86	

Para o valor experimental de 21,45mm, referente ao furo de profundidade 22,5mm, obteve-se o menor erro percentual, que ficou em 4,7%. Já para o valor experimental de 8,33mm, referente ao refletor localizado a 10mm, o erro ficou em 16,7%. Os valores experimentais de 18,84mm, 13,79mm e 11,21mm tiveram erros percentuais de 5,8%, 8,1% e 10,3%, respectivamente.

Na Figura 53 mostra-se o efeito da zona morta para os furos de profundidades de 2,5mm e 5mm, conforme verificado na prática na Figura 51.

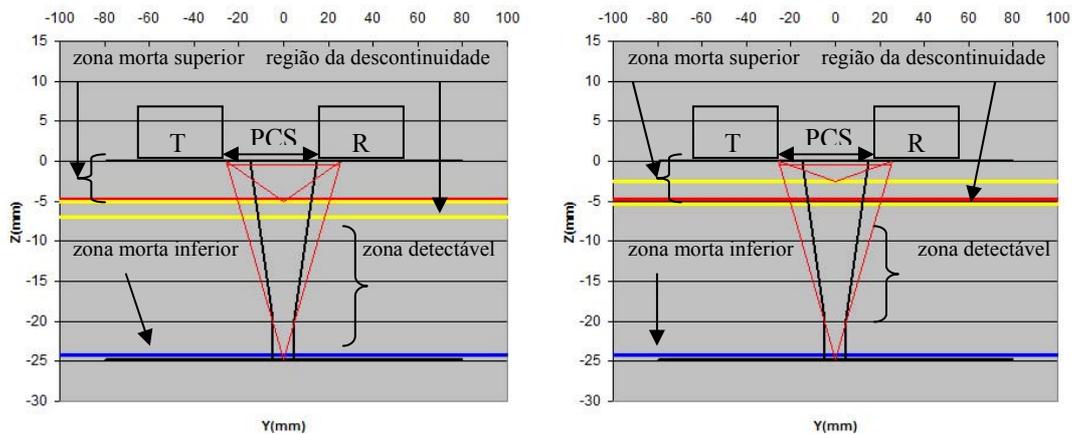


Figura 53 - Imagem mostrando o efeito da zona morta para os furos de 2,5mm (à direita) e 5mm (à esquerda). As linhas amarelas delimitam a região do furo e a linha vermelha marca o limite da zona morta superior.

Percebe-se que tanto o furo de 2,5mm quanto o furo de 5mm ficou na região da zona morta, o que impossibilitou a análise.

Finalmente, foram utilizados os cabeçotes de 10MHz juntamente com as sapatas de 70° varrendo no sentido crescente dos furos no CP4, conforme mostra o ecograma da Figura 54. Os furos referentes às profundidades de 12,5mm e 10mm foram possíveis de dimensionar, embora a intensidade do sinal esteja bem enfraquecida comparado aos casos anteriores para o CP4. Quanto aos entalhes de 5mm e 2,5mm, a análise não foi possível devido a zona morta superior.

Invertendo o corpo de prova, foi realizada a inspeção no sentido decrescente dos furos, conforme mostra a Figura 55. Apesar dos ecos também estarem bem enfraquecidos, todos os entalhes foram possíveis de dimensionar, sendo que o furo na profundidade de 22,5mm ficou no limite inferior da zona morta, porém este fato não impediu a interpretação do ecograma.

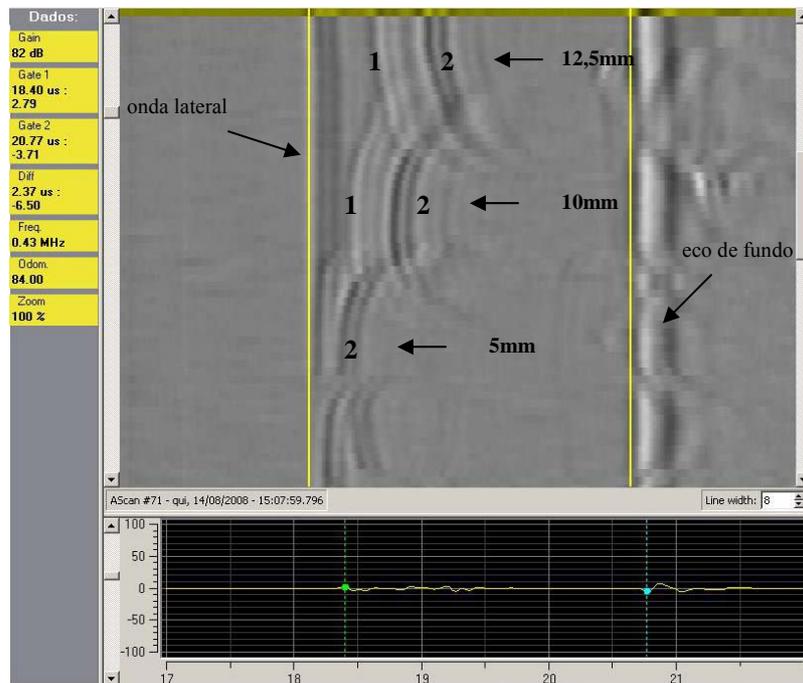


Figura 54 - Imagem revelando os furos do corpo de prova obtidos por difração no sentido crescente. (1) difração superior do furo; (2) difração inferior do furo.

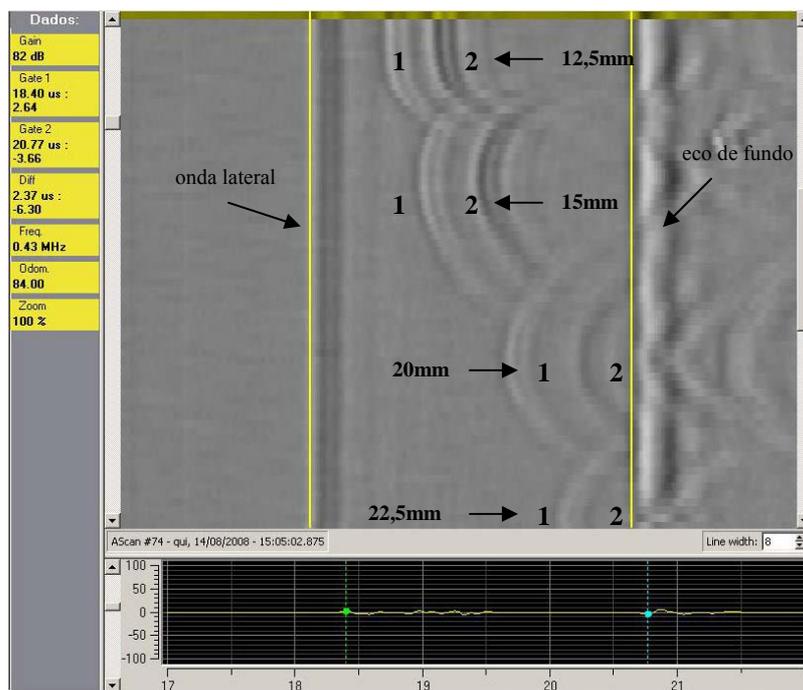


Figura 55 - Imagem revelando os furos do corpo de prova obtidos por difração no sentido decrescente. (1) difração superior do furo; (2) difração inferior do furo.

A tabela 15 apresenta um resumo de todos os resultados experimentais obtidos com os cabeçotes de frequência 10MHz colocados sobre as sapatas de 70°.

Tabela 15 - Dados experimentais de todas as profundidades dos furos inspecionadas.

Profundidade real do furo (mm)	Onda	Dados Experimentais	
		TOF (μs)	Profundidade e diâmetro do furo (mm)
d=22,5 mm	Lateral	18,40	d=21,17 mm $\Phi=3,52$ mm
	Difração na extremidade superior do furo	20,16	
	Difração na extremidade inferior do furo	20,74	
	Fundo	20,76	
d=20 mm	Lateral	18,40	d=18,69 mm $\Phi=3,51$ mm
	Difração na extremidade superior do furo	19,79	
	Difração na extremidade inferior do furo	20,32	
	Fundo	20,76	
d=15 mm	Lateral	18,40	d=13,79 mm $\Phi=3,44$ mm
	Difração na extremidade superior do furo	19,17	
	Difração na extremidade inferior do furo	19,58	
	Fundo	20,76	
d=12,5 mm	Lateral	18,40	d=11,25 mm $\Phi=3,36$ mm
	Difração na extremidade superior do furo	18,91	
	Difração na extremidade inferior do furo	19,26	
	Fundo	20,76	
d=10 mm	Lateral	18,40	d=8,68 mm $\Phi=3,46$ mm
	Difração na extremidade superior do furo	18,69	
	Difração na extremidade inferior do furo	18,98	
	Fundo	20,76	
d=5 mm	Lateral	18,40	-
	Difração na extremidade superior do furo	-	
	Difração na extremidade inferior do furo	18,66	
	Fundo	20,76	
d=2,5 mm	Lateral	18,40	-
	Difração na extremidade superior do furo	-	
	Difração na extremidade inferior do furo	-	
	Fundo	20,76	

Logo, para o valor experimental de 21,17mm referente ao furo de 22,5mm de profundidade, o erro experimental ficou em 5,9%. Quanto ao valor experimental de 9,68mm, referente ao furo de 10mm de profundidade, o erro ficou em 13,2%. Já, quanto aos valores experimentais de 18,69mm, 13,79mm e 11,25mm, os erros experimentais ficaram em 6,5%, 8,1% e 10%.

Na Figura 56 mostra-se o efeito da zona morta para os furos de profundidades de 2,5mm e 5mm, conforme verificado na prática na Figura 54.

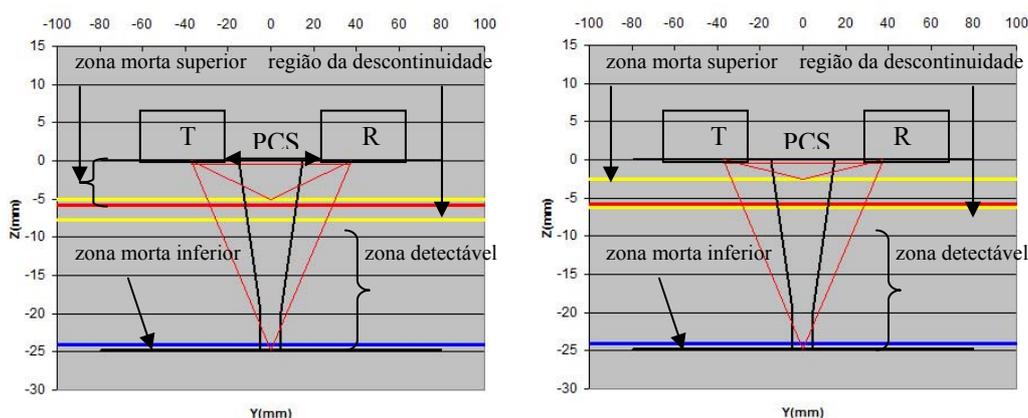


Figura 56 - Imagem mostrando o efeito da zona morta para os furos de 2,5mm (à direita) e 5mm (à esquerda). As linhas amarelas delimitam a região do furo e a linha vermelha marca o limite da zona morta superior.

Como já era previsto na teoria, ambos os furos seriam impossíveis de dimensionar utilizando a onda longitudinal, por estarem localizados em uma região no qual a zona morta superior está presente.

Complementando a discussão, a Figura 57 apresenta um comparativo que demonstra os valores de profundidades experimentais obtidos para cada variação, comparando com a profundidade real do furo em questão. Logo, no eixo X, a numeração de 1 a 7 indica as sete diferentes profundidades analisadas, sendo elas: 2,5mm, 5mm, 10mm, 12,5mm, 15mm, 20mm e 22,5mm.

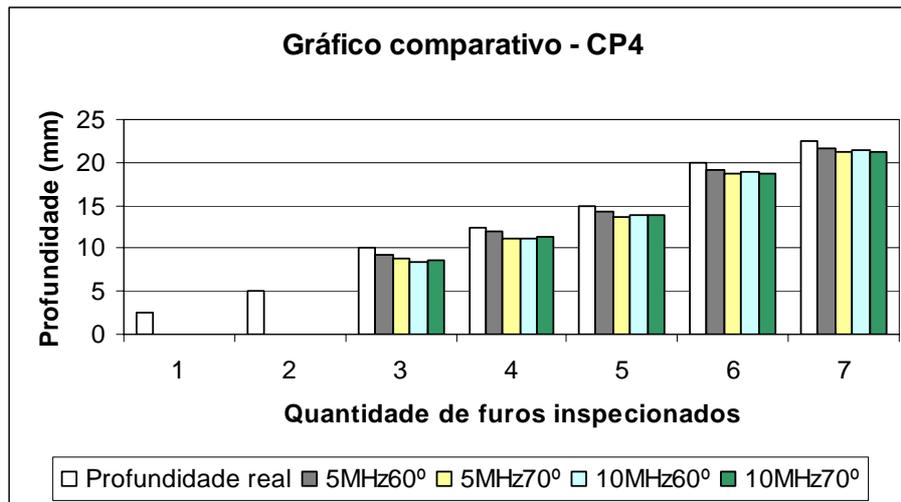


Figura 57 – Gráfico mostrando as profundidades experimentais obtidas comparando com a profundidade real de cada um dos sete furos para o CP4.

Como já foi discutido, nas profundidades reais de 2,5mm e 5mm, o dimensionamento não foi possível. FARLEY (2004), ao analisar trincas de diferentes profundidades intrínsecas em amostras de aço carbono por diferentes variações (frequência do cabeçote/ângulo da sapata), mostrou que defeitos tendo uma profundidade de aproximadamente 4mm ou menos são difíceis de identificar e dimensionar e podem não ser detectados se o operador não tiver conhecimento de sua presença na amostra. Além disso, foi verificado que diferentes variações não influenciam significativamente no dimensionamento do defeito, mas fazem a diferença para a detecção. Todavia, analisando as colunas para cada variação utilizada na dissertação, percebe-se claramente que a coluna que se aproxima mais do valor real é a referente ao cabeçote de 5MHz acoplado na sapata de 60°, sendo que este fato ocorre para todas as profundidades analisadas, sendo então a variação ideal para este tipo de inspeção. Além disso, constata-se que aumentando a frequência para 10MHz, utilizando o mesmo ângulo de 60° para a sapata, a precisão no dimensionamento aumenta a medida que a profundidade do furo aumenta, sendo que para a profundidade máxima de 22,5mm o resultado ficou bem próximo do apresentado pelo cabeçote de 5MHz. Assim, para a profundidade real de 10mm a precisão foi a pior das quatro variações, mas acima de 15mm de profundidade, os resultados foram bem melhores. Já, de acordo com a Figura 57, mantendo a frequência de 10MHz, e aumentando apenas o ângulo da sapata de 60° para 70°, é indicativo que ângulos maiores em profundidades maiores gera um pior resultado no dimensionamento.

6 CONCLUSÕES

A análise dos resultados obtidos neste trabalho permite concluir que:

- Para o entalhe em forma de “V” as variações apresentaram um erro experimental em torno de 5%. Isto se deve a geometria da ponta do entalhe, que favorece a ocorrência da difração. Assim, o melhor resultado foi verificado utilizando os cabeçotes de 5MHz acoplados nas sapatas de 70°, no qual o erro foi de apenas 2,8%.
- O corpo de prova usinado com entalhe reto apresentou um erro experimental mínimo ficou de 11% (10MHz/60°) e um máximo de 15,6% (10MHz/70°).
- Para entalhes aflorando na superfície de varredura, com profundidades menores que a metade da espessura do corpo de prova, a variação que utiliza cabeçotes de 5MHz acoplados em sapatas com 70° de ângulo é a mais indicada para o dimensionamento.
- Para um entalhe com profundidade igual à metade da espessura do corpo de prova, aflorando na superfície oposta à de varredura, o dimensionamento apresentou um pequeno erro experimental que variou entre 0,8 e 2,2%.
- Para entalhes aflorando na superfície oposta a de varredura, com profundidades maiores que a metade da espessura do corpo de prova, o dimensionamento utilizando cabeçotes de maior frequência (10MHz) se mostrou mais preciso.
- O dimensionamento dos furos com 2,5mm e 5mm de profundidade não foi possível para nenhuma das variações.
- Para defeitos internos a variação que utiliza os cabeçotes de 5MHz acoplados em sapatas de 60° apresentou o menor erro experimental.
- A margem de erro encontrada no dimensionamento dos entalhes seria aceitável para aplicação da mecânica da fratura.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realizar ensaios dinâmicos automatizados para monitorar o crescimento de trincas em serviço.
- Análise de materiais soldados a fim de detectar defeitos típicos, como: falta de penetração, falta de fusão, porosidades, entre outros.
- Estudar a viabilidade de ensaios em materiais de baixa espessura, através da análise da onda transversal difratada.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BLITZ, J. e SIMPSON G. **Ultrasonic Methods of Non-destructive Testing**. Chapman & Hall, London, First Edition; 1996.
2. FLOTTÉ, D. **Effective application of TOFD method for weld inspection at the manufacturing stage of pressure vessels**. TOFDPROOF Seminar; Villepinte 18 March 2005.
3. MONDAL, S. **An overview TOFD method and its Mathematical Model**. NDT net –Vol.5 N°4, April 2000.
4. BARROS, P.M. e CALDEIRA, R. **TOFD COMO TÉCNICA DE DETECÇÃO E DIMENSIONAMENTO DE DESCONTINUIDADES**. ISQ Brasil, 2004.
5. DARMON, M. et al. **Simulation of disoriented flaws in a TOFD technique configuration using GTD approach**. Review of Quantitative Nondestructive Evaluation Vol.27; p.155-162; 2008.
6. SILVA, I.C. et al. **Automatic Inspection using the TOFD Technique and Neural Networks**. 8th ECNDT; Barcelona; 2002.
7. BASKARAN et. al. **Ray Based Model for the Ultrasonic Time-of-Flight Diffraction Simulation of Thin Walled Structure Inspection**. Journal of Pressure Vessel Technology, Vol.127, August 2005.
8. BASKARAN et al. **Shear-wave time of flight diffraction (S-TOFD) technique**. NDT & E International 39; p.458-467; 2006.
9. BS 7706. **Guide to Calibration and setting-up of the ultrasonic time of flight diffraction (TOFD) technique for the detection, location and sizing of flaws**. British Standard; 1993.
10. MOLES, M. **Application of Time of Flight Diffraction for Weld Inspections**. NDT TECHNICS; 2008.
11. GINZEL, E. and FEHER, B. Materials Reserach Institute; May 2005.
12. MOURA, E.P. and VASCONCELOS, A.A. **Development of an automatic inspection equipment based on the TOFD technique**. 18th International Congress of Mechanical Engineering - November 6-11, 2005.
13. CHARLESWORTH, J.P. and TEMPLE, A.G. **Engineering Applications of Ultrasonic Time of Flight Diffraction**. Second Edition; 2001.

14. ENV 583-6. **Non-destructive testing. Ultrasonic examination. Time of flight diffraction technique as a method for detection and sizing of discontinuities.** European TOFD Standard, 2000.
15. BRAGA, R.M. **Treinamento em ensaio de ultra-som.** UFRGS; Escola de Engenharia – Departamento de Metalurgia – LAMEF; outubro/2007.
16. BETTI, F. et al. **Accuracy Capability of TOFD Technique in Ultrasonic Examination of Welds.** 15th WCNDT, Roma, 2000.
17. CARNEVAL et al. **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 Conferencia Panamericana de END, Buenos Aires, Outubro, 2007.
18. GOUJON, N.S. **Safety implications of TOFD for in-manufacture inspections.** HSE BOOKS, 2006.
19. MOREIRA, F. and GINZEL, E. **Linear Scanning Ultrasonic Inspection Developments with TOFD in Brazil, for the Replacement of Radiography and Manual Ultrasonic Inspection.** PANNDT, Rio de Janeiro, 2003.
20. FARLEY, J.M. et al. **Critical Evaluation of TOFD for search scanning.** WCNDT, Montreal, 2004.
21. CARVALHO, A.A. et al. **Reliability of non-destructive test techniques in the inspection of pipelines used in the oil industry.** International Journal of Pressure Vessels and Piping 85; p.745-751, 2008.
22. NATH, S.K. et al. **Sizing of surface-breaking cracks in complex geometry components mby ultrasonic Time-of-Flight Diffraction (TOFD) technique.** Insight Vol.49, n°.4, April, 2007.
23. BABY, S. et al. **Time of Flight Diffraction (TOFD) technique for accurate sizing of surface breaking cracks.** NDE, National Seminar of ISNT, Chennai, 2002.
24. SZAFARSKA, E. **A Rugged Ultrasonic Imaging Engine for Weld Inspection.** General Eletrics, GE Mapstar Presentation, 2008.
25. ANDERSON, T.L. **Fracture Mechanics – Fundamentals and Applications.** 2°Ed., CRC Press, 1994.
26. CALLISTER, W.D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução.** Quinta Edição, LTC, 2002.

9 ANEXOS

9.1 Caracterização do material

Para a análise metalográfica do material utilizado nos ensaios desta dissertação, foi retirada uma amostra no sentido transversal. Esta foi preparada segundo os procedimentos padrões de metalografia, como corte, embutimento, lixamento, polimento e ataque químico. Estas etapas foram realizadas de acordo com a norma NBR 13284 e atacadas quimicamente com reagente químico Nital 2% de acordo com a norma NBR 8108. O componente apresentou microestrutura ferrítica e perlítica (Figura 58). Realizou-se, também, ataque de contorno de grão, revelando grão tamanho 10 (ASTM), como mostra a Figura 59.

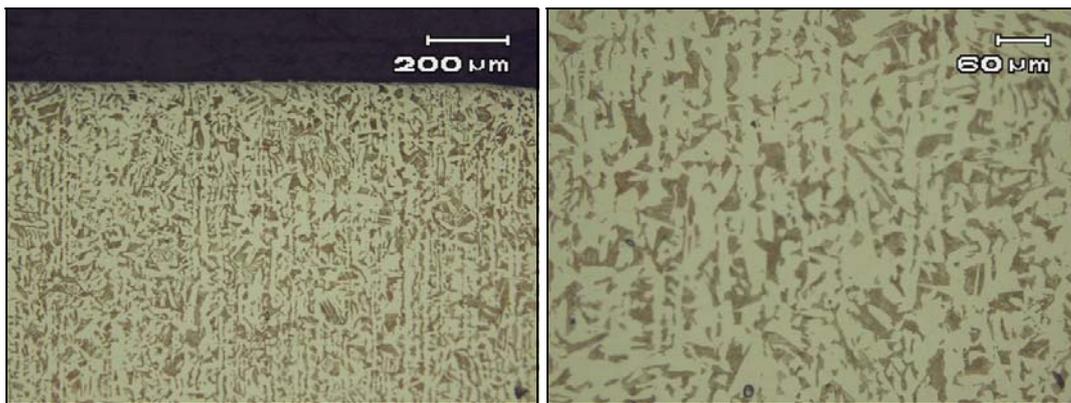


Figura 58 - Micrografias mostrando microestrutura ferrítica e perlítica, no sentido transversal.

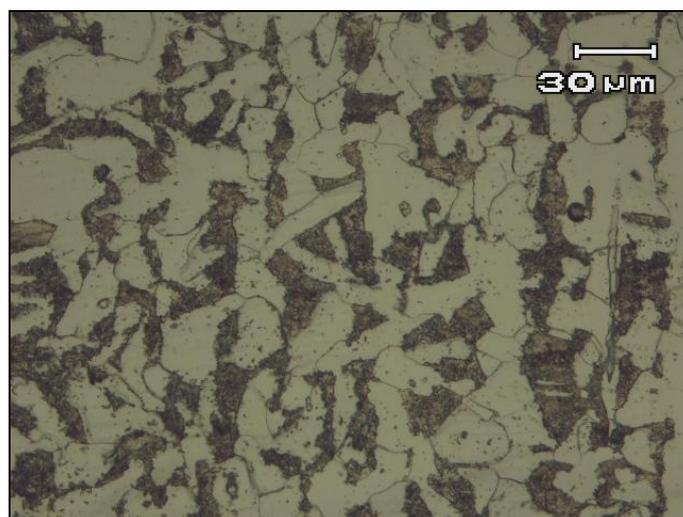


Figura 59 - Micrografia mostrando os grãos, tamanho 10.

A análise química foi realizada por espectrometria de emissão ótica conforme a Norma ASTM E1009. A tabela 16 mostra a média de três queimas realizadas.

Tabela 16 - Análise química.

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co
Média	0,209	0,185	1,044	0,021	0,01	0,027	<0,005	0,011	<0,001	<0,01

	Cu	Nb	Ti	V	W	Pb	Sn	Mg	B	Fe
Média	<0,01	0,002	<0,001	<0,001	<0,010	<0,002	<0,001	-	0,002	98,48

9.2 Conceitos básicos

9.2.1 Som e ultra-som

O som é uma onda mecânica que se propaga em todos os meios, com exceção do vácuo. Desde a antiguidade, o som emitido por um material representa um ensaio sônico na faixa audível e serve para verificar a sua qualidade avaliando algumas propriedades, como: densidade, porosidades, vazios, etc.

Na área da metalurgia, a utilização industrial mais antiga do ensaio sônico na faixa audível é conhecida como “ensaio do tinido”, utilizado para verificar a qualidade de peças fundidas, principalmente de sinos, segundo a história.

A faixa de som audível se situa entre 20 Hz e 20 KHz, sendo que fora dessa faixa o som não é audível para o ser humano, conforme mostrado na Figura 60 .

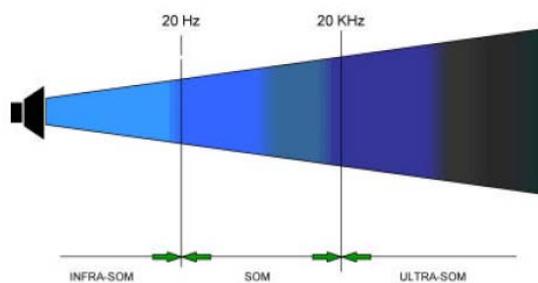


Figura 60 – Faixa de frequência de interesse para o ensaio ultra-sônico (ANDREUCCI, 2002).

Assim, a faixa de interesse para o ensaio ultra-sônico está acima de 20KHz, sendo que o campo de aplicação preferido se situa entre 0,5MHz e 12MHz. Em ultra-som ocorrem ondas mecânicas longitudinais, transversais e superficiais, conforme as definições a seguir (ANDREUCCI, 2002):

- **Longitudinais:** São ondas utilizadas para os ensaios ultra-sônicos com transdutores normais. Possuem a propriedade de vibrar a uma velocidade constante característica para cada material no mesmo sentido do deslocamento do feixe sônico. Assim, propagam-se em todos os meios sólidos, líquidos ou gasosos.

A tabela 17 nos mostra as velocidades de propagação das ondas longitudinais:

Tabela 17 – Velocidades de propagação das ondas longitudinais (ANDREUCCI, 2002).

Material	Velocidade (m/s)	Material	Velocidade (m/s)
Ar	330	Prata	3600
Alumínio	6300	Titânio	6100
Cobre	4700	Níquel	5600
Ouro	3200	Tungstênio	5200
Aço	5900	Magnésio	5800
Aço Inox	5800	Acrílico	2700
Nylon	2600	Aço Fundido	4800
Óleo (SAE30)	1700	Água	1480

- **Transversais ou de cisalhamento:** São ondas utilizadas para os ensaios ultra-sônicos com transdutores angulares. Apresentam a propriedade de vibrar a uma velocidade constante característica para cada material num sentido ortogonal ao deslocamento do feixe sônico. Logo, propagam-se apenas nos sólidos.

A tabela 18 nos mostra as velocidades de propagação das ondas transversais:

Tabela 18 – Velocidades de propagação das ondas transversais (ANDREUCCI, 2002).

Material	Velocidade (m/s)	Material	Velocidade (m/s)
Ar	-	Óleo (SAE30)	-
Alumínio	3100	Água	-
Cobre	2300	Prata	1600
Ouro	1200	Titânio	3100
Aço	3200	Níquel	3000
Aço Inox	3100	Magnésio	3000
Nylon	1100	Acrílico	1100
Óleo (SAE30)	1700	Água	1480

- **Superficiais:** São ondas que ocorrem em transdutores angulares com ângulos que fazem com que o eixo sônico se aproxime muito da superfície. Assim, ocorrem tanto nos meios sólidos quanto nos líquidos.

9.2.2 Freqüência, velocidade e comprimento de onda

As ondas acústicas são classificadas de acordo com suas freqüências e medidas em ciclos por segundo, ou seja, o numero de ondas geradas por segundo. A unidade “ciclos por segundos” é normalmente conhecida por “Hertz (Hz)”. Assim, considerando um som com freqüência de 280 Hz, isso significa que são captados pelos nossos ouvidos, por segundo, 280 ciclos ou ondas. Logo, as freqüências acima de 20.000 Hz são inaudíveis, sendo denominadas freqüências ultra-sônicas. É importante destacar que existem várias maneiras de uma onda sônica se propagar, e cada uma apresenta suas características particulares de vibrações diferentes.

O termo “velocidade de propagação” se refere à distância percorrida pela onda sônica por unidade de tempo em um determinado material/meio. É essencial enfatizar que a velocidade de propagação é uma característica do meio, sendo uma constante, independente da freqüência.

Em um padrão de onda, a distância entre dois picos (ou máximos) consecutivos numa onda senoidal é denominada “comprimento de onda”, sendo representado pela letra grega lambda “ λ ”, conforme Figura 61.

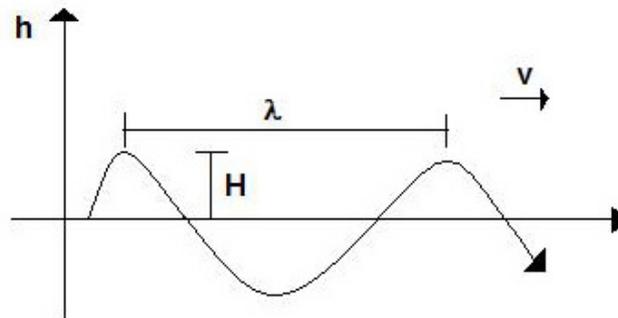


Figura 61 - H é a amplitude (intensidade) da onda, v a velocidade e λ o comprimento da onda.

Assim, considerando uma onda sônica se propagando num determinado material com velocidade “v”, frequência “f” e comprimento de onda “ λ ”, podemos relacionar estes três parâmetros como segue:

$$v = \lambda \cdot f \quad [9]$$

Logo, a equação 9 permite calcular o comprimento de onda, pois a velocidade é em geral conhecida e depende somente do modo de vibração e do material. Por outro lado, a frequência depende somente da fonte emissora, que também é conhecida. O conhecimento do comprimento de onda é de significativa importância, pois se relaciona diretamente com o tamanho do defeito a ser detectado. Em geral, o menor diâmetro de uma descontinuidade a ser detectada no material deve ser da ordem de $\lambda/2$. Assim se inspecionarmos um material de velocidade de propagação de 5900 m/s com uma frequência de 1MHz, a mínima descontinuidade que poderemos detectar será de aproximadamente 2,95 mm de diâmetro.

9.2.3 O campo sônico

A Figura 62 mostra as 4 zonas definidas para o campo sônico no ensaio de ultrassom: *zona morta*, *campo próximo*, *zona de transição* e *campo distante*.

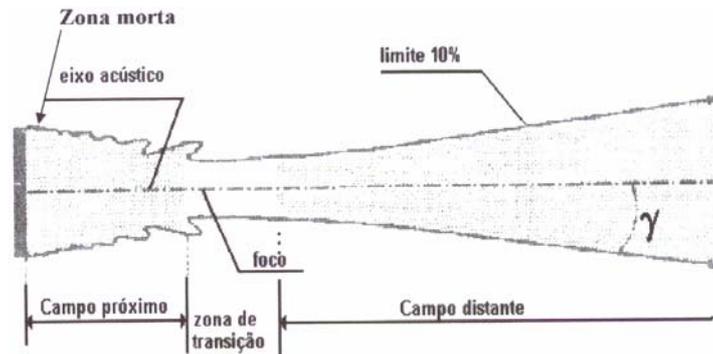


Figura 62 – Representação das três principais zonas que constituem um feixe sônico (BRAGA, 2007).

Na *zona morta*, região do feixe sônico anterior ao campo próximo que fica logo abaixo da face do transdutor, não se consegue realizar o ensaio de ultra-som. Nessa zona o ensaio de ultra-som é “cego”, do mesmo modo que se aproximarmos um objeto demais da nossa vista não conseguimos visualizá-lo com nitidez. Sua profundidade varia de 1mm a 3mm, dependendo da frequência.

O *campo próximo ou Zona de Fresnel* é uma região de grande pressão sônica e grande variação na intensidade do feixe sônico, gerando grande turbulência. O campo próximo representa para efeitos práticos, uma dificuldade na avaliação ou detecção de pequenas discontinuidades, isto é, menores que o diâmetro do transdutor, situadas nesta região próximas do transdutor. Assim, não é recomendável confiar nas indicações obtidas no campo próximo.

Na *zona de transição* ainda não ocorre uma proporcionalidade entre ganho e distância semelhante às do campo distante, no entanto já se consegue detectar discontinuidades.

O *campo distante, longínquo ou Zona de Fraunhofer* é a melhor zona de utilização do transdutor, sendo a região do feixe sônico onde o ensaio é considerado confiável. Nesta região a onda sônica se diverge igual ao fecho de luz de uma lanterna em relação ao eixo central e ainda diminui de intensidade quase que com o inverso do quadrado da distância. Isso tem que ser levado em consideração principalmente no dimensionamento de discontinuidades.

Muitas vezes uma discontinuidade pode aparecer na tela com amplitude (altura do sinal) mais baixa pelo fato de ter sido detectada por uma borda do feixe devido à divergência. Por esse motivo sempre tem que posicionar o transdutor de modo que detecte a discontinuidade com o eixo central do feixe sônico. A esse procedimento se chama maximizar o sinal.

Existem relações entre frequência, diâmetro e divergência:

- Diâmetro: quanto maior o diâmetro menor a abertura do feixe sônico e maior a distância focal.
- Frequência: quanto mais alta a frequência maior a distancia focal e menor a abertura do feixe sônico.

Estas relações mencionadas anteriormente podem ser visualizadas na Figura 63, que é apresentada a seguir:

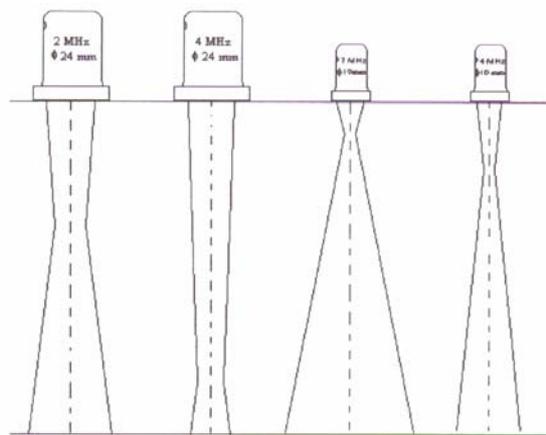


Figura 63 - Representação mostrando as relações ente frequência, diâmetro e divergência do feixe sônico (BRAGA, 2007).

Deste modo os transdutores de baixa frequência possuem a detectabilidade menor que os de alta frequência e ainda apresentam maior divergência.

Para o inspetor é importante considerar e conhecer as características de divergência dos transdutores utilizados e a geometria da peça, pois o feixe sônico quando se propaga recebe sinais de todos os refletores por onde passa, e alguns desses refletores podem ser confundidos com descontinuidades, sendo as reflexões de paredes, cantos vivos e outras mudanças de geometria as principais causas de erros na interpretação dos ensaios de ultra-som. Em particular as reflexões de paredes podem interferir nas reflexões de descontinuidades mostradas na tela do aparelho, gerando os chamados “ecos fantasmas”.

A inspeção tem que ser realizada com o transdutor operando após o campo próximo, o qual pode ser calculado por:

$$N = D^2 \cdot \frac{f}{4v} \quad [10]$$

Onde:

N = distância do campo próximo (m)

D = diâmetro do cristal (m)

f = frequência do transdutor (Hz)

v = velocidade do som no material (m/s)

9.2.4 Atenuação sônica

A onda sônica, ao percorrer um material qualquer, sofre em sua trajetória efeitos de dispersão e absorção, resultando na redução da sua energia.

A dispersão deve-se ao fato da matéria não ser totalmente homogênea, contendo interfaces naturais de sua própria estrutura ou processo de fabricação. Por exemplo, fundidos, que apresentam grãos de grafita e de ferrita, com propriedades elásticas de ponto num mesmo material denominamos anisotropia, que é mais significativo quando o tamanho de grão for 1/10 do comprimento de onda.

O fenômeno da absorção ocorre sempre que uma vibração acústica percorre um meio elástico. É a energia cedida pela onda para que cada partícula do meio execute um movimento de oscilação, transmitindo a vibração às outras partículas do próprio meio.

Portanto, o resultado dos efeitos de dispersão e absorção, quando somados, resulta na atenuação sônica. Na prática, este fenômeno poderá ser visualizado, quando observamos na tela do aparelho de ultra-som, vários ecos de reflexão de fundo provenientes de uma peça com superfícies paralelas. As alturas dos ecos diminuem com a distância percorrida pela onda.

O fenômeno da atenuação é importante quando inspecionamos peças em que este fator pode inviabilizar o ensaio. É o caso de soldas em aços inoxidáveis austeníticos, peças forjadas em aços inoxidáveis, que são exemplos clássicos desta dificuldade. O controle e avaliação da atenuação nestes casos é razão para justificar procedimentos de ensaio especiais.

A tabela 19 apresenta alguns valores de atenuação:

Tabela 19 – Valores de atenuação sônica para os principais tipos de materiais (ANDREUCCI, 2002).

Material Aço Cr-Ni	Atenuação Sônica em (dB/mm)
Forjados	0,009 a 0,010
Laminados	0,018
Fundidos	0,040 a 0,080

9.2.5 Acoplamento de cabeçotes

Quando um transdutor é acoplado sobre a peça a ser inspecionada, imediatamente é estabelecida uma camada de ar entre a sapata do transdutor e a superfície da peça. Esta camada de ar impede que as vibrações mecânicas produzidas pelo transdutor se propaguem para a peça em razão das características acústicas (impedância acústica) muito diferente do material a inspecionar.

A impedância acústica “Z” é definida como sendo o produto da densidade do meio (ρ) pela velocidade de propagação neste meio (V), ($Z = \rho \times V$) e representa a quantidade de energia acústica que se reflete e transmite para o meio. Como exemplo, podemos citar que a interface água e aço apenas transmitem 12 % e reflete 88 % da energia ultra-sônica.

Por esta razão, deve-se usar um líquido que estabeleça uma redução desta diferença, e permita a passagem das vibrações para a peça. Tais líquidos, denominados acoplantes, são escolhidos em função do acabamento superficial da peça, condições técnicas, tipo de peça, etc. A tabela 20 descreve alguns acoplantes mais utilizados.

Os acoplantes devem ser selecionados em função da rugosidade da superfície da área de varredura, o tipo de material, forma da peça, dimensões da área de varredura e posição para inspeção.

Tabela 20 - Impedância Acústica de Alguns Materiais e Acoplantes (ANDREUCCI, 2002).

Acoplante	Densidade (g/cm³)	Velocidade da onda longitudinal (m/s)	Impedância Acústica (g/cm².s)
Óleo (SAE 30)	0,9	1700	1,5 x 10 ⁵
Água	1,0	1480	1,48 x 10 ⁵
Glicerina	1,26	1920	2,4 x 10 ⁵
Carbox Metil Celulose (15g/l)	1,20	2300	2,76 x 10 ⁵
Aço	7,8	5900	46 x 10 ⁵
Ar ou gás	0,0013	330	0,00043 x 10 ⁵
Aço inoxidável	7,8	5800	45,4 x 10 ⁵
Alumínio	2,7	6300	17,1 x 10 ⁵
Acrílico	1,18	2700	3,1 x 10 ⁵

9.2.6 Divergência do feixe sônico

Outro fenômeno físico que é responsável pela perda de parte da intensidade ou energia da onda sônica é a divergência que se pronuncia à medida que afastamos da fonte emissora das vibrações acústicas.

Tal fenômeno pode ser observado detectando um defeito pequeno com o feixe ultra-sônico central do transdutor, em que nestas condições a amplitude do eco na tela do aparelho é máxima. Porém quando afastamos o transdutor lateralmente ao defeito, a amplitude diminui, indicando uma queda da sensibilidade de detecção do mesmo defeito. Assim, quanto mais a borda do feixe sônico incide na descontinuidade, menor será a amplitude do eco.

9.2.7 Reflexão e transmissão em incidência oblíqua

Considerando um feixe paralelo XO de ondas planas longitudinais incidentes obliquamente em uma fronteira de plano PQ, separando os materiais 1 e 2 (Figura 64), onde O é o ponto de incidência na fronteira, OY e OZ são, respectivamente, feixes longitudinais refletidos e transmitidos (refratados). Quando um ou ambos os materiais suportam uma tensão cisalhante, o modo de conversão toma lugar na fronteira. A tensão exercida por um feixe oblíquo tendo componentes resolvidos perpendiculares à fronteira e paralelos a ela. Portanto, as camadas dos meios nas proximidades da fronteira sofrem ambas as tensões longitudinais e transversais. Portanto ondas transversais, onde apropriadas, e ondas longitudinais podem ser refletidas e transmitidas como indicado por OY' e OZ', respectivamente.

As velocidades e direções do som associadas por esses quatro feixes são determinados pela lei de Snell:

$$c_{L1} \div \text{sen} \theta_{L1} = c_{T1} \div \text{sen} \theta_{T1} = c_{L2} \div \text{sen} \theta_{L2} = c_{T2} \div \text{sen} \theta_{T2} \quad [11]$$

Onde c_{L1} e c_{T1} representam as velocidades de onda longitudinal e transversal no meio de incidência 1 e c_{L2} e c_{T2} no meio de transmissão 2, respectivamente. θ_{L1} , θ_{T1} , θ_{L2} e θ_{T2} são os ângulos entre a normal da fronteira e os feixes correspondentes, como indicado na Figura 64. Devido ao módulo de elasticidade transversal ser sempre menor do que

aquele associado com tensões de compressão e tração, a velocidade das ondas transversais deve ser menor do que a velocidade das ondas de compressão.

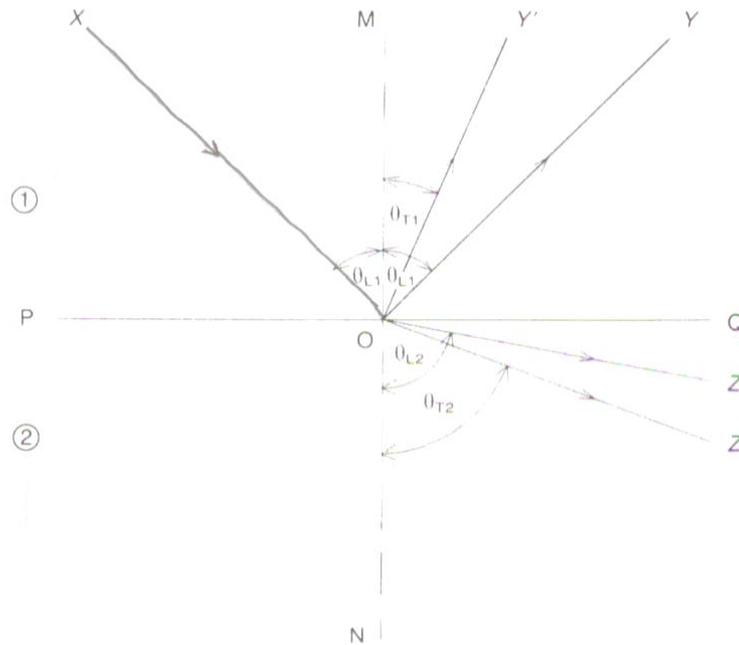


Figura 64 – Efeito de ondas planas longitudinais incidentes obliquamente em uma fronteira de plano PQ, separando dois materiais distintos (BLITZ e SIMPSON, 1996).

Se o meio 1 é um fluido e o meio 2 é sólido, com c_{L1} sendo menor do que ambos c_{L2} e c_{T2} , a equação 11 mostra que ambos os raios transmitidos são refratados fora a partir da normal, com o ângulo θ_{L2} sendo maior do que θ_{T2} para a razão dada anteriormente. Permitindo que o ângulo θ_{L1} seja aumentado para um valor θ_{c1} pelo qual θ_{L2} é igual a 90° (Figura 65(a)), assim o termo θ_{c1} é chamado de o primeiro ângulo crítico e, para ângulos de incidência maior do que este, apenas ondas transversais entram no meio 2. Isso é indicado por um aumento abrupto na intensidade de ondas refletidas, sendo chamadas de ondas longitudinais. Logo, um acréscimo no aumento em θ_{L1} conduz a um segundo ângulo crítico θ_{c2} pelo qual $\theta_{T2} = 90^\circ$ e com um aumento abrupto correspondente na intensidade do feixe refletido.

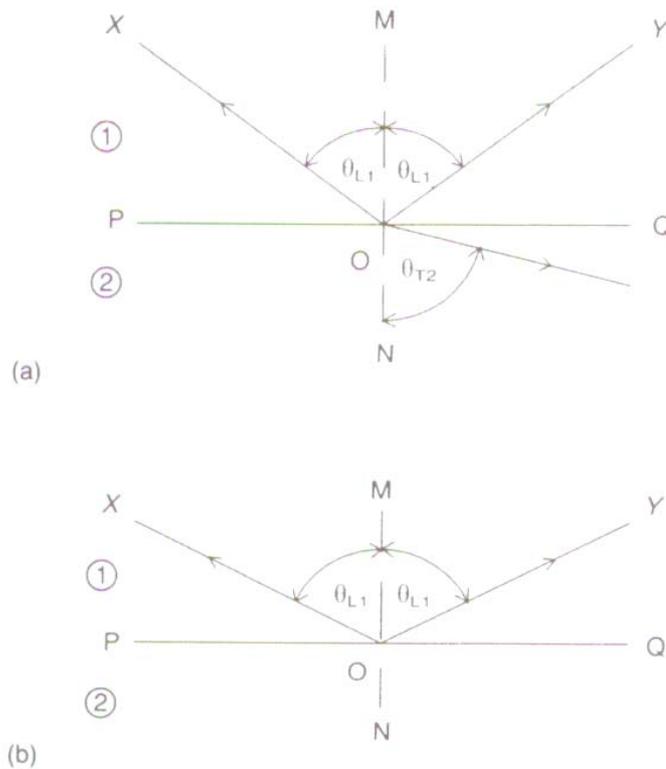


Figura 65 – Efeito do ângulo de incidência nas ondas que passam do meio 1 para o meio 2. Ângulos acima do crítico determinam a passagem apenas das ondas transversais para o meio 2 (BLITZ e SIMPSON, 1996).

Outro acréscimo no aumento em θ_{L1} conduz para um terceiro ângulo crítico θ_{c3} chamado *Rayleigh*, isto é, ondas superficiais são propagadas ao longo da fronteira, o que é indicado por um decréscimo na intensidade de ondas refletidas. A velocidade c_R das ondas superficiais é aproximadamente igual a $0.9c_{T2}$. A partir das equações 12, 13 e 14 surgem as seguintes premissas (BLITZ e SIMPSON, 1996):

$$c_{L2} = c_{L1} \div \text{sen}\theta_{c1}, \quad [12]$$

$$c_{T2} = c_{L2} \div \text{sen}\theta_{c2}, \quad [13]$$

$$c_R = c_{L1} \div \text{sen}\theta_{c3}. \quad [14]$$

Se o meio 1 é um sólido e o meio 2 um fluido, o modo de conversão com o feixe refletido internamente ocorre, mas apenas ondas longitudinais são transmitidas. Quando, como é usual, c_{L1} e c_{T1} são maiores do que c_{L2} , os ângulos θ_{L1} e θ_{T1} são ambos maiores do que θ_{L2} e o fenômeno descrito no parágrafo anterior não aumenta. Contudo, por causa de uma grande incompatibilidade da característica de impedância entre os

materiais, especialmente se o meio 2 for ar e o meio 1 um metal, a maioria da energia sonora é refletida dentro do meio 1 na forma de ondas longitudinais e transversais.

Os valores dos coeficientes de transmissão e reflexão para incidência oblíqua são dependentes das características de impedâncias do meio em relação ao tipo de onda, isto é, longitudinal, transversal etc., e os ângulos de incidência.

9.2.8 Ondas superficiais ou ondas de Rayleigh

Segundo (ANDREUCCI, 2002) são assim chamadas pela característica de se propagar na superfície dos sólidos. Devido ao complexo movimento oscilatório das partículas da superfície, a velocidade de propagação da onda superficial entre duas fases distintas é aproximadamente 10% inferior que a de uma onda transversal, aparecendo primeiro em um ecograma ultra-sônico.

Para o tipo de onda superficial que não possui a componente normal, ou seja, que se propaga em movimento paralelo a superfície e transversal em relação à direção de propagação recebe a denominação de ondas de “Love”, no qual a polarização está situada no plano da superfície, mas perpendicular à direção de propagação. Sua aplicação se restringe ao exame de finas camadas de material que recobrem outros materiais.

Já, para ondas superficiais que se propagam com comprimento de onda próximo à espessura da chapa ensaiada, a inspeção não se restringe somente à superfície, mas a todo o material e, para esta particularidade, são denominadas ondas de “Lamb”. Ondas de “Lamb” podem ser usadas para detecção de defeitos laminares até certa ordem de distância abaixo da superfície, por exemplo, 1mm para cabeçotes de 5 MHz de frequência (BLITZ e SIMPSON, 1996).

O ensaio ultra-sônico de materiais com ondas superficiais são aplicados com severas restrições, pelo fato de somente ser observados defeitos que ocorrem na superfície e nestes casos, existem ensaios não-destrutivos mais simples para a detecção destes tipos de discontinuidades como, por exemplo, de líquidos penetrantes e partículas magnéticas, que em geral são de custo e complexidade inferior ao ensaio ultra-sônico.

BLITZ e SIMPSON (1996) mostraram como ondas superficiais Rayleigh podem se propagar através da superfície de um sólido. Com ondas superficiais, as vibrações são confinadas na vizinhança da superfície e a energia acústica penetra o sólido por uma

distância não mais do que um ou dois comprimentos de onda. Por essa razão, a atenuação das ondas de superfície é consideravelmente menor do que para ondas volumosas. A polarização de ondas Rayleigh está situada em um plano perpendicular à superfície. Assim, as vibrações das partículas para ondas de Rayleigh têm dois componentes, perpendicular e paralelo com a superfície, como ondas longitudinais e transversais, respectivamente. Devido aos componentes apresentarem velocidades diferentes, as vibrações são polarizadas elipticamente com uma mudança contínua na fase e a forma da elipse varia em uma maneira cíclica. A velocidade, c_R , de ondas de Rayleigh pode ser expressa, aproximadamente, como:

$$c_R = 0.9 \cdot c_T, \quad [15]$$

onde c_T é a velocidade de ondas transversais para materiais volumosos.

Para um objeto suficientemente fino para permitir penetração à superfície oposta, por exemplo, uma chapa tendo uma espessura da ordem de um comprimento de onda ou mais, ondas Rayleigh degeneram a chapa ou ondas de “Lamb”, o qual pode ser propagada em um número de modos, até simétrico ou anti-simétrico. A velocidade das ondas de “Lamb” varia com a frequência e, para essa razão, a distinção deveria ser feita entre a fase e velocidade do grupo. O valor da velocidade de fase para cada modo depende da ordem do modo: fundamental, primeiro, segundo, terceiro, etc., se o modo for também do material da chapa.

9.3 Fenômeno da difração

Quando ondas sonoras encontram fronteiras finitas na forma de aberturas ou obstruções, mudanças abruptas nas direções de propagação podem ocorrer. Esse fenômeno é conhecido como difração. De acordo com o Princípio de Huygens (1629-1695), cada ponto de uma frente de onda pode ser considerado como uma fonte de ondas secundárias, produzidas no sentido de propagação e com a mesma velocidade do meio. Assim, no instante posterior, a nova frente de onda é a superfície que tangencia estas ondas secundárias. Logo, a difração ocorre em todas as direções, sendo de baixa energia e é dependente do ângulo de incidência.

Os modos de difração mais comuns são aqueles que provêm de uma fonte circular ou da ponta de uma descontinuidade, como por exemplo, a ponta de uma trinca (BLITZ e SIMPSON, 1996).

No caso da difração a partir de uma fonte circular, a preocupação com a difração está associada com a fronteira finita de uma fonte circular de som.

Considerando uma fonte circular plana de som, localizada em um defletor infinito e vibrando com movimento harmônico simples em uma dada frequência semelhante a um pistão: a fase é uniforme para todos os pontos sobre a superfície vibratória, o efeito do defletor infinito é garantir que a radiação a partir de uma das superfícies seja observada. Pode-se então assumir que a parte da fonte sob consideração consiste de esferas, cada uma emitindo ondas esféricas tendo a mesma amplitude, fase e frequência, o qual gera um aumento na interferência. Pode ser mostrado que a amplitude de pressão acústica, ρ_o , em uma distância axial, r , em um meio homogêneo a partir da fonte de raio, a , é dada por:

$$\rho_o = |\rho_{max} \cdot \text{sen}\{\frac{k}{2}[\sqrt{r^2 + a^2} - r]\}| \quad [16]$$

onde ρ_{max} representa o valor máximo de amplitude de pressão acústica e k o número de onda, $2\pi/\lambda$, sendo o comprimento de onda dado por λ .

A variação de ρ_o com r ao longo do eixo da fonte, como dado pela equação 16, é ilustrada na Figura 66, no qual pode ser vista que é periódica, mas com aumento na distância entre picos sucessivos.

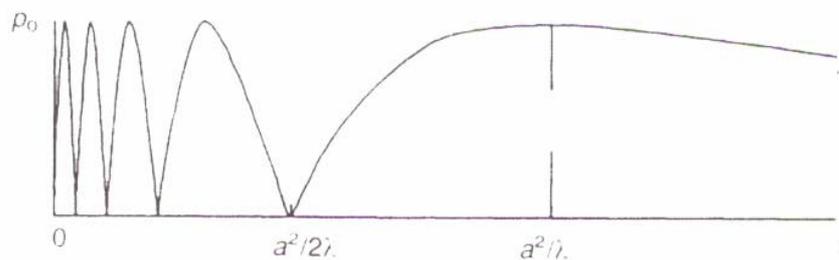


Figura 66 – Variação de ρ_o com r ao longo do eixo da fonte (BLITZ e SIMPSON, 1996).

Valores de ρ_o variam de zero para um máximo ρ_{max} . Assim, ρ_o alcança seu penúltimo ciclo onde $r = a^2/2\lambda$ e seu último máximo onde $r = a^2/\lambda$. O valor mínimo final de ρ_o ocorre quando r é infinito. Além do último máximo, quando r torna-se maior

comparado com a , o termo senoidal na equação 16 é suficientemente pequeno para a equação reduzir a:

$$\rho_o = \rho_{\max} \cdot k \cdot \frac{a^2}{4r^2} \quad [17]$$

Isto é, a amplitude decresce com $1/r$ como ocorre quando ondas esféricas irradiam de um ponto no centro da fonte. Deveria ser notado que a equação 17 se aplica apenas para uma frequência simples: uma frequência tendo uma banda larga infinitesimal. A região entre a fonte e o último pico é conhecida como o campo próximo ou zona de Fresnel; a região além desse pico é chamada de campo distante ou zona de Fraunhofer.

Na prática, uma fonte ultra-sônica propaga sobre uma banda larga finita pelo qual a curva representa a soma das curvas individuais para cada frequência intrínseca. Isso resulta em um crescimento dos canais e num alargamento dos picos (Figura 67).

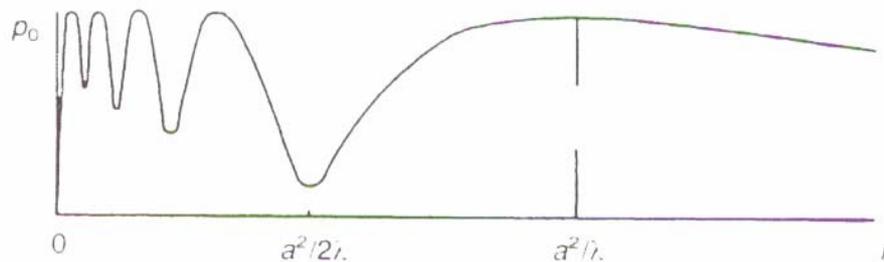


Figura 67 - Fonte ultra-sônica propagando sobre uma banda larga finita pelo qual a curva representa a soma das curvas individuais (BLITZ e SIMPSON, 1996).

No campo distante, o padrão de onda esférica pode ser complicado pela aparência de pontas laterais além do feixe principal. Em um ponto fora do eixo tendo coordenadas polares (r, θ) com respeito ao centro da fonte, assumindo simetria axial, a amplitude de pressão acústica, ρ_o , é dada por:

$$\rho_o = \left| 2 \cdot \rho_{\max} \cdot J_1 \left(\frac{x}{x} \right) \right| \quad [18]$$

Onde x é igual ao parâmetro $ka \cdot \sin\theta$. Já o termo ρ_{\max} é o valor de ρ_o sobre os eixos $(r, 0)$ e $J_1(x)$ é uma função de Bessel de primeira ordem cujo valor pode ser obtido de tabelas; k é igual a $2\pi/\lambda$ e a é o raio da fonte.

A Figura 68 mostra (i) a variação de $2J_1(x)/x$ com x e (ii) a variação consequente da razão ρ_o/ρ_{max} com o parâmetro $\text{sen}\theta(a/\lambda)$ (isto é. $ka.\text{sen}\theta/2\pi$) em acordo com a equação 18. Os primeiros quatro valores zero de ρ_o são vistos ocorrer quando $\text{sen}\theta$ é igual a $0.61\lambda/a$, $1.12\lambda/a$, $1.62\lambda/a$ e $2.12\lambda/a$. A Figura 69 ilustra as variações da razão ρ_o/ρ_{max} com direção: curvas direcionalmente, quando (i) $ka = \pi/2$, (ii) $ka = \pi$ e (iii) $ka = 5\pi$. Com ka igual a π , o valor para $\text{sen}\theta$ de 1.22 é requerido para produzir o primeiro valor zero de ρ_o , o qual não é possível porque o $\text{sen}\theta$ deve ter um valor menos do que a unidade, e existe um considerável espalhamento do feixe: isto é a directividade é pobre. Contudo, quando $ka = 5\pi$ como obtido, por exemplo, pelo aumento ou da freqüência ou do diâmetro da fonte pelo fator de cinco, o quarto valor zero ocorre quando $\text{sen}\theta$ é igual a 0.88 e a curva da directividade indica um feixe principal com três pequenas pontas sobre cada lado do eixo.

A maioria da energia está no feixe principal o qual pode ser visto ser altamente direcional; isso é uma característica essencial em todas as técnicas de ensaio ultra-sônico na prática.

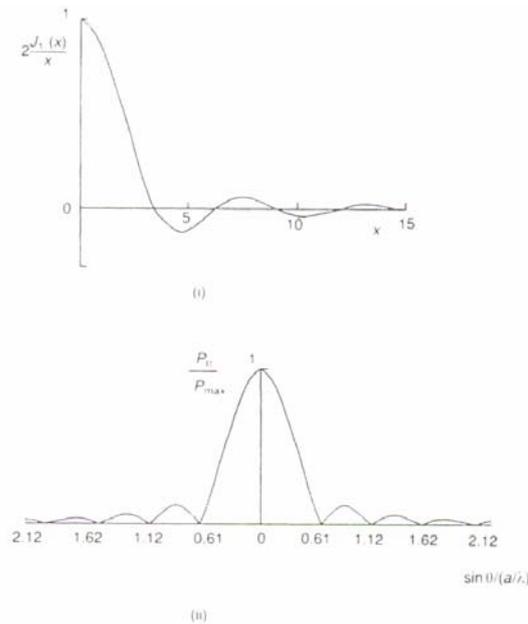


Figura 68 – Gráfico mostrando (i) a variação de $2J_1(x)/x$ com x e (ii) a variação consequente da razão ρ_o/ρ_{max} com o parâmetro $\text{sen}\theta(a/\lambda)$ (BLITZ e SIMPSON, 1996).

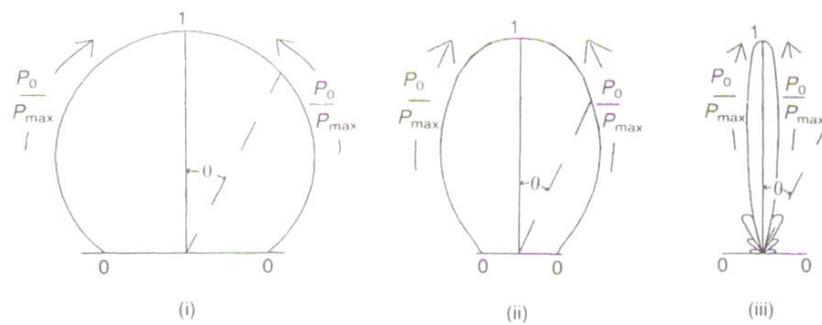


Figura 69 – Gráfico ilustrando as variações da razão ρ_0/ρ_{\max} com direção: curvas direcionalmente, quando (i) $ka = \pi/2$, (ii) $ka = \pi$ e (iii) $ka = 5\pi$ (BLITZ e SIMPSON, 1996).

Entretanto, quando o ultra-som é incidente em uma descontinuidade linear, tal como uma trinca, difração ocorre nas extremidades. O estudo desse fenômeno tem conduzido ao uso do método do tempo de voo da onda difratada (Time of Flight Diffraction – TOFD), escopo desta dissertação, para dimensionamento de trincas. Isto tem sido usado por muitos anos para avaliação de profundidades das trincas superficiais sobre o concreto usando cabeçotes de ondas longitudinais de baixa frequência com uma larga abertura de feixe. Um mais recente desenvolvimento é a medição de tamanhos de trincas intrínsecas ao material, isto é, presentes em seu interior.