

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
PROJETO FINAL DE CURSO

**DETERMINAÇÃO DA AMPLITUDE DOS ECOS
ULTRASÔNICOS MEDIANTE AS DIFERENTES
ABERTURAS ANGULARES DOS FEIXES SÔNICOS EM
DEFEITOS INSERIDOS EM UMA JUNTA SOLDADA**

Filipe Andrade Alvarenga

Orientador: João Marcos Alcoforado Rebello

Agosto de 2009
DETERMINAÇÃO DA AMPLITUDE DOS ECOS
ULTRASÔNICOS MEDIANTE AS DIFERENTES
ABERTURAS ANGULARES DOS FEIXES SÔNICOS EM
DEFEITOS INSERIDOS EM UMA JUNTA SOLDADA

Filipe Andrade Alvarenga

PROJETO FINAL DO CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

Aprovado por:

Prof. João Marcos Alcoforado Rebello, Dr. - COPPE/UFRJ

Fernando Luiz Bastian, Ph.D. – COPPE/UFRJ

Marcelo de Siqueira Queiroz Bittencourt, D. Sc. – IEN/CNEM

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

AGOSTO DE 2009

Dedico esse trabalho a DEUS, meu socorro bem presente na hora da angústia.

*Meu pai: Silas, minha mãe: Janilce, minha irmã: Louise, meu irmão: Vinícius, minha
sobrinha: Ester, minha noiva: Patrícia Camara Moraes.*

Aos amigos de turma in memória Felipe Borges de Oliveira (2003) e Érica Engle (2003)

AGRADECIMENTOS

AO AUTOR E CONSUMADOR DA MINHA FÉ, JESUS CRISTO. OBRIGADO DEUS!

Ao Professor João Marcos por todo empenho, dedicação e confiança no atual trabalho. E também por todo aprendizado ao longo da vida acadêmica.

Ao Professor Bastian por todo empenho e disposição a me ajudar no presente trabalho. E também por todo aprendizado ao longo da vida acadêmica

Ao Doutor Marcelo de Siqueira Queiroz Bittencourt por ter sido o primeiro a me aguçar e “ensinar” a técnica Ultra-sônica e por toda atenção dispensada desde a Bolsa de Iniciação.

Aos amigos de turma Rômulo e Pablo que me acompanharam durante todo o trabalho.

À equipe do LABOEND por tudo suporte técnico e teórico no projeto.

Ao meu segundo pai: Guilherme Saad Terra. Obrigado Guilherme por todos os seus conselhos, enfim estou me formando!!

À minha família que é meu alicerce para realização de todos os meus sonhos: Silas, Janilce, Louise, Vinícius e Esterzinha (minha linda sobrinha!!).

E por último, porém não menos importante, à minha atual noiva e futura esposa que é a minha maior ajudadora, a mulher mais linda e mais sábia.

RESUMO

DETERMINAÇÃO DA AMPLITUDE DOS ECOS ULTRASÔNICOS MEDIANTE AS DIFERENTES ABERTURAS ANGULARES DOS FEIXES SÔNICOS EM DEFEITOS INSERIDOS EM UMA JUNTA SOLDADA

Filipe Andrade Alvarenga

Orientador: João Marcos Alcoforado Rebello

Agosto de 2009

Programa: Engenharia Metalúrgica e de Materiais da UFRJ

O intuito desse trabalho é verificar como a amplitude dos ecos ultra-sônicos se comportam em função das diferentes aberturas angulares que os transdutores apresentam. No presente trabalho foram analisadas as respostas de três transdutores angulares (45, 60 e 70°) com a frequência de 2MHz. E também três transdutores angulares (45, 60 e 70°) com a frequência de 4MHz, totalizando seis transdutores analisados.

Os defeitos (pequenas chapinhas) foram inseridos no chanfro do duto simulando um defeito de falta de fusão após a soldagem.

Também foi estudado o comportamento da sonificação da onda ultra-sônica pelo defeito e os resultados foram comparados com os resultados obtidos quando a onda é incidida perpendicularmente à superfície do defeito.

..ÍNDICE

1 CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO.....	1
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	1
1.2 OBJETIVO.....	2
1.3 ESCOPO DO TRABALHO.....	3
2 CAPÍTULO 2: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1 TÉCNICA DE ULTRA-SOM.....	4
2.1.1 Histórico da Técnica.....	4
2.1.2 A Técnica de Ultra-Som.....	5
2.1.3 Efeito Piezométrico.....	6
2.1.4 Tipos de Cristais.....	7
2.1.5 Transdutores Angulares.....	7
2.1.6 Campo Próximo.....	8
2.1.7 Campo Distante.....	9
2.1.8 Geometria do Feixe Sônico.....	10
2.1.9 Configuração do Feixe.....	10
2.1.10 Divergência do Feixe Sônico.....	11
2.1.11 Conformidade com Normas.....	12
2.1.12 Resultado e Critério de Aceitação da Inspeção.....	13
2.2 DEFEITOS E INSPEÇÃO ULTRASSÔNICA EM JUNTAS SOLDADAS.....	20
2.2.1 Falta de Fusão.....	20
2.2.2 Falta de Penetração.....	21
2.2.3 Porosidade.....	22
2.2.4 Mordedura.....	22
2.2.5 Procedimento Para Inspeção de Soldas.....	23
2.2.6 Preparação da Curva de Correção Distância Amplitude (DAC).....	23
2.2.7 Preparação das Superfícies de Varredura.....	24
2.2.8 Ensaio Ultra-Sônico Manual Pulso-Eco Aplicado em Soldas.....	24
2.2.9 Sistema Multicanal e Multiplexador para Inspeção em Soldas.....	26
2.2.10 Sistema Automatizado para Inspeção de Soldas.....	30
.....	30
2.3 SIMULAÇÃO DO FEIXE SÔNICO EM JUNTAS SOLDADAS.....	32
2.3.1 Princípios de Simulação Computacional.....	32
2.3.2 Modelagem Computacional.....	32
2.3.3 Problemas Complexos.....	33
2.3.4 Software CIVA.....	34
3 CAPÍTULO 3: MATERIAIS E METODOLOGIA DE ESTUDO.....	36
3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	36
3.2 SIMULAÇÃO.....	36
3.2.1 Simulação da traçagem da abertura do feixe sônico.....	36
3.2.2 Simulação da detecção do defeito no meio do chanfro da solda.....	38
3.3 MATERIAL E EQUIPAMENTO UTILIZADO PARA TRAÇAGEM DA ABERTURA DO FEIXE SÔNICO.....	39
3.4 CALIBRAÇÃO DO EQUIPAMENTO.....	41
3.5 TRAÇAGEM DA ABERTURA DO FEIXE SÔNICO.....	43
3.6 MATERIAL DO ENSAIO.....	45
3.7 EQUIPAMENTO PARA REALIZAÇÃO DO ENSAIO.....	46
3.8 O ENSAIO.....	48
3.9 PROCESSAMENTO DOS SINAIS COM MATLAB.....	49
4 CAPÍTULO 4: RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	51
4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	51
4.2 ABERTURA DOS FEIXES DOS TRANSDUTORES.....	51
4.2.1 Abertura dos feixes do transdutor de 45°; 2MHz.....	57
4.2.2 Abertura dos feixes do transdutor de 60°; 2MHz.....	57

4.2.3	Abertura dos feixes do transdutor de 70°; 2MHz.....	57
4.2.4	Abertura dos feixes do transdutor de 45°; 4MHz.....	58
4.2.5	Abertura dos feixes do transdutor de 60°; 4MHz.....	58
4.2.6	Abertura dos feixes do transdutor de 70°; 4MHz.....	58
4.3	SINAIS DOS TRANSDUTORES DE 2MHZ.....	59
4.3.1	Posição 0° transdutor de 45°.....	60
4.3.2	Posição 0° transdutor de 60°.....	61
4.3.3	Posição 0° transdutor de 70°.....	62
4.3.4	Posição 45° transdutor de 45°.....	63
4.3.5	Posição 45° transdutor 60°.....	64
4.3.6	Posição 45° transdutor 70°.....	65
4.3.7	Posição 90° transdutor de 45°.....	66
4.3.8	Posição 90° transdutor 60°.....	67
4.3.9	Posição 90° transdutor 70°.....	68
4.3.10	Posição 135° transdutor de 45°.....	69
4.3.11	Posição 135° transdutor 60°.....	70
4.3.12	Posição 135° transdutor 70°.....	71
4.3.13	Posição 180° transdutor de 45°.....	72
4.3.14	Posição 180° transdutor 60°.....	73
4.3.15	Posição 180° transdutor 70°.....	74
4.3.16	Posição 225° transdutor de 45°.....	75
4.3.17	Posição 225° transdutor 60°.....	76
4.3.18	Posição 225° transdutor 70°.....	77
4.3.19	Posição 270° transdutor de 45°.....	78
4.3.20	Posição 270° transdutor 60°.....	79
4.3.21	Posição 270° transdutor 70°.....	80
4.3.22	Posição 315° transdutor de 45°.....	81
4.3.23	Posição 315° transdutor 60°.....	82
4.3.24	Posição 315° transdutor 70°.....	83
4.4	COMPARAÇÃO DOS TRANSDUTORES De 2MHz De 45, 60 E 70°.....	84
4.4.1	Posição 0°, Transdutores de 2MHz de 45, 60 e 70°.....	85
4.4.2	Posição 45°, Transdutores de 2MHz de 45, 60 e 70°.....	85
4.4.3	Posição 90°, Transdutores de 2MHz de 45, 60 e 70°.....	85
4.4.4	Posição 135°, Transdutores de 2MHz de 45, 60 e 70°.....	86
4.4.5	Posição 180°, Transdutores de 2MHz de 45, 60 e 70°.....	86
4.4.6	Posição 225°, Transdutores de 2MHz de 45, 60 e 70°.....	86
4.4.7	Posição 270°, Transdutores de 2MHz de 45, 60 e 70°.....	87
4.4.8	Posição 315°, Transdutores de 2MHz de 45, 60 e 70°.....	87
4.5	DIMENSÃO DOS DEFEITOS.....	88
4.6	SINAIS DOS TRANSDUTORES DE 4MHZ.....	90
4.6.1	Posição 0° transdutor de 45°.....	91
4.6.2	Posição 0° transdutor de 60°.....	92
4.6.3	Posição 0° transdutor de 70°.....	93
4.6.4	Posição 45° transdutor de 45°.....	94
4.6.5	Posição 45° transdutor 60°.....	95
4.6.6	Posição 45° transdutor 70°.....	96
4.6.7	Posição 90° transdutor de 45°.....	97
4.6.8	Posição 90° transdutor 60°.....	98
4.6.9	Posição 90° transdutor 70°.....	99
4.6.10	Posição 135° transdutor de 45°.....	100
4.6.11	Posição 135° transdutor 60°.....	101
4.6.12	Posição 135° transdutor 70°.....	102
4.6.13	Posição 180° transdutor de 45°.....	103
4.6.14	Posição 180° transdutor 60°.....	104
4.6.15	Posição 180° transdutor 70°.....	105
4.6.16	Posição 225° transdutor de 45°.....	106
4.6.17	Posição 225° transdutor 60°.....	107
4.6.18	Posição 225° transdutor 70°.....	108
4.6.19	Posição 270° transdutor de 45°.....	109
4.6.20	Posição 270° transdutor 60°.....	110

4.6.21 Posição 270° transdutor 70°.....	111
4.6.22 Posição 315° transdutor de 45°.....	112
4.6.23 Posição 315° transdutor 60°.....	113
4.6.24 Posição 315° transdutor 70°.....	114
4.7 COMPARAÇÃO DOS TRANSDUTORES De 4MHz De 45, 60 E 70°	115
4.7.1 Posição 0°, Transdutores de 4MHz de 45, 60 e 70°.....	116
4.7.2 Posição 45°, Transdutores de 4MHz de 45, 60 e 70°.....	116
4.7.3 Posição 90°, Transdutores de 4MHz de 45, 60 e 70°.....	116
4.7.4 Posição 135°, Transdutores de 4MHz de 45, 60 e 70°.....	117
4.7.5 Posição 180°, Transdutores de 4MHz de 45, 60 e 70°.....	117
4.7.6 Posição 225°, Transdutores de 4MHz de 45, 60 e 70°.....	117
4.7.7 Posição 270°, Transdutores de 4MHz de 45, 60 e 70°.....	118
4.7.8 Posição 315°, Transdutores de 4MHz de 45, 60 e 70°.....	118
4.8 DIMENSÃO DOS DEFEITOS.....	119
4.9 COMPARAÇÃO DOS TRANSDUTORES DE 2 E 4 MHz.....	121
4.9.1 Posição 0°, Transdutores de 2 e 4MHz de 45°, 60° e 70°.....	122
4.9.2 Posição 45°, Transdutores de 2 e 4MHz de 45, 60 e 70°.....	123
4.9.3 Posição 90°, Transdutores de 2 e 4MHz de 45, 60 e 70°.....	124
4.9.4 Posição 135°, Transdutores de 2 e 4MHz de 45, 60 e 70°.....	125
4.9.5 Posição 180°, Transdutores de 2 e 4MHz de 45, 60 e 70°.....	126
4.9.6 Posição 225°, Transdutores de 2 e 4MHz de 45, 60 e 70°.....	127
4.9.7 Posição 270°, Transdutores de 2 e 4MHz de 45, 60 e 70°.....	128
4.9.8 Posição 315°, Transdutores de 2 e 4MHz de 45, 60 e 70°.....	129
5 CAPÍTULO 5: CONCLUSÃO.....	130
5.1 CONCLUSÃO.....	130
6 CAPÍTULO 6: SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS.....	131
6.1 TRABALHOS FUTUROS.....	131
7 CAPÍTULO 7: REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	132

1 CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Dutos com juntas soldadas são freqüentemente utilizados em diferentes ramos industriais. Principalmente na indústria petrolífera. Mediante sua grande eficiência e praticidade no transporte de óleo e gás os dutos foram e permanecem sendo a solução mais viável para este.

Contudo, o processo de soldagem nestes é bastante susceptível a ocorrência de descontinuidades devido à complexidade da solda. Logo, há necessidade de verificar as descontinuidades para realizar uma previsão do comportamento das soldas nos dutos ao longo da vida útil, pois um rompimento ou vazamento desses dutos pode gerar um dano irreparável tanto à natureza quanto à empresa que está realizando a operação de instalação, reparo e manuseio.

A literatura mostra diferentes técnicas de inspeção não destrutivas que são utilizadas para monitorar as descontinuidades intrínsecas à soldagem. Resultados aplausíveis são obtidos com as técnicas: inspeção visual, líquido penetrante, partículas magnéticas, ultra-som, raios-x, correntes parasitas, etc.

Na grande maioria das inspeções ultra-sônicas em cordões de soldas em dutos são utilizados transdutores angulares, por exemplo: 30°, 45°, 60°, por isso há necessidade de verificar onde é a máxima detecção (amplitude) de uma descontinuidade em função do perfil do feixe sônico e sua reprodutibilidade.

Neste método a inspeção é feita por um inspetor qualificado de posse de um equipamento portátil em que realiza o teste sem necessidade de parar uma linha de produção. Os dados são analisados e um relatório é emitido aprovando ou rejeitando a solda mediante normas previamente acordado com o cliente.

O resultado da inspeção ultra-sônica está diretamente ligado a interpretação dos dados pelo inspetor. Então acuidade visual, condições de trabalho, condições psicológicas dentre outras, são variáveis que devem ser analisadas. Visando diminuir as variáveis negativas é de extrema importância conhecer o perfil dos feixes sônicos para detecção de uma descontinuidade.

1.2 OBJETIVO

Determinar o perfil do feixe sônico em transdutores convencionais angulares (45°, 60° e 70°) com diferentes frequências.

Realizar a inspeção nas diferentes seções do cordão da solda com transdutores de diferentes aberturas do feixe sônico e verificar o comportamento da amplitude do sinal em função do feixe na detecção de um defeito, ou seja, o quanto o defeito irá sonificar o feixe de onda dos transdutores com diferentes aberturas de diferentes ângulos e com diferentes frequências.

Comparar os resultados obtidos de cada transdutor diferente, ou seja, comparar as amplitudes dos transdutores com mesma frequência, porém com diferentes ângulos (45, 60 e 70°) e comparar as amplitudes dos transdutores de mesmo ângulo, porém com diferentes frequências (2 ou 4MHz).

1.3 ESCOPO DO TRABALHO

A monografia é constituída de 7 capítulos, apresentando no primeiro Capítulo a introdução ao tema e os objetivos do projeto.

Em seguida no Capítulo 2 é apresentado o princípio da técnica pulso-eco de Ultra-som, parâmetros do equipamento e tipos de ondas. Também são apresentados alguns tipos de defeitos em juntas soldadas.

O Capítulo 3 apresenta os materiais de estudos, os tipos de solda e os equipamentos que foram utilizados.

No Capítulo 4 é apresentado os resultados e as discussões sobre os dados obtidos durante a realização do ensaio no presente trabalho.

O Capítulo 5 apresenta o encerramento do projeto onde as principais conclusões são apontadas.

No Capítulo 6 algumas sugestões para trabalhos futuras são enumeradas.

O Capítulo 7 é apontado as referências bibliográficas.

2 CAPÍTULO 2: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 TÉCNICA DE ULTRA-SOM

2.1.1 HISTÓRICO DA TÉCNICA

Antes da Segunda Guerra Mundial a técnica de emissão de ondas sonoras dentro d'água (sonares) e a observação do retorno de ecos era utilizada para caracterizar materiais metálicos. Sendo assim investigadores ultra-sônicos eram inspirados para explorar aplicações medicinais [1].

Em 1929 e 1935 *Sokolov* estudou ondas ultra-sônicas para detecção de objetos metálicos. *Mulhauser*, em 1931, obteve a patente do uso de ondas ultra-sônicas usando dois transdutores para detectar falhas em sólidos.

Firestone (1941) e *Simons* (1945) desenvolveram testes ultra-sônicos pulsados usando a técnica pulso-eco.

A realização de ensaios não destrutivos tem sido praticada por várias décadas, com rápido desenvolvimento de instrumentos que facilitam a inspeção e com o avanço tecnológico desde a Segunda Guerra Mundial a técnica tem se mostrado cada vez mais aprimorada e utilizada, com grande sucesso, em diversas áreas Industriais.

Inicialmente a técnica era utilizada para detecção de defeitos. Como requisito de um projeto seguro era entendido que defeitos macroscópicos não deveriam existir durante a vida útil e sendo detectados tais defeitos faz-se necessário a remoção desse componente do trabalho.

Então houve a necessidade de técnicas não destrutivas sofisticadas serem aprimoradas como: Ultra-som, Corrente Parasitas, Raios-X, dentre outras, para detecção de defeitos menores.

Atualmente é conhecido que a maioria das rejeições e possíveis falhas em estruturas são devido às pequenas falhas (microtrincas) que são detectadas com as técnicas mencionadas no parágrafo acima.

2.1.2 A TÉCNICA DE ULTRA-SOM

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

- Ondas longitudinais – As partículas do meio vibram na mesma direção da propagação da onda;
- Ondas transversais (cisalhantes) – As partículas do meio vibram na direção perpendicular ao de propagação da onda. As ondas transversais são praticamente incapazes de se propagarem nos líquidos e gases, pela característica das ligações entre partículas, destes meios;
- Ondas superficiais ou ondas de Rayleigh – São assim chamadas pela sua característica de se propagar na superfície dos sólidos ou líquidos [2].

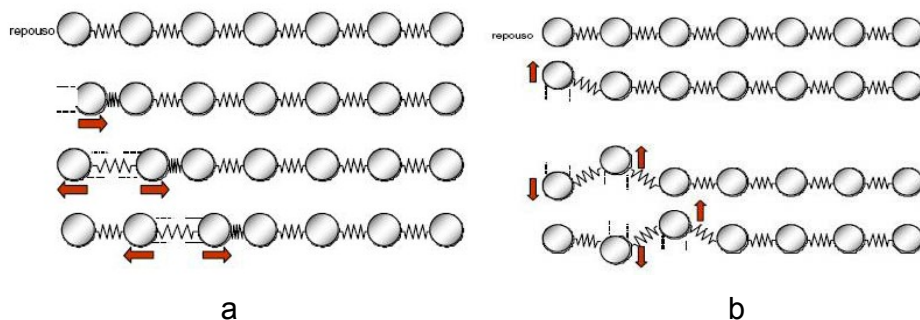


Figura 2.1. Esquema representativo de (a) Onda Longitudinal; (b) Onda cisalhante [3].

Deve-se observar que uma onda elástica não transporta massa, pois após cessado o movimento de oscilação, cada partícula volta à sua posição de equilíbrio. Assim, o que se propaga através do corpo elástico é apenas um

estado de movimento e energia. É importante observar também, que a velocidade com que a maioria das ondas elásticas se propaga em um dado material é constante e, para certos meios, independente da frequência, dependendo apenas do material e do tipo de onda [4].

2.1.3 EFEITO PIEZELÉTRICO

As ondas ultra-sônicas são geradas ou introduzidas no material através de um elemento emissor com uma determinada dimensão e que vibra com certa frequência. Este emissor pode se apresentar com determinadas formas (circular e/ou retangular). Tanto o elemento emissor e o receptor, são denominados transdutores, também designados por cabeçotes.

Diversos materiais (cristais) apresentam o efeito piezoeétrico. Se tomarmos uma lâmina de certo formato (placa) e aplicarmos uma pressão sobre o mesmo, surgem em sua superfície cargas elétricas. O efeito inverso também é verdadeiro: se aplicarmos dois eletrodos sobre as faces opostas de uma placa de cristal piezoeétrico, de maneira que possamos carregar as faces eletricamente, a placa comporta-se como se estivesse sobre pressão e diminui de espessura.

Uma corrente elétrica alternada gera vibrações mecânicas no cristal na frequência correspondente à frequência de excitação. Estes cristais são chamados de transdutores por transformar energia de um tipo em outro [5].

O cristal piezoeétrico pode transformar a energia elétrica alternada em oscilação mecânica e transformar a energia mecânica em elétrica [3].



Figura 2.2. Contração e expansão do cristal quando submetido a uma alta tensão alternada na mesma frequência ultra-sônica emitida pelo cristal [3].

2.1.4 TIPOS DE CRISTAIS

Materiais piezelétricos são: o quartzo, o sulfato de lítio, o titanato de bário, o metaniobato de chumbo.

Quartzo é um material piezelétrico mais antigo, translúcido e duro como o vidro sendo cortado a partir de cristais originários no Brasil. Sulfato de Lítio é um cristal sensível a temperatura e pouco resistente. Titanato de Bário e metaniobato de chumbo são materiais cerâmicos que recebem o efeito piezelétrico através de polarização.

Esses dois cristais são os melhores emissores, produzindo impulsos ou ondas de grande energia, se comparadas com aquelas produzidas por cristais de quartzo.

Para a inspeção ultra-sônica, interessa não só a potência de emissão, mas também a sensibilidade da recepção (resolução). A frequência ultra-sônica gerada pelo cristal dependerá da sua espessura, cerca de 1 mm para 4 MHz e 2 mm para 2 MHz.

Os cristais acima mencionados são montados sobre uma base de suporte (bloco amortecedor) e junto com os eletrodos e a carcaça externa constituem o transdutor ou cabeçote propriamente dito. Existem três tipos usuais de transdutores: Reto ou Normal, o Angular e o Duplo-cristal [3].

2.1.5 TRANSDUTORES ANGULARES

No atual trabalho só iremos usar transdutores angulares, então não se faz necessário descrever sobre transdutor com incidência normal.

A rigor, diferem dos transdutores retos ou normais pelo fato do cristal formar um determinado ângulo com a superfície do material. O ângulo é obtido, inserindo uma cunha de plástico entre o cristal piezelétrico e a superfície do material. A cunha pode ser fixa, sendo então englobada pela carcaça ou intercambiável. Neste último caso temos um transdutor normal que é preso com parafusos que fixam a cunha à carcaça. Como na prática operamos normalmente com diversos ângulos (35, 45, 60, 70 e 80 graus) esta solução é

mais econômica já que um único transdutor com várias cunhas é de custo inferior, porém necessitam de maiores cuidados no manuseio.

O ângulo nominal, sob o qual o feixe ultra-sônico penetra no material vale somente para inspeção de peças em aço; se o material for outro, deve-se calcular o ângulo real de penetração utilizando a Lei de Snell. A mudança do ângulo devesse à mudança de velocidade no meio.

O cristal piezelétrico com dimensões que podem variar entre 8 x 9 mm até 15 x 20 mm, somente recebe ondas ou impulsos ultra-sônicos que penetram na cunha em uma direção paralela à de emissão, em sentido contrário. A cunha de plástico funciona como amortecedor para o cristal piezelétrico, após a emissão dos impulsos.

O transdutor angular é muito utilizado na inspeção de soldas e quando a descontinuidade está orientada perpendicularmente à superfície da peça [3]. Ilustrada na figura 2.3.

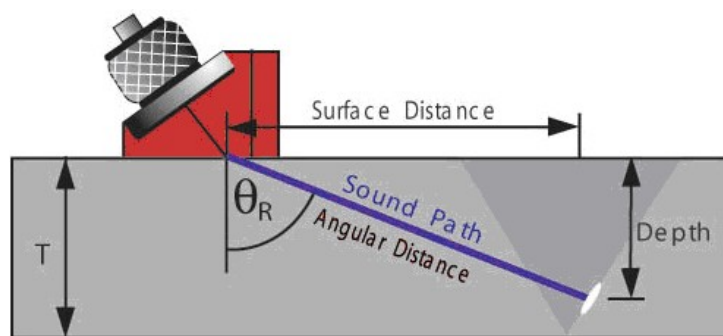


Figura 2.3. Configuração do transdutor angular, onde Θ_R é o ângulo de refração e T é a espessura do material [6].

2.1.6 CAMPO PRÓXIMO

O campo próximo, ou zona de Fresnel, caracteriza-se pela grande variação da intensidade sônica na região imediatamente à frente do cristal, pelos fenômenos de interferência entre pressões máximas e mínimas [5].

O ponto de pressão máxima do feixe sônico determina o final do campo próximo. O comprimento do campo próximo (N) corresponde à distância entre o cristal e este ponto de intensidade máxima. Neste ponto o feixe sônico está concentrado ao máximo (Figura 2.4).

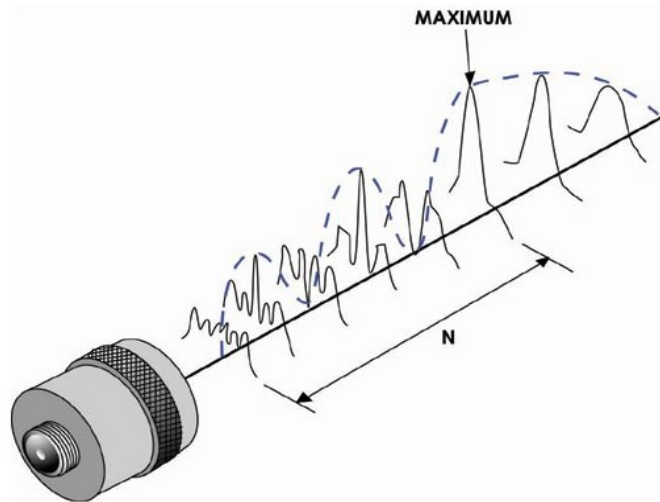


Figura 2.4. Comportamento da pressão sônica dentro do campo próximo [7].

2.1.7 CAMPO DISTANTE

Para além do campo próximo, os fenômenos de interferência deixam de existir e o feixe ultra-sônico passa a ter um ângulo de abertura (divergência). Numa região, zona de transição, que varia aproximadamente de uma a três vezes a espessura do cristal, o ângulo de divergência é variável e o decréscimo da pressão sônica ainda não é proporcional ao quadrado da distância [5]. Após esta zona de transição o feixe passa a apresentar um ângulo de divergência constante e um decaimento de intensidade proporcional ao inverso do quadrado da distância, chamado então de campo distante ou zona de Fraunhofer (Figura 2.5) [8].

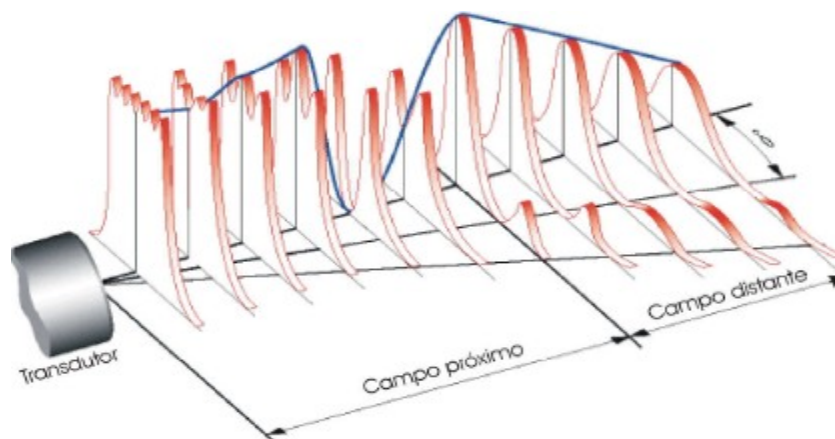


Figura 2.5. Distâncias do feixe. Campo próximo e Campo distante [8].

2.1.8 GEOMETRIA DO FEIXE SÔNICO

Para entendimento do campo sônico, imagine que o cristal piezelétrico, gerador de ondas ultra-sônicas, seja composto não de uma única peça, mas de infinitos pontos oscilantes. Cada ponto do cristal produz ondas que se propagam no meio, conforme ilustrado na Figura 2.6.

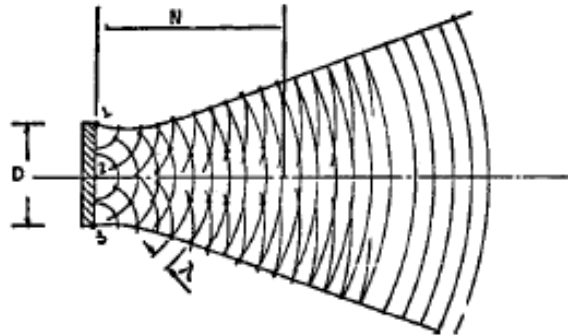


Figura 2.6. Configuração da propagação da onda de comprimento dos pontos 1, 2 e 3; [9].

Nota-se que nas proximidades do cristal existe uma interferência ondulatória muito grande, assim como uma concentração de energia sônica. A medida que afasta-se do cristal, as interferências vão desaparecendo e a energia se dispersa. Em outras palavras, nas proximidades do cristal a sua dimensão e a energia sônica emitida são muito relevantes, entretanto, ao afastar-se as dimensões do cristal passam a ser irrelevantes no que diz respeito à forma do campo sônico.

2.1.9 CONFIGURAÇÃO DO FEIXE

O campo gerado por um transdutor é composto de vários lóbulos, como mostra a Figura 2.7. Na região central do feixe sônico, a sensibilidade, assim como a intensidade sônica é maior e à medida que se afasta do eixo central, num mesmo plano, diminui a sensibilidade. Este efeito é consequência da divergência do feixe sônico depois de percorrida a distância equivalente ao campo próximo. O ângulo entre o eixo central e o ponto de intensidade nula das bordas do lóbulo central é chamado de ângulo de divergência.

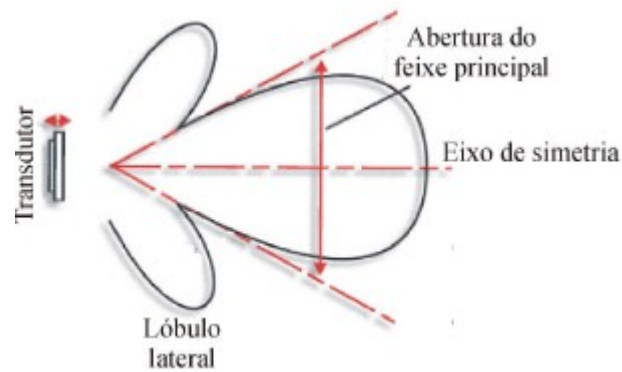


Figura 2.7. Perfil do feixe em coordenadas polares [10].

A abertura do feixe ultra-sônico, como ilustrado na figura 2.8, apresenta importância marcante na análise sônica, uma vez que esta pode alterar de maneira decisiva o resultado do ensaio. Portanto, é importante saber com alguma precisão a abertura do feixe para utilização prática de transdutores para fins específicos [12]. Quando o transdutor não é circular, o ângulo de divergência não pode ser calculado com precisão, neste caso, o ângulo de divergência é mais precisamente encontrado experimentalmente [4].

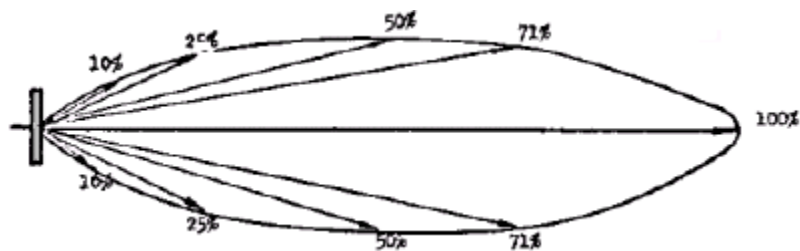


Figura 2.8. Sensibilidade da intensidade ao longo do feixe sônico [11].

2.1.10 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 a medida que afastamos da fonte emissora das vibrações acústicas, Figura 2.9.

Tal fenômeno pode ser observado detectamos 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. Este fenômeno é medido pelo fator "k" na fórmula da divergência, equação 1, e assume valores mostrados na Tabela 1. Quanto mais a borda do feixe sônico incide na descontinuidade, menor será a amplitude do eco e que está relacionado ao fator "k" [3].

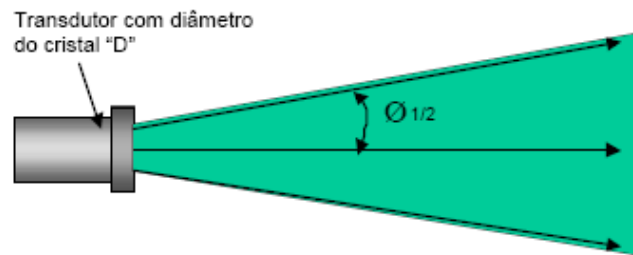


Figura 2.9. Divergência do feixe sônico [3].

$$\text{Sen } 1/2 \text{ } \varnothing = k \cdot \text{Velocidade} / \text{frequência} \times \text{diâmetro} \quad \text{eq.1}$$

Tabela 1. Valores de k em função da redução da intensidade sônica.

k	%	dB
0,37	71	-3,0
0,51	50	-6,0
0,70	25	-12,0
0,87	10	-20,0
0,93	6	-24,0
1,09	1	-40,0
1,22	0	0

2.1.11 CONFORMIDADE COM NORMAS

Algumas variáveis devem ser devidamente ajustadas para que o ensaio seja realizado de maneira correta. Parâmetros tais como: sensibilidade do ensaio, velocidade do som no material, ajuste da escala horizontal dentre outros, deverão ser selecionados pelo próprio operador no momento do ensaio, além de considerar as dimensões e tipos de descontinuidades a serem detectadas, o tipo de material ensaiado, a geometria ou forma da peça ou a seção a ser examinada e as especificações de fabricação e inspeção [13].

Toda inspeção ultra-sônica deve ser realizada em conformidade com procedimentos escritos (normas), contendo todas as informações necessárias aos ajustes e calibrações referentes ao ensaio.

O ensaio por ultra-som, como qualquer outra técnica de ensaio não destrutivo, requer calibração prévia de todos os instrumentos utilizados na sua realização para a correta avaliação do material ensaiado. As calibrações são realizadas pelo próprio operador utilizando blocos de aço normalizados (blocos padrões) baseados em normas específicas [5,14,15]. Devem ser calibrados a escala do aparelho de ultra-som e os transdutores que serão utilizados e, até mesmo, os blocos padrões deverão ter sido fabricados com controle da integridade, rugosidade superficial e dimensões.

Para definir qual a calibração correta para cada tipo de peça ou equipamento, as normas de calibração dos equipamentos, como ASME, API, ASTM etc, definem exatamente como deve ser procedido [5]. Esta calibração pode ser realizada diretamente na peça, utilizando ecos provenientes da superfície ou de discontinuidades introduzidas com dimensões conhecidas, ou através de blocos padrões contendo refletores artificiais, geralmente furos e/ou entalhes, ou ainda através de diagramas que utilizam o comportamento do feixe sônico, como os diagramas DGS (do inglês *distance-gain-size*) [5].

2.1.12 RESULTADO E CRITÉRIO DE ACEITAÇÃO DA INSPEÇÃO

O resultado de um ensaio por ultra-som pode ser um sinal de saída, modo A-scan, ou uma imagem, modos B-scan e D-scan. O modo A-scan é a forma mais comum de apresentação do sinal ultra-sônico. É, basicamente, um gráfico da amplitude versus tempo, no qual a linha horizontal em um osciloscópio representa o tempo decorrido; e as deflexões verticais, a amplitude dos ecos.

O modo B-scan apresenta graficamente o tempo versus distância, no qual um dos eixos corresponde ao tempo decorrido e o outro representa a posição do transdutor ao longo de uma linha na superfície da peça, relativa à sua posição no início da inspeção.

O modo C-scan mostra uma vista plana superior dos defeitos. É produzida pela varredura em uma área, onde para cada posição tem seu respectivo A-scan.

Os resultados são plotados em um sistema gráfico que mostra uma vista em planta da peça, com a dimensão e posição das possíveis discontinuidades conforme mostrado na Figura 2.10. [16].

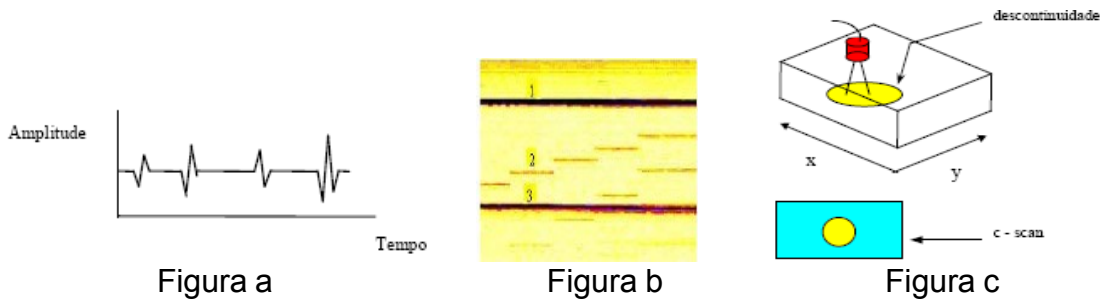


Figura 2.10. Modos de visualização a– A-scan, b– B-scan, c– C-scan [16].

D-scan é a vista de uma seção longitudinal do material na direção de varredura (Y), que é obtida pela composição de todos os A-scans que compõem a linha de varredura [16].

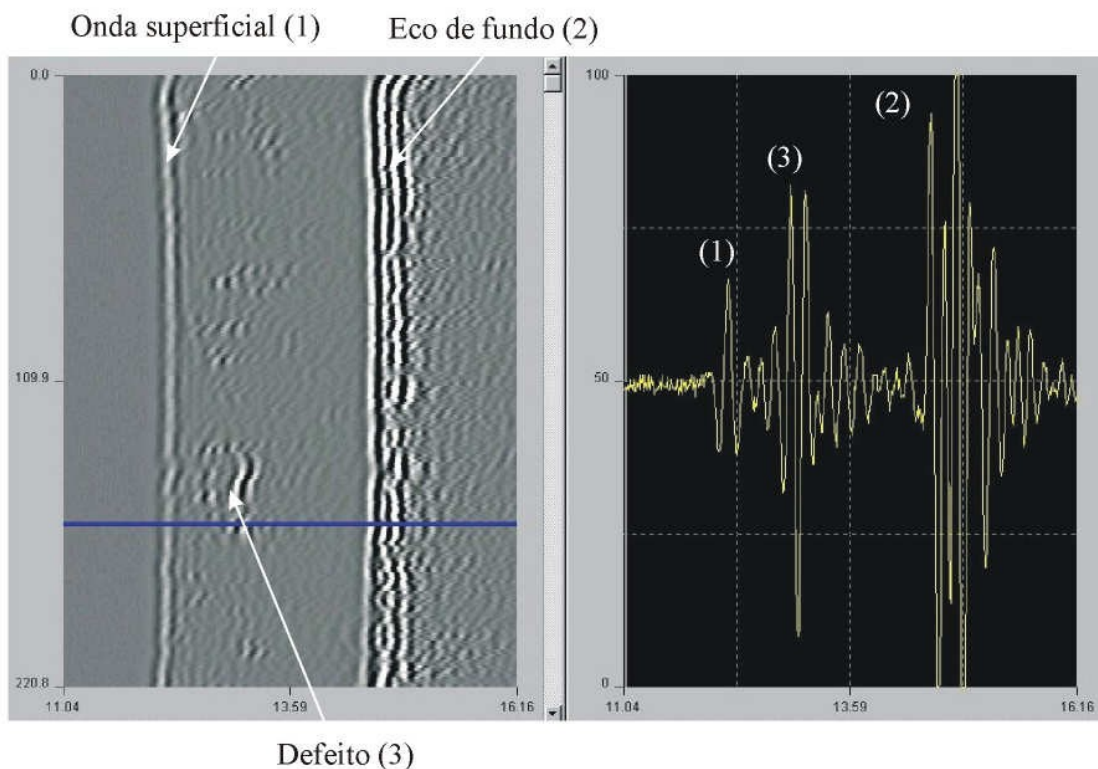


Figura 2.11. Imagem D-Scan e sinal A-Scan de um ponto da imagem [12].

Condições aceitáveis são diferenciadas de condições inaceitáveis através de um limiar de discriminação na saída do aparelho de ultra-som, que pode ser feita automaticamente ou interpretada pelo inspetor.

A viabilidade da aplicação de uma inspeção ultra-sônica para um determinado sistema depende do estabelecimento de uma relação entre a resposta de saída que o Ultra-som pode gerar e as características de desempenho desejadas para o sistema. A relação entre a resposta de saída da inspeção ultra-sônica e as características de desempenho do sistema pode ser viável em aplicações sobre condições de laboratório, mas podem ser impraticáveis sob condições de produção ou serviço. Fatores tais como calibração, critério de aceitação, acessibilidade ao componente, condições superficiais, compatibilidade do material inspecionado e condições ambientais devem ser avaliados para determinar uma relação positiva entre a resposta de saída e o desempenho do sistema [13].

Apesar de atenção, disciplina, e das medidas de controle aplicadas para assegurar uma saída consistente como resultado da inspeção ultra-sônica, a saída variará dentro de parâmetros de controle estabelecidos, como consequência de variações nas propriedades dos materiais, geometria, condições superficiais, acesso, condições ambientais dentre outros.

O resultado da inspeção por ensaios não destrutivos é geralmente uma medida indireta, e diversos sinais podem ser gerados de fontes não relevantes, tais como rugosidade superficial, estrutura granular, e variações geométricas. Estes sinais representam ruído inerente ao processo de inspeção ou ao procedimento de ensaio. A discriminação do resultado de saída do ensaio (sinal/imagem) deve ser derivado de todos sinais cujas amplitudes excedam a amplitude do ruído presente. Análise de sinais e sinais mais ruído são comuns em equipamentos eletrônicos, ópticos e outros processos discriminatórios.

Similarmente a razão das amplitudes sinal/ruído é o primeiro fator para estabelecer o nível de discriminação de um procedimento de ensaio. A redução da razão das amplitudes sinal/ruído pode ser usada para avaliar o desempenho do procedimento de inspeção. Entretanto, é importante reconhecer que a fonte de ruído dominante em um processo de inspeção não é o ruído eletrônico, que pode ser reduzido por filtragem, amostragem múltipla e técnicas de cálculo de

médias, mas sim o ruído devido a sinais não relevantes oriundos do material ou equipamento [4].

A avaliação da inspeção envolve medidas de parâmetros com variações inerentes em ambos, o processo de medida e o objeto de teste. A saída deste processo de decisão pode ser analisada como um problema de probabilidade condicional. Quando a inspeção é realizada para o propósito de detecção de descontinuidade, a saída não é um simples processo binário de aceita/rejeita, como é freqüentemente imaginado. Quatro possíveis saídas podem resultar da aplicação de um procedimento de inspeção para detecção de descontinuidades:

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

Os resultados desejados da aplicação de um procedimento de inspeção são: detecção de descontinuidade (sinal presente) ou não detecção (sinal ausente). A base para detecção é a presença de alguma indicação no sinal com amplitude acima de um limiar pré-determinado.

A detecção e a interpretação do resultado de saída são dependentes do sinal e do ruído que estarão sujeitos aos meios de discriminação (automático ou operador humano) [8].

Se um procedimento de inspeção é aplicado repetidamente em uma descontinuidade de uma determinada dimensão (com geometria fixada, condições superficiais, etc), o resultado de saída pode ser usado para construir um gráfico da distribuição densidade de probabilidade de ambos, sinal da descontinuidade e resposta do ruído (Figura 2.12). Sobre condições ideais, como o resultado da inspeção de uma grande descontinuidade, a distribuição do sinal e do ruído serão bem separadas como mostrado na Figura 2.12 (a).

Neste caso, a discriminação do sinal da descontinuidade do sinal do ruído é um processo simples [4].

Em aplicações práticas, a dimensão da descontinuidade não é fixa (e raramente é grande), e o processo de discriminação é mais complexo. De fato,

o processo de discriminação é aplicado para uma faixa contínua de dimensões de descontinuidades, onde a capacidade de discriminação é dependente das características de desempenho do procedimento de inspeção e da separação do sinal (mais ruído) da resposta do ruído inerente ao processo.

Se o procedimento de inspeção é aplicado para uma única descontinuidade de tamanho intermediário (com geometria fixada, acabamento superficial, etc), a saída pode ser usada para gerar uma distribuição densidade de probabilidade para o sinal e para o ruído, como mostrado na Figura 2.12 (b).

Para esta dimensão de descontinuidade, as distribuições se sobrepõem em parte, e a capacidade de discriminação é dependente do resultado de um único conjunto de sinais de saída. Se os sinais de saída estão bem separados (isto é, sinais nos extremos externos das distribuições), a resposta poderá ser interpretada como aceitável (sem descontinuidades), para todos os casos onde o nível do limiar de aceitação ficar situado entre o sinal e o ruído. Se os sinais de saída situam-se nos extremos internos da distribuição, a resposta poderá ser interpretada como aceitável (sem descontinuidade ou descontinuidade não detectada) ou pode ser interpretada como inaceitável (descontinuidades que não existem são detectadas) para o mesmo nível de limiar de aceitação. Se o processo é repetido para pequenas descontinuidades (sobre as mesmas condições de operação), o resultado da distribuição do sinal e do ruído serão aproximadamente coincidentes como mostrados na Figura 2.12 (c).

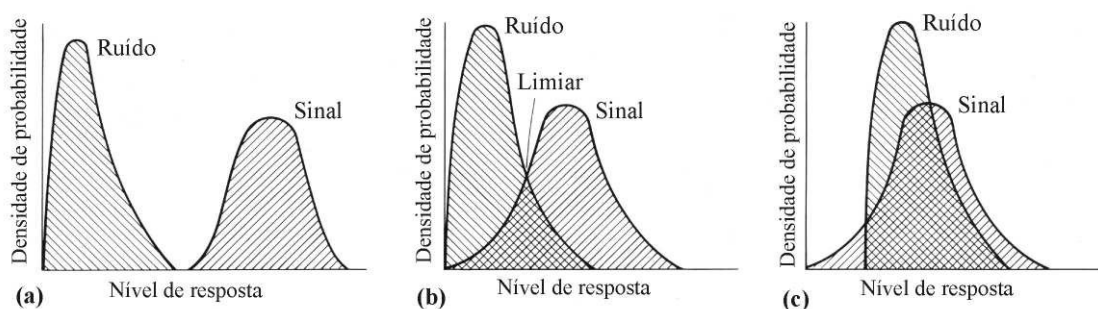


Figura 2.12. Distribuição densidade de probabilidade sinal/ruído para: a) grande descontinuidade, (b) média descontinuidade e (c) pequena descontinuidade [4].

Fica, portanto, evidente que o desempenho de um determinado procedimento de inspeção depende da natureza e distribuição dos sinais de saída gerados sobre determinadas condições. É também evidente que o nível do limiar de aceitação aplicado no processo de discriminação é um fator importante para o sucesso do procedimento. Considere por exemplo um procedimento para detecção de grandes descontinuidades sobre condições que produzam uma separação significativa das distribuições densidade de probabilidades do sinal e do ruído, como mostrado na Figura 2.13. Se o limiar de aceitação é colocado em um nível muito alto (Figura 2.13 (a)), algumas descontinuidades serão perdidas. Se o limiar de aceitação é colocado em um nível apropriado (Figura 2.13 (b)), resultará em uma nítida discriminação. Se o limiar de aceitação é colocado em um nível muito baixo (Figura 2.13 (c)), todas as descontinuidades serão rejeitadas, mas partes boas também serão rejeitadas [4].

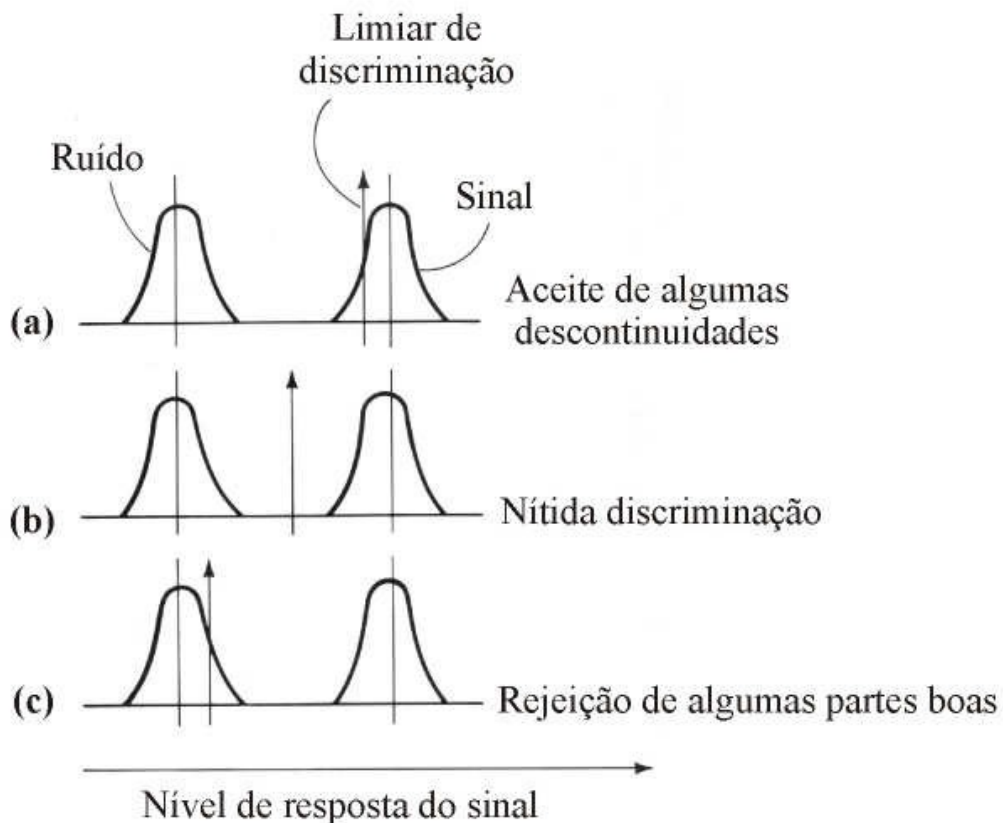


Figura 2.13. Influência do critério de aceitação no processo de discriminação. (a) Critério de aceitação muito alto, (b) critério de aceitação em um nível apropriado e (c) critério de aceitação muito baixo [4].

Desta maneira, pode-se concluir que duas características importantes de desempenho em um procedimento de inspeção são a razão sinal/ruído (margem de separação) e o critério aplicado para o limiar de aceitação no processo de discriminação.

2.2 DEFEITOS E INSPEÇÃO ULTRASÔNICA EM JUNTAS SOLDADAS

A localização de um defeito serve para o inspetor como uma forma de classificação de defeito [17]. A seguir, seguem alguns tipos de defeitos freqüentes encontrados em juntas soldadas.

2.2.1 FALTA DE FUSÃO

Este termo refere-se à ausência de união por fusão entre passes adjacentes de solda ou entre o metal de base. Ela é causada por um aquecimento inadequado do material sendo soldado como resultado de uma manipulação inadequada do eletrodo, do uso de uma energia de soldagem muito baixa, da soldagem em chanfro muito fechado ou da falta de limpeza da junta. Esta descontinuidade é um concentrador de tensões severo, podendo facilitar a iniciação de trincas, além de reduzir a seção efetiva da solda para resistir a esforços mecânicos. A exemplificação da falta de fusão pode ser vista na figura 2.14 [18].

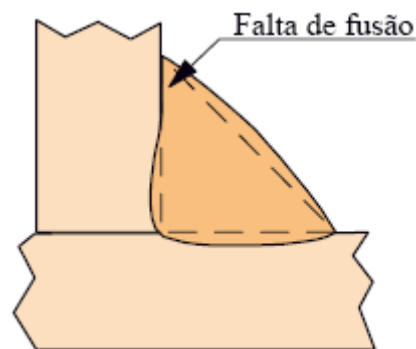


Figura 2.14. Falta de fusão [18].

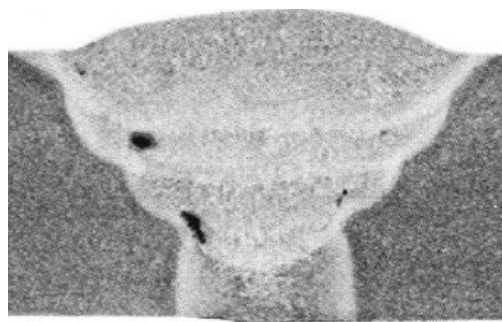


Figura 2.15. Radiografia mostrando falta de fusão [19].

2.2.2 FALTA DE PENETRAÇÃO

O termo refere-se à falha em se fundir e encher completamente a raiz da junta. A falta de penetração é causada por diversos fatores, destacando-se a manipulação incorreta do eletrodo, um projeto inadequado da junta ou a escolha de um eletrodo muito grande para um dado chanfro e o uso de uma baixa energia de soldagem. Falta de penetração causa uma redução da seção útil da solda além de ser um concentrador de tensões. Deve-se ressaltar que, freqüentemente, juntas são especificadas para terem penetração parcial. Nesses casos, a falta de penetração, desde que mantida nos limites especificados não é considerada como um defeito de soldagem. A exemplificação da falta de penetração pode ser vista na figura 2.16 [18].

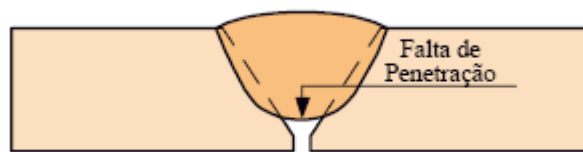


Figura 2.16. Falta de penetração [18].



Figura 2.17. Radiografia mostrando falta de penetração [18].

2.2.3 POROSIDADE

As principais causas operacionais da formação de porosidade estão relacionadas com contaminações de sujeira, oxidação e umidade na superfície do metal de base, de consumíveis de soldagem ou no equipamento de soldagem (como no sistema de refrigeração e em roletes tradicionais de arames) ou por perturbações na proteção (turbulência no gás proteção devido a uma vazão muito elevada ou a problemas no equipamento ou por efeito de correntes de ar). Parâmetros inadequados de soldagem como corrente excessiva e um arco muito longo podem, também, causar a formação de porosidade, particularmente, na soldagem SMAW. Neste processo, estas condições favorecem a degradação do revestimento ou o consumo excessivo de desoxidantes, propiciando a evolução de CO na poça de fusão e a formação de porosidade. Quanto à sua distribuição na solda, a porosidade pode ser dividida em: (a) uniforme, (b) agrupada e (c) alinhada. Conforme indicado na Figura 2.18.

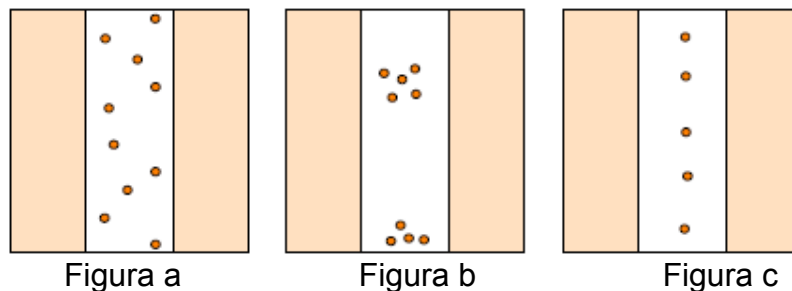


Figura 2.18. Tipos de distribuição de porosidade (a) uniforme, (b) agrupada e (c) alinhada [18].

2.2.4 MORDEDURA

Este termo é usado para descrever reentrâncias agudas formadas pela ação da fonte de calor do arco entre um passe de solda e o metal de base ou um outro passe adjacente. Quando formada na última camada do cordão, a mordedura causa uma redução da espessura da junta e atua como um concentrador de tensões. Quando formada no interior da solda, ela pode ocasionar a formação de uma falta de fusão ou inclusão de escória. Mordeduras são causadas, por manipulação inadequada do eletrodo,

comprimento excessivo do arco e por corrente ou velocidade de soldagem elevada. A tendência à formação desta descontinuidade depende também do tipo de combustível usado. A exemplificação da mordedura pode ser vista na figura 2.19 [18].

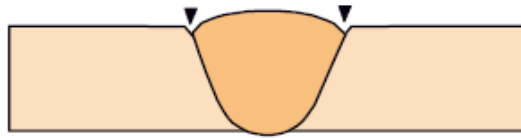


Figura 2.19. Mordedura [18].

2.2.5 PROCEDIMENTO PARA INSPEÇÃO DE SOLDAS

A inspeção de soldas por ultra-som ,consiste em um método que se reveste de grande importância na inspeção industrial de materiais sendo uma ferramenta indispensável para o controle da qualidade do produto final acabado, principalmente em juntas soldadas em que a radiografia industrial não consegue boa sensibilidade de imagem , como por exemplo juntas de conexões , ou mesmo juntas de topo com grandes espessuras.

Os procedimentos para inspeção de soldas descritos pelas Normas ou Códigos de fabricação variam em função dos ajustes de sensibilidade do ensaio, dimensionamento das indicações, critérios de aceitação das descontinuidades encontradas, e outras particularidades técnicas [3].

2.2.6 PREPARAÇÃO DA CURVA DE CORREÇÃO DISTÂNCIA AMPLITUDE (DAC)

a) Posicionar o transdutor sobre o bloco padrão de modo a obter resposta do furo que apresentar maior amplitude;

b) Ajustar a amplitude do eco a 80% da altura da tela. Este ganho é denominado “Ganho Primário-Gp” da curva de referência (DAC).

c) Para completar a curva de referência e, sem alterar o ganho, posicionar o transdutor de forma a se obter ecos dos furos do bloco padrão a várias distâncias, até o alcance desejado, e traçar a curva unindo os pontos obtidos.

d) Traçar as curvas de 50% e 20% da curva de referência (DAC).

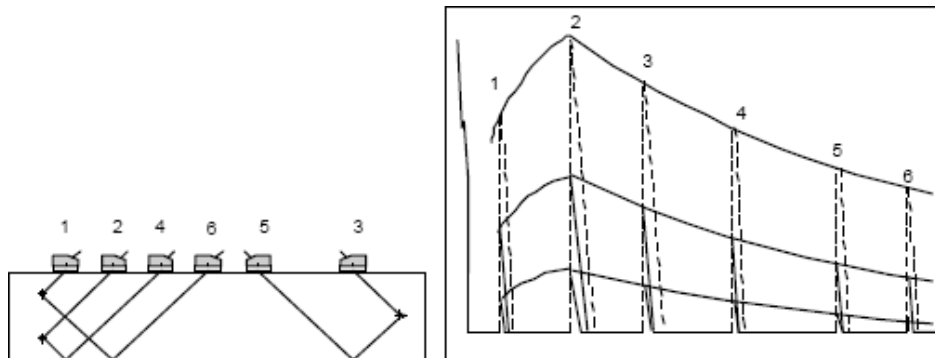


Figura 2. 20. Traçagem da Curva de Referência ou Curva DAC [3].

2.2.7 PREPARAÇÃO DAS SUPERFÍCIES DE VARREDURA

A inspeção da solda se processará através da superfície do metal base adjacente à solda, numa área que se estenderá paralelamente ao cordão de solda, que denominamos área ou superfície de varredura.

O resultado do ensaio por ultra-som é dependente da preparação das superfícies, assim devemos remover carepas, tintas, óxidos, pó, graxa e tudo que possa mascarar, ou impedir a penetração do feixe sônico na peça a ensaiar. Limitação de temperatura da peça deve ser levada em conta e está associado ao modelo e tipo do transdutor, pois altas temperaturas (acima de 60° C) podem danificar os transdutores [3].

2.2.8 ENSAIO ULTRA-SÔNICO MANUAL PULSO-ECO APLICADO EM SOLDAS

Uma das dificuldades do inspetor de ultra-som que se inicia na técnica de ensaio de soldas é justamente saber onde ele deve monitorar a tela para que nenhuma indicação passe despercebida. Assim descrevemos abaixo uma técnica que mostra de forma fácil qual a área da tela do aparelho que deve ser observada durante a inspeção da solda.

Vamos observar a figura abaixo que mostra o posicionamento do transdutor angular de 60 graus sobre uma chapa com 20 mm de espessura,

com o feixe direcionado para o canto inferior da borda da chapa, resultando num eco com caminho de som de 40 mm. Da mesma forma, se posicionarmos o transdutor com o feixe direcionado para a borda superior da chapa, terá um eco a 80 mm, correspondente ao caminho do som em "V" na chapa.

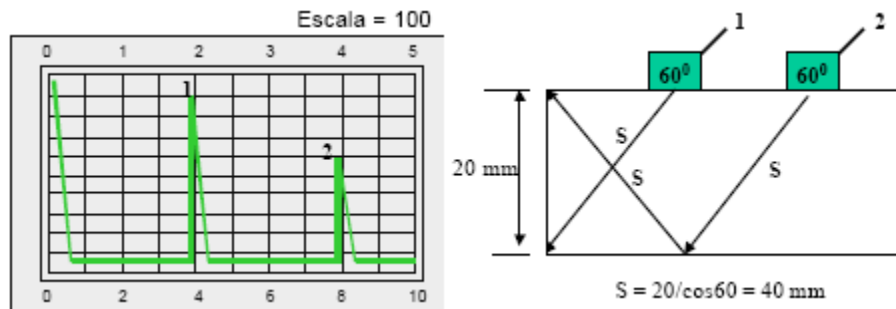


Figura 2.21. Reflexões nas bordas da chapa [3].

Repare que na tela do aparelho a região compreendida entre 40 e 80 mm corresponde à borda inferior e a borda superior. Agora, observe a figura abaixo e compare com a anterior. O leitor verá que um eco proveniente da raiz da solda será observado na marca de 40 mm e um eco proveniente do reforço, será observado na marca de 80 mm.

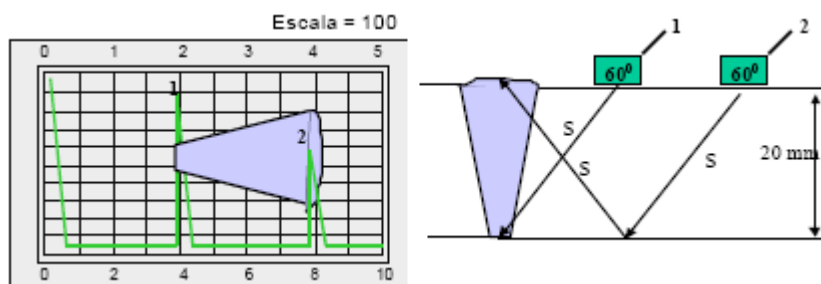


Figura 2.22. Reflexões das extremidades do cordão [3].

Portanto a área da solda estará compreendida entre 40 e 80 mm na tela, e caso apareçam indicações, estas devem estar nesta região da tela.

O uso do mostrador tipo "A-scan" não é limitado à detecção e caracterização de descontinuidades, ele pode ser utilizado também para medição de espessuras, velocidade sônica, atenuação e geometria do feixe sônico como exemplificado na Figura 2.23.

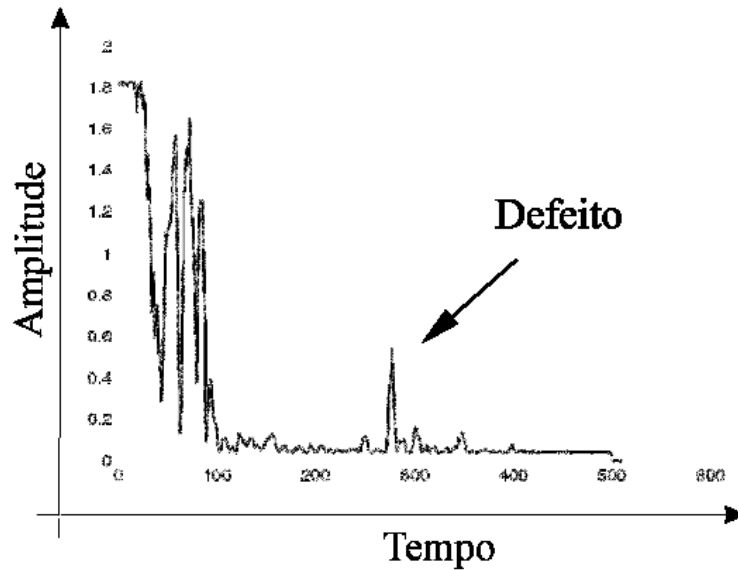


Figura 2.23. Modelo típico de sinal obtido (A-scan) pela técnica pulso-eco numa região contendo uma descontinuidade [12].

2.2.9 SISTEMA MULTICANAL E MULTIPLEXADOR PARA INSPEÇÃO EM SOLDAS

O sistema multicanal e o multiplexador são técnicas nas quais se podem ter vários canais para operar com um número variado de transdutores. Esses sistemas trabalham com vários transdutores, como na técnica de matriz de transdutores com defasagem (“phased array”), sendo que, neste último, o objetivo principal do processo é obter um melhor direcionamento e focalização do feixe ultra-sônico, enquanto que no sistema multicanal e multiplexador o objetivo é otimizar o processo, tornando-o mais rápido, mais barato e menos cansativo para o operador.

A “multiplexação” é o processo de combinar diversas medidas para transmissão sobre o mesmo caminho do sinal. É utilizado o princípio de divisão do tempo para dividir a medida para os diversos canais. “Multicanalização” é o processo de possuir diversas medidas para transmissão sobre caminhos diferentes para cada sinal, capaz de operar cada um de diferentes modos (ganho, frequência e tempo) simultaneamente ou individualmente [20].

Em geral, o termo “multiplexador” aplica-se para canais de rádio ou comunicação de voz, onde o ganho, frequência e tempo são os mesmos para cada sinal. Portanto, o trabalho de multiplexação é relativamente simples,

sendo apenas requerido um equipamento para selecionar umas das entradas e ligar a informação para um comum amplificador ou circuito processador (Figura 2.24).

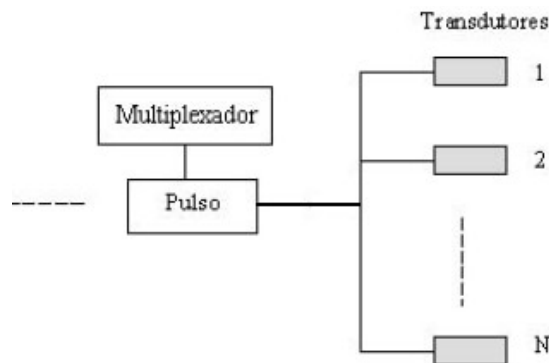


Figura 2.24 - Sistema multiplexador [20].

Para testes ultra-sônicos existem duas limitações ligadas a esse conceito. A primeira é a emissão de um pulso com alta voltagem e alta velocidade para diversos transdutores com velocidade próxima a atingível por um transdutor simples. A segunda limitação para testes ultra-sônicos é a variável de ganho dos transdutores. Geralmente os transdutores podem ser mantidos dentro dos 6 dB. Contudo, para alguns testes de falha de precisão este ganho não é suficiente. Portanto, muitos sistemas multiplexador de ultra-som incorporam um pré-amplificador separado ajustável para cada transdutor (Figura 2.25), caracterizando dois sistemas multicanal: (para os pulsos e para os pré-amplificadores) dentro do multiplexador [20].

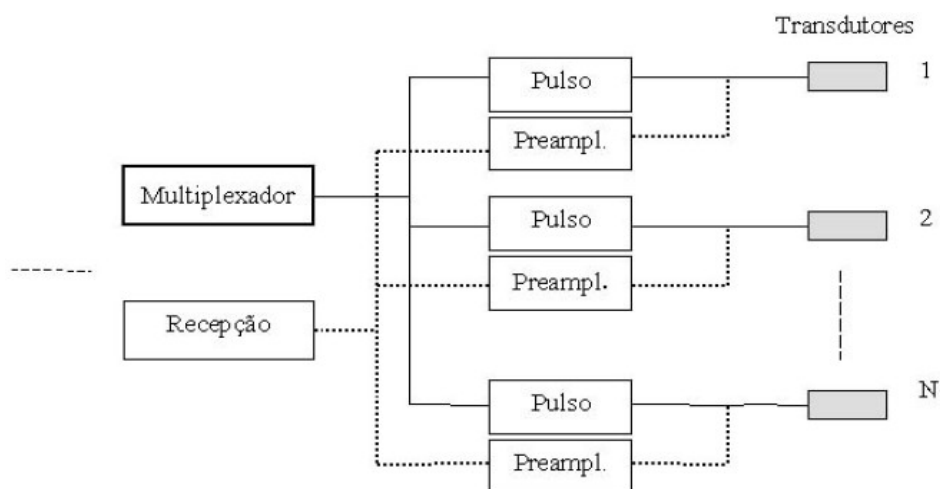


Figura 2.25 - Sistema multiplexador com gerador de pulsos independente e pré-amplificador [20].

Deve ser considerada, também, a vulnerabilidade do sistema multiplexador no que diz respeito a falhas nos componentes. Obviamente, que quando um dos caminhos do multiplexador falha, todo o sistema sai de operação. Um sistema multicanal pode ser projetado para que cada canal opere independentemente e, portanto, a falha em um canal não interferirá no restante do sistema (figura 2.26) [20].

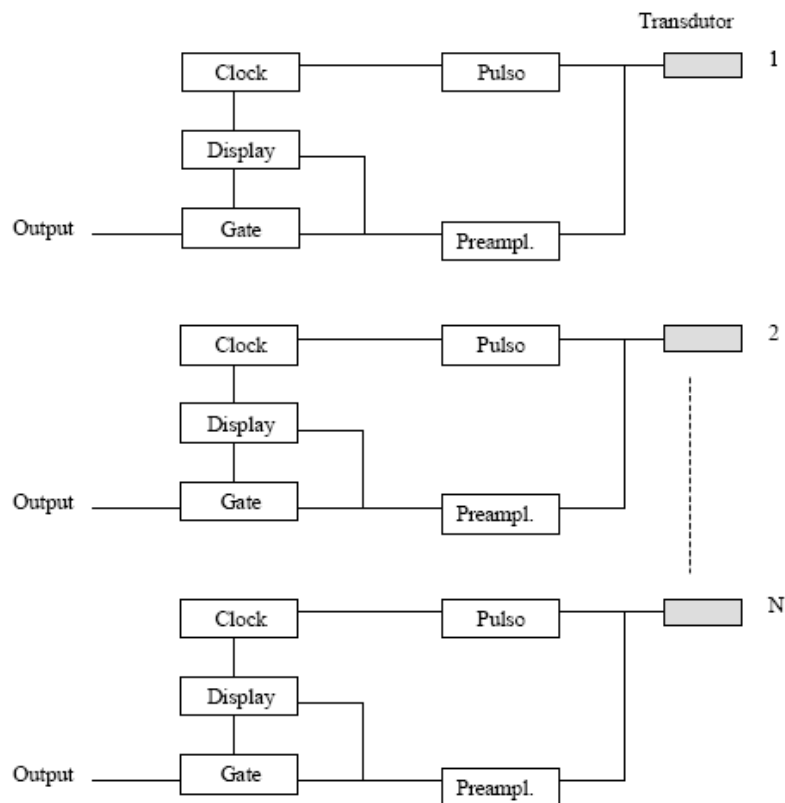


Figura 2.26 - Sistema multicanal [20].

Outro aspecto limitante do sistema multiplexador é a redução da velocidade de teste como uma função do número de canais. Sendo o caminho do sinal dividido no tempo, cada canal deve pulsar em seqüência. Isto significa que a taxa de repetição de pulso efetiva é a P.R.F. (frequência de repetição de pulso) do sistema (clock) dividido pelo número de canais.

O sistema multicanal por outro lado, pode pulsar todos os canais simultaneamente, dando, portanto, a máxima velocidade de teste possível. Contudo, se os pulsos ocorrerem simultaneamente, pode haver interferência entre os feixes dos transdutores, então o sistema multicanal pode ser configurado para produzir pulsos seqüenciais ou uma combinação de pulsos seqüenciais e simultâneos.

No sistema multiplexador para medição de defeitos planares, como mostrado na Figura 2.27, vários transdutores são fixados em um gabarito, e uma placa controla a seqüência de geração e recepção de sinais ultra-sônicos, sendo que o pulso que vai excitar os transdutores é gerado pela placa de cada canal no módulo multiplexador. Neste caso, o mesmo transdutor pode emitir e receber o pulso, como no modo pulso-eco, ou um transdutor pode emitir e outro receber, como no modo transmissão recepção.

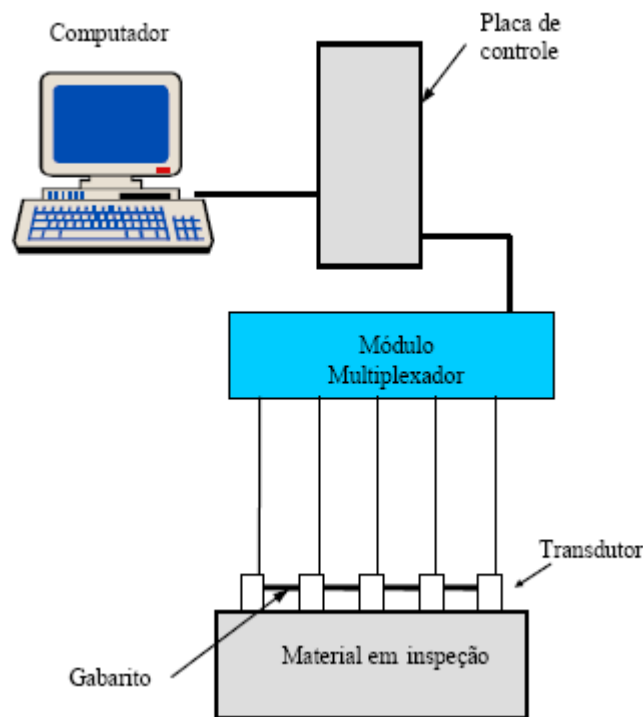


Figura 2.27 - Sistema multiplexador com gerador de pulsos e pré-amplificador independente [16].

Neste sistema, uma placa gera periodicamente pulsos com determinado período. O pulso emitido é direcionado através de um dos canais. No instante em que a placa digitaliza o sinal ultra-sônico vindo um canal, a placa gera uma interrupção para processar o sinal antes de receber o sinal do canal seguinte, armazenando todos os dados na memória do computador, estimulando, assim, seqüencialmente cada transdutor em cada canal.

2.2.10 SISTEMA AUTOMATIZADO PARA INSPEÇÃO DE SOLDAS

Este sistema ultra-sônico foi proposto no Canadá no início da década de 80 para inspeção mecanizada de solda circumferencial. Em 1993 a “Transcanada Pipelines Limited” (TCPL) tornou-se a primeira companhia norte-americana a usar a inspeção ultra-sônica como principal método de teste não destrutivo para a construção de dutos [21].

O real avanço do ultra-som mecanizado em solda circumferencial em 1993 deu-se em decorrência da combinação do mapeamento C-scan e da técnica “time of flight diffraction” (TOFD) com a técnica pulso eco, como usado no “rotscan” [22]. Este sistema tem sido desenvolvido para a inspeção de solda circumferencial durante a construção de dutos de longa distância, permitindo a detecção, registro e rápida interpretação de todos os defeitos relevantes na solda e em todos os tipos de soldas [22].

As vantagens dos sistemas mecanizados para inspeção de solda incluem velocidade, precisão e ausência de radiação perigosa. Com o resultado da inspeção em tempo real, o sistema ultra-sônico fornece o controle do processo de soldagem. O sistema não só localiza a área defeituosa ao longo do comprimento da solda, mais também estabelece a posição e a extensão vertical do defeito [23,24]. Tem sido também verificado que o processo pode aumentar a probabilidade de detecção, em particular para descontinuidades que são difíceis de serem detectadas, devido sua desfavorável geometria ou orientação [24,25].

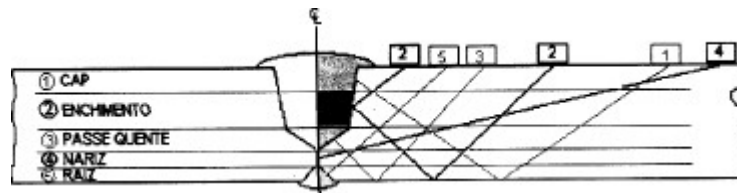
Nos sistemas mecanizados que operam com pulso-eco em juntas soldadas, a cobertura completa da solda é realizada em uma única varredura circumferencial, e é obtida através da colocação de conjuntos de transdutores, em ambos os lados da solda. Cada transdutor atua por zona, eliminando-se a necessidade de varreduras transversais ao cordão [26]. A Figura 2.28 apresenta o esquema básico deste sistema.

Mais recentemente, tem sido utilizada a inspeção mecanizada de solda circumferencial em dutos utilizando o sistema ultra-sônico “phased array”, o qual oferece certas vantagens sobre a inspeção mecanizada convencional: Dutos de 4 a 56 polegadas de diâmetro podem ser inspecionadas com o mesmo “array”, o aumento no número de zonas varridas melhora a imagem e o

dimensionamento, permite a inspeção de áreas muito mais complexas, reduz o tempo de varredura, são menores e mais leves, entre outras [27].

Sistema automatizado de inspeção também tem tido grande aplicação na inspeção de navios de processamento e estocagem temporária de petróleo, mais conhecidos pela sigla FPSO [28].

a) **Regiões**



b) **Arranjo**

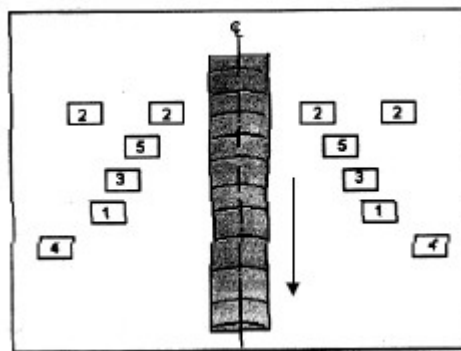


Figura 2.28 - Sistema multiplexador para inspeção de juntas soldadas.

a) Regiões inspecionadas por cada par de transdutores em cada lado da junta.

b) arranjo dos transdutores na varredura [26].

2.3 SIMULAÇÃO DO FEIXE SÔNICO EM JUNTAS SOLDADAS.

2.3.1 PRINCÍPIOS DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Nos últimos anos, a simulação computacional vem assumindo uma importância cada vez maior como ferramenta de aquisição de conhecimento. Na simulação desenvolvida nos primórdios da Pesquisa Operacional, os problemas eram resolvidos por meio da obtenção dos melhores resultados possíveis para cada parte individual do modelo.

Entretanto, à medida que a complexidade dos problemas cresceu, surgiu a necessidade de se utilizar uma abordagem mais sistêmica e generalista. A simulação utilizou-se, inicialmente, de linguagens de programação geral, como o FORTRAN. Mas, à medida que a complexidade das observações e a capacidade dos recursos computacionais cresceram, surgiram os programas de simulação de propósito geral (como o GPSS) e os baseados na Dinâmica dos Sistemas (DYNAMO, STELLA etc). Essa metodologia (dinâmica dos sistemas) faz uso do conceito de pensamento sistêmico para a resolução de problemas e para o estudo de sistemas [29].

2.3.2 MODELAGEM COMPUTACIONAL

A modelagem computacional é a área que trata da simulação de soluções para problemas científicos, analisando os fenômenos, desenvolvendo modelos matemáticos para sua descrição, e elaborando códigos computacionais para obtenção daquelas soluções. É área em expansão, de ampla aplicação, em:

- Desenvolvimento de produtos industriais;
- Pesquisas científicas básicas e aplicadas;
- Simulações e previsões temporais e espaciais de fenômenos;
- Matemática, física, química;
- Engenharia e tecnologia;
- Biologia e saúde;

- Meio ambiente e ecologia;
- Oceanografia e geofísica, dentre outras.

Algumas áreas de atividade econômica que auferem benefícios da modelagem computacional são:

- Agroindústria;
- Medicina;
- Construção civil e estruturas;
- Aeronáutica, naval e automobilística;
- Indústria de petróleo e petroquímica, dentre outras áreas de aplicação.

A sofisticação dos problemas com que a humanidade tem se deparado nas últimas décadas, em áreas tão diversas como as megaestruturas e a mecânica do contínuo, a nanotecnologia, a genômica e a bioinformática, a computação quântica, a ecologia, e a astrofísica, em novos materiais e em desenvolvimento sustentado, a título de exemplo, nos apresenta exigência de respostas exponencialmente mais complexas com relação àquelas que precisamos gerar no passado, apresentando para a ciência e para a comunidade científica um desafio: a necessidade de obtenção de resposta cada vez mais sofisticada, objetivando tratar aquela complexidade, em tempo sucessivamente menor e por meio de solução de problemas complexos [29].

2.3.3 PROBLEMAS COMPLEXOS

Problemas complexos, ou de elevado grau de complexidade, resultam em inflação da quantidade de variáveis físicas a manipular e controlar no processo de estabelecimento do problema, estabelecimento de hipóteses para o modelo, proposição de teorias, postulados e teoremas, guias para a busca de solução do problema, controle, aferimento e aproximação da solução. Usualmente problemas complexos demandam forte esforço de cálculo, a partir do estabelecimento de modelos matemáticos robustos ou do estabelecimento de teias de relações entre variáveis em diversas escalas de observação, desde

nano, passando pelo micro, até o macro. O eixo de estabelecimento do modelo de solução de problemas complexos tem sido a observação do problema, de sua fenomenologia e a concepção do modelo físico e do modelo fenomenológico que antecede o desenvolvimento do modelo matemático, desenvolvimento do sistema de equações que regem o problema, e sua solução computacional mediante um código apropriado. O estabelecimento desta concepção de tratamento e abordagem de problemas complexos em ciência, bem como de sua solução a partir deste modelo, considerando uma diversidade de modelos qualitativos, e, sobretudo modelos quantitativos, em abordagem numérica usualmente computacional, busca assim superar a incerteza na trajetória de evolução do problema sob análise, e sobre as variáveis do problema. Modelos matemáticos estabelecidos a partir de modelos fenomenológicos recaem em sistemas de equações diferenciais parciais ou de equações diferenciais ordinárias de elevado número de incógnitas, demandando forte esforço computacional na sua solução. A aproximação das soluções dessas equações por procedimentos numéricos tornou-se necessária na medida em que as ciências ambientais, engenharias, tecnológicas, e as ciências biológicas e da saúde, avançavam no sentido da satisfação das necessidades humanas [29].

2.3.4 SOFTWARE CIVA.

O software CIVA é uma plataforma inteligente dedicada para ensaios não destrutivos. É composta por simulação, imagens e módulos de análises, que permitem conceber ou otimizar as técnicas de inspeção e prever o desempenho de configurações realistas de ensaios não destrutivos previamente configuradas [30].

Por longos anos, uma rede de trabalho com diferentes colaboradores com muitos modelos e processamentos de dados desenvolveu algoritmos matemáticos em diferentes laboratórios da França e Europa se convergiu para o software CIVA.

O intuito dessa plataforma de aproximação é estender o uso da simulação numérica dentro do contexto industrial para oferecer ao usuário final

ferramentas de simulação complementares e facilitar a compreensão entre os modelos que promovem a validação com a referência (código) [31].

Atualmente o CIVA é utilizado em inspeção Ultra-sônica, Raios-X, Corrente parasita e “Phased Array”.

Ele permite uma simulação em todo o processo de inspeção, ou seja, simulação com todos os componentes possíveis numa inspeção ou com componentes separadamente, por exemplo: transdutores com diferentes aberturas de feixe sônico, falhas, diferentes tipos de materiais, diferentes ângulos de incidência, dentre outros.

As ferramentas de simulação do CIVA aplicado em inspeção ultra-sônica incluem: interação do feixe sônico de propagação com falhas ou descontinuidades.

Essas ferramentas são baseadas em equações de aproximação semi-analíticas a fim de diminuir o tempo computacional, a maioria dos estudos industriais requer uma ou várias modificações de parâmetros para otimizar a técnicas, classificar e identificar os defeitos e obviamente dimensionar os defeitos.

Contudo esses códigos também precisam contar com uma configuração realista, dessa forma também é feita uma integração numérica com partes em 3D e com distribuição [32].

Qualquer integração numérica é feita dentro de uma faixa, dentro de um limite, então para validação dessa integral é necessário definir os parâmetros corretamente, sendo assim a validação é a chave principal para tornar confiável os códigos de entrada da simulação [30].

3 CAPÍTULO 3: MATERIAIS E METODOLOGIA DE ESTUDO

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo é apresentado o duto utilizado como material de estudo do presente trabalho. Também são descritos os procedimentos para verificar o comportamento da amplitude da onda ultra-sônica em relação aos diferentes ângulos dos transdutores com diferentes aberturas do feixe sônico.

3.2 SIMULAÇÃO

3.2.1 SIMULAÇÃO DA TRAÇAGEM DA ABERTURA DO FEIXE SÔNICO

Do Aurélio:

"[simulação] s.f. Ato ou efeito de Simular. Experiência ou ensaio realizado com o auxílio de modelos."

Inicialmente o trabalho foi planejado para que não houvesse falhas relevantes durante a execução do projeto e que as soluções apresentadas fossem as melhores possíveis.

Uma das principais etapas do planejamento é a simulação, ou seja, é uma maneira de estudar o comportamento e ações de um determinado sistema através de modelos.

Para estudar o comportamento da abertura do feixe foi realizado uma simulação com o programa CIVA, verificando a possibilidade de detecção do feixe sônico com as dimensões predeterminadas do bloco padrão. Tanto a altura quanto o espaçamento entre os furos que serão ilustrados mais abaixo.

Foram determinados, depois de algumas tentativas e erros, os parâmetros ótimos para estudar as ações desse modelo quando forem executados na prática e mediante os resultados da simulação foram adotados as dimensões dos furos.

Todos os dados de entradas do programa CIVA foram os mesmos predeterminados para a confecção do bloco padrão.

Abaixo na figura 3.1 é mostrada a configuração do bloco e a disposição dos furos que são predeterminados pelo procedimento "Técnicas de

Dimensionamento de Descontinuidades” [y] que será mencionado na seção 3.5 desse trabalho.

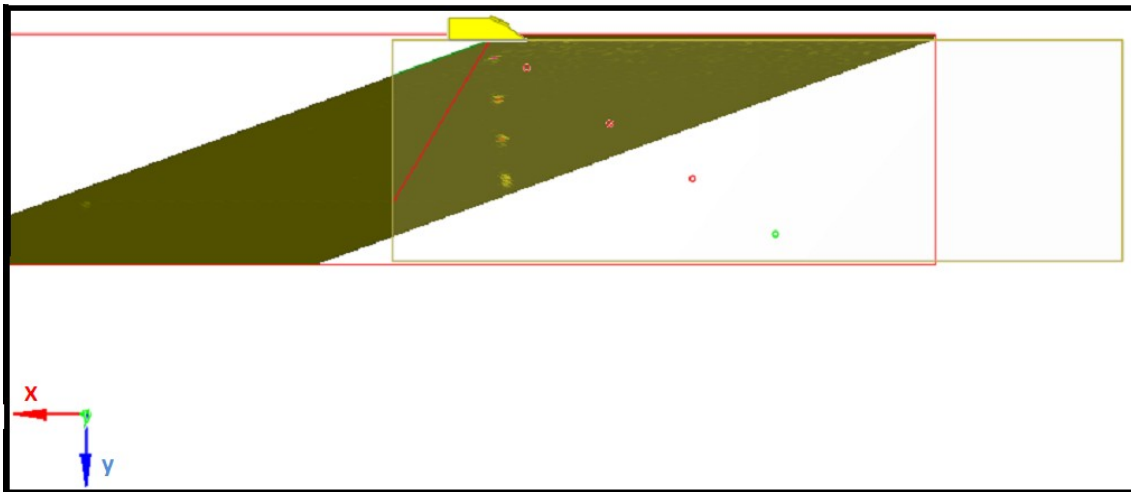


Figura 3.1 – Configuração do bloco na simulação.

A figura 3.2 abaixo mostra que foi possível a detecção do sinal pelo programa em questão, logo as medidas foram adotadas, como mencionado no parágrafo anterior, para o bloco padrão propriamente dito. Todas as dimensões tanto do bloco quanto referente ao diâmetro e as distâncias dos furos serão apresentados na seção 3.3.

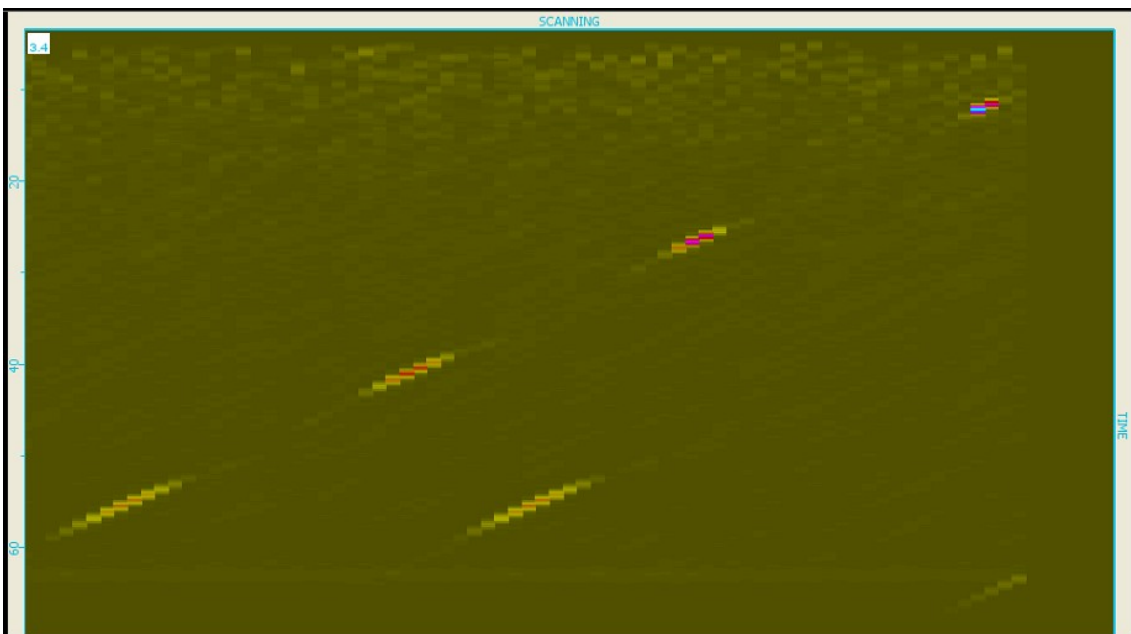


Figura 3.2 – Resultado da detecção dos furos no bloco.

3.2.2 SIMULAÇÃO DA DETECÇÃO DO DEFEITO NO MEIO DO CHANFRO DA SOLDA

Também foi simulada a detecção de um defeito na solda para previamente conhecer os possíveis resultados durante a inspeção.

A existência de possíveis defeitos de solda em dutos pode provocar falha. Esse problema apresenta-se ainda mais crítico no caso de risers de aço em catenária e em outras aplicações. As tensões atingidas durante o projeto podem gerar deformações plásticas, provocando o aumento de eventuais defeitos de solda.

Foram induzidos defeitos artificiais nas soldas durante a fabricação dos espécimes, de forma a simular um defeito de falta de fusão. Todos os defeitos serão descritos nas próximas seções.

Na figura 3.3 é apresentada uma figura da simulação em CIVA, no qual foi possível detectar um defeito com os mesmos parâmetros reais dos transdutores, do ângulo do bisel, da espessura do duto, dentre outros, que foram usados no projeto.

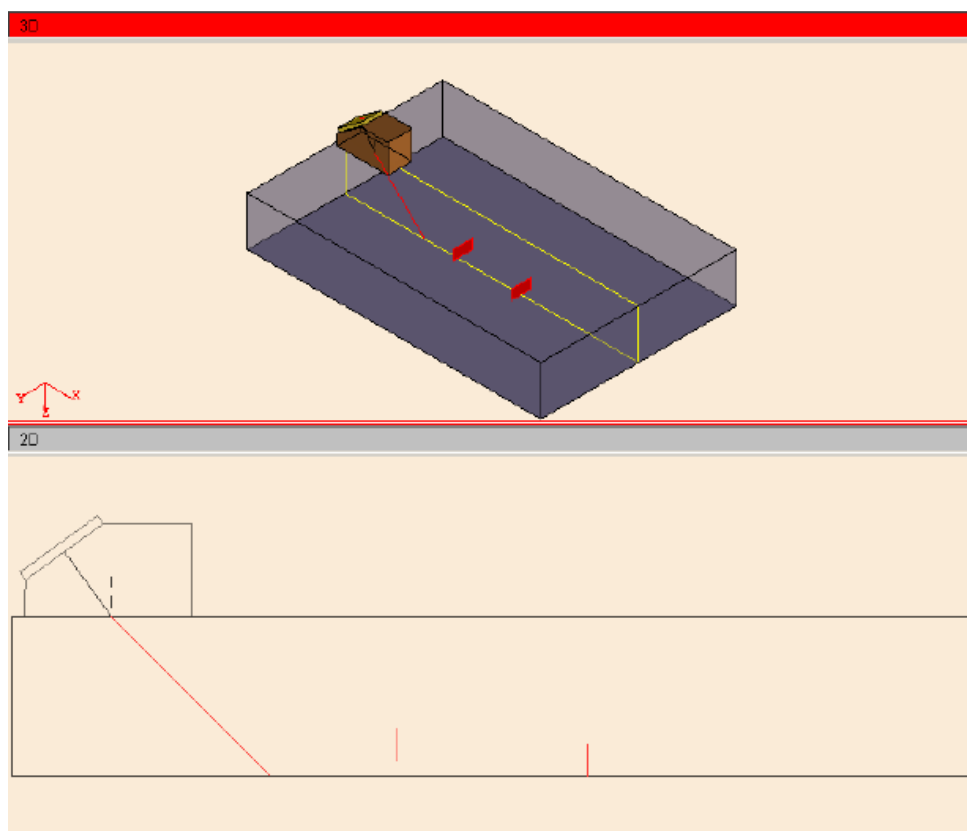


Figura 3.3 – Início da simulação para detectar um defeito na junta soldada.

3.3 MATERIAL E EQUIPAMENTO UTILIZADO PARA TRAÇAGEM DA ABERTURA DO FEIXE SÔNICO

Para traçar a abertura do feixe sônico foi usado o equipamento Panametrics-NDT, modelo Epoch IV Plus, figura 3.4, que é um equipamento de detecção digital de falhas por ultra-som que conta com uma tela multicolorida de cristal líquido (LCD) e com funções que atendem as necessidades das inspeções mais exigentes. “Também apresenta uma grande capacidade para armazenar dados, porém não na extensão “csv”, e possibilita a transferência para o computador através de uma porta USB de alta velocidade.



Figura 3.4 – Aparelho de Ultra-som Panametrics-NDT, modelo Epoch IV Plus

Os transdutores utilizados tanto para traçagem da abertura do feixe sônico quanto para o ensaio propriamente dito foram transdutores angulares de: 45°, 60° e 70° com frequência de 2 e 4MHz. O tamanho do cristal piezo-elétrico é de 8x9mm da marca KrautKramer. O acoplante utilizado foi óleo lubrificante comum.

Abaixo nas figuras 3.5 e 3.6 podemos ver os transdutores de diferentes ângulos para as duas frequências mencionadas no parágrafo acima que foram usados no atual trabalho.



Figura 3.5 – Transdutores de 45°, 60° e 70° com freqüência de 2MHz.



Figura 3.6 – Transdutores de 45°, 60° e 70° com freqüência de 4MHz

O bloco padrão utilizado para o estudo é constituído de um aço 1020 com dimensões de 220 x 320 x 20 mm de altura, largura e profundidade respectivamente.

Os furos foram feitos na furadeira de bancada com profundidades de 12, 21, 32 e 42 mm. Mostrado na figura 3.7.



Figura 3.7 – Bloco para determinação da abertura do feixe sônico.

3.4 CALIBRAÇÃO DO EQUIPAMENTO

Inicialmente antes de traçar a abertura do feixe sônico o equipamento foi calibrado com os blocos V1 e V2 ambos especificados pela Norma DIN 54122 que permitem o exame ultra-sônico em aço carbono não ligado ou de baixa liga.

Os blocos de calibração devem ser apropriadamente calibrados quanto às suas dimensões, furos, entalhes e quanto à velocidade sônica do material que constitui o bloco.

O Bloco V1 deve ser utilizado para calibrar as escalas na tela do aparelho usando as dimensões padronizadas, mas também verificar a condição do transdutor angular, com respeito ao ponto de saída do feixe sônico (posição 1 da figura) e a verificação do ângulo de refração do transdutor (posição 2 da figura). Em geral +2 graus é tolerável [3].

Abaixo segue a figura 3.8 mostrando o bloco de calibração V1.



Figura 3.8 – Bloco de calibração V1

Uma das características do Bloco de calibração V2 é a seqüência de repetição dos ecos de reflexão nos raios de curvatura de 25 mm e 50 mm, conforme mostrado na figura.

Posicionando o transdutor angular em "J" sobre o bloco V2, como mostrado na figura 3.9 abaixo, deverão ser obtidos na tela do aparelho de ultra-som ecos múltiplos de reflexão dos raios de 25 mm e 50 mm, ajustados nas distâncias de 25 mm, 100 mm e 175 mm, com auxílio do controle de velocidades.

A figura 3.10 mostra o bloco V2 propriamente dito.

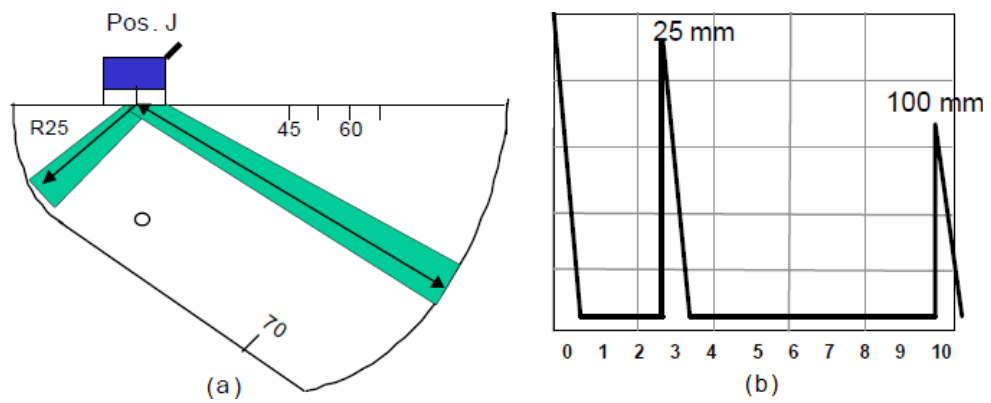


Figura 3.9 – (a) Bloco de calibração e transdutor e (b) tela do aparelho.
 Abaixo na figura x temos o próprio bloco de calibração V2.



Figura 3.10 – Bloco de calibração V2

3.5 TRAÇAGEM DA ABERTURA DO FEIXE SÔNICO

Nesse item será tratado o procedimento para traçar a abertura do feixe segundo a referência [36] com algumas adaptações para melhor eficiência do ensaio do presente trabalho.

Os pontos abaixo foram seguidos durante a etapa em questão.

1- Determinar o ponto de emissão do transdutor angular com o bloco de calibração V1, mostrado na figura 3.8;

2 - Selecionar os furos e determinar a profundidade, que será a altura entre dos quatro furos que foram feitos em um bloco de aço para traçagem (no mínimo três), observando que nenhum deles se situe dentro do campo próximo como visto na figura 3.10;

3 - Posiciona-se o transdutor no bloco, de modo a maximizar o sinal proveniente do furo selecionando de menor profundidade e anota-se a distância entre o ponto de emissão do transdutor e a linha vertical que passa pelo furo (d1);

4 - Ajusta-se o ganho do aparelho posicionando-se a reflexão a 100% da altura da tela;

5 - Movimenta-se o transdutor para frente, na direção do furo, até que a reflexão caia a 10% da altura da tela (queda de 90% da altura original) o que equivale a uma queda de 20dB, e anota-se nesta posição a distância entre o ponto de emissão do cabeçote e a linha vertical que passa pelo furo (d2);

6- Retorna-se à posição correspondente à reflexão máxima;

7 - Movimenta-se o transdutor para trás, na direção oposta ao furo, até que a reflexão caia a 10% da altura da tela (queda de 90% da altura original) o que equivale a uma queda de 20dB, e anota-se nesta posição a distância entre o ponto de emissão do cabeçote e a linha vertical que passa pelo furo (d3);

8 - Transfere-se para o computador, na linha horizontal correspondente à profundidade do furo, as dimensões (d_1), (d_2) e (d_3) obtidas em (3), (5) e (7).

9 - Repetir o mesmo procedimento para os outros furos.

A figura 3.11 apresenta as etapas descritas para determinar a abertura do feixe sônico.

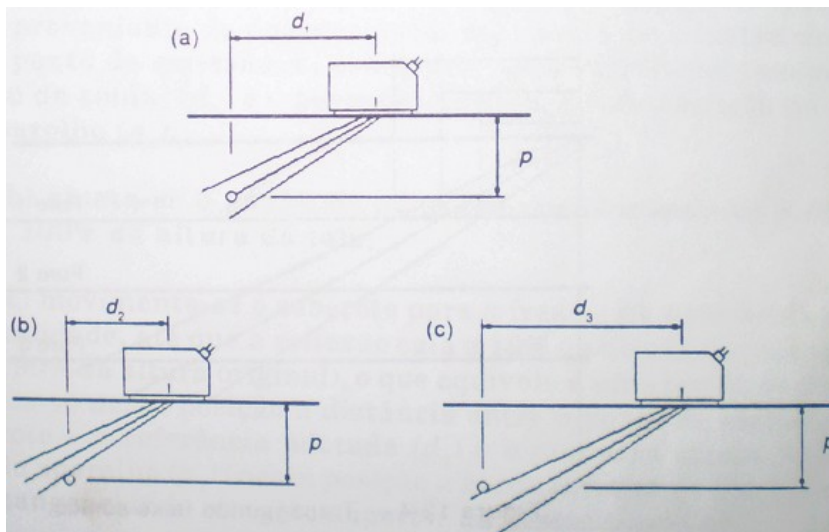


Figura 3.11 – Traçagem do feixe sônico pela borda dos 20 dB, em (a) centro do defeito, (b) -20dB e em (c) +20dB

A figura 3.12 representa uma possível abertura angular dos feixes ultrassônicos descrito ao longo deste item. A demonstração dos cálculos e discussões sobre as aberturas angulares serão abordados no capítulo 4, Resultados e Discussão, no sub-item 4.2.

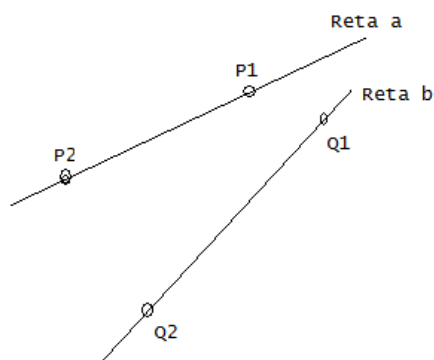


Figura 3.12 – Retas representativas da abertura angular dos feixes sônicos.

Onde:

P1 é a coordenada 1 da Reta a

P2 é a coordenada 2 da Reta a

Q1 é a coordenada 1 da Reta b

Q2 é a coordenada 2 da Reta b

3.6 MATERIAL DO ENSAIO

No presente trabalho foi confeccionado um corpo de prova utilizando um duto de especificação API 5L Grau X70, com diâmetro externo de 10 polegadas ou 254 milímetros, espessura de parede 19,05 com comprimento de aproximadamente 2000 milímetros. O ângulo do bisel do duto é de 35°.

Nessa solda do corpo de prova foram inseridos defeitos artificialmente por metodologia própria após a deposição da solda na raiz do duto. Os defeitos foram somente representando a falta de fusão (FF). As soldas, utilizadas no trabalho, foram realizadas utilizando dois processos diferentes: TIG na raiz e enchimento com eletrodo revestido.

Os defeitos foram dispostos a cada 45° aproximadamente na metade da altura do chanfro ao longo do perímetro do duto. A figura 3.13, chamada de mapa de defeitos apresenta as posições angulares dos defeitos. A posição angular 0° será sempre chamada ao longo de todo o presente trabalho de P.0°, a posição angular 45° será chamada ao longo de todo presente trabalho de P.45° e assim sucessivamente.

Na figura 3.14 podemos ver o defeito inserido artificialmente no chanfro da solda. E a figura 3.15 é duto completamente soldado, ou seja, soldado com TIG na raiz e preenchido com eletrodo revestido.

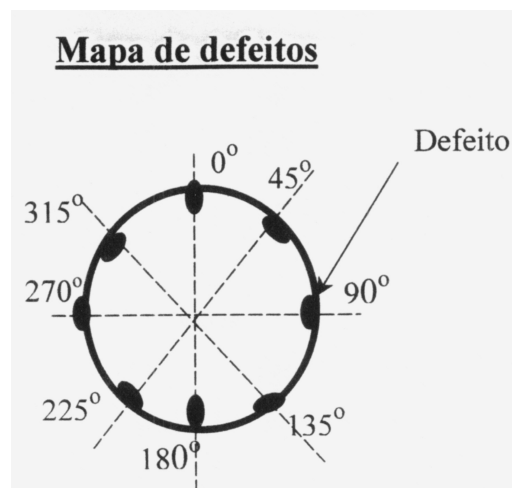


Figura 3.13 – Mapa de defeitos (posição angular)

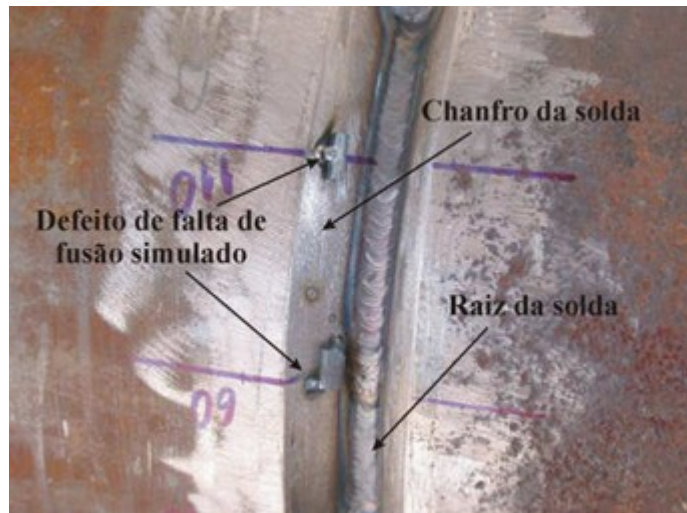


Figura 3.14 – Defeitos inseridos artificialmente no chanfro da solda.



Figura 3.15 – Duto soldado com TIG na raiz e preenchido com eletrodo revestido.

3.7 EQUIPAMENTO PARA REALIZAÇÃO DO ENSAIO

Inicialmente para determinação do feixe sônico dos diferentes transdutores obviamente foram utilizados os mesmos transdutores angulares, porém inicialmente foi usado aparelho de ultra-som da marca Panametrics-NDT, modelo Epoch IV Plus como já descrito no item 3.2, no entanto o equipamento citado não é capaz de salvar os dados no formato “csv” para posteriormente ser manipulado no computador, então houve a necessidade de

mudar o equipamento, após a determinação de cada abertura dos feixes sônicos, para que desta feita os sinais possam ser devidamente compilados pelo software.

O equipamento utilizado no presente trabalho foi um aparelho de Ultra-som em que uma saída era conectada ao fio do transdutor e a outra saída era conectada ao osciloscópio da Tektronix - MSO4034 350MHz, 4 Channel Digital Phosphor Oscilloscope.

No osciloscópio foi conectado um *pendrive* no qual era possível através de um comando interno do mesmo salvar os sinais no formato “*csv*”.

Na figura 3.16 podemos ver o aparelho de ultra-som conectado por um cabo ao osciloscópio e outro cabo ao transdutor.



Figura 3.16 – Equipamentos utilizados no ensaio, ao lado esquerdo o aparelho de Ultra-som e do lado esquerdo o Osciloscópio.

Depois de salvar os pontos que irão compor o sinal no *pendrive*, o mesmo foi retirado do osciloscópio e todos os pontos dos sinais foram salvos no *HD* (Hard Disc) do computador para que possam ser compilados com o intuito de serem analisados individualmente e comparados posteriormente.

3.8 O ENSAIO

O ensaio do presente trabalho foi realizado no laboratório de Ensaios não Destrutivos, LABOEND, do professor João Marcos Alcoforado Rebelo durante o mês de maio. No mês de junho foi realizado no laboratório de Ensaios não Destrutivos, Corrosão e Soldagem, LNDC.

O LABOEND, Coppe/UFRJ, se localiza no Centro de Tecnologia, bloco I, sala 243 Cidade Universitária, Ilha do Fundão, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. Durante todo o mês de maio a equipe do LABOEND sempre esteve à disposição para auxiliar e contribuir ao longo de toda parte experimental do presente trabalho. Vale ressaltar a significativa importância dos engenheiros Pablo Uchoa Bartolo, Rômulo Moreira de Almeida e Maria Cristina Lopez Areiza durante a execução do meu presente trabalho.

No segundo mês de elaboração prática do presente trabalho houve uma fusão dos laboratórios de Corrosão com o laboratório de Ensaios não Destrutivos. Surgiu então o LNDC situado na Cidade Universitária, motivo pelo qual todo aparato do presente trabalho foi transferido para este e onde ocorreu a continuação da parte prática do presente trabalho até a conclusão da parte prática do mesmo.

A técnica utilizada no ensaio de Ultra-som foi a técnica de meio pulso, ou seja, a onda ultra-sônica incide na parte inferior do duto e volta na superfície do chanfro. Para a realização deste ensaio foi confeccionado um corpo de prova com as características descritas no primeiro parágrafo do item **3.6**. Foram inseridos defeitos ao longo da circunferência da solda no duto conforme apresentado no segundo parágrafo do item **3.6**. Todos os defeitos foram inspecionados ao longo da mesma solda circunferencial.

Foi realizada uma varredura com o transdutor na direção longitudinal do duto, ou seja, na direção do comprimento do duto, deslocando o transdutor com um passo manual de 1 mm por 1 mm da posição P1 até a posição P3 como indicado na figura 3.17.

O sinal foi aquisitado e salvo após cada passo dado. O transdutor foi colocado na superfície do tudo de tal maneira que o feixe sônico incidia na raiz da solda, posição P1, passando no meio do chanfro onde se encontra o defeito, posição P2, até alcançar o final do chanfro, posição P3.

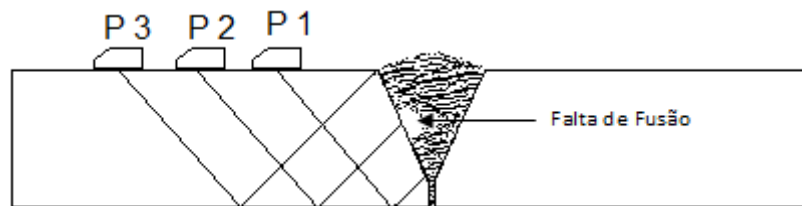


Figura 3.17. Varredura de milímetro a milímetro ao longo do chanfro, passando pelo defeito de Falta de Fusão.

3.9 PROCESSAMENTO DOS SINAIS COM MATLAB

MATLAB é um "software" interativo de alto desempenho voltado para o cálculo numérico. O MATLAB integra análise numérica, cálculo com matrizes, processamento de sinais e construção de gráficos em ambiente fácil de usar onde problemas e soluções são expressos somente como eles são escritos matematicamente, ao contrário da programação tradicional. [34]

O MATLAB é um sistema interativo cujo elemento básico de informação é uma matriz que não requer dimensionamento. Esse sistema permite a resolução de muitos problemas numéricos em apenas uma fração do tempo que se gastaria para escrever um programa semelhante em linguagem Fortran, Basic ou C.

Foi utilizado o MATLAB para poder processar os sinais e apresentá-los na forma de gráficos que serão abordados no Capítulo 4 do presente trabalho.

Conforme abordado no item 3.7 o sinal foi adquirido e salvo, no *pendrive*, após cada passo manual de aproximadamente 1mm dado. A extensão do arquivo deve ser "csv" para poder copiar os dados dos sinais do osciloscópio para o computador.

Alguns osciloscópios ou equipamentos ultra-sônicos não possuem o recurso de salvar os dados dos sinais utilizando um aparato, p.ex.: *pendrive*, conectado numa saída USB do próprio equipamento. Felizmente o equipamento utilizado tinha esse recurso e foi utilizado a fim de aumentar o rendimento do trabalho.

Essa etapa do presente trabalho também foi realizada com bastante atenção para que os dados salvos no *pendrive* não se perdessem ou fossem renomeados de maneira equivocada na transferência para o computador.

4 CAPÍTULO 4: RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Esse capítulo tem por finalidade apresentar os resultados do ensaio de ultra-som.

Serão apresentadas as aberturas do feixe sônico como também as respostas que são obtidas pelo osciloscópio para cada ângulo do transdutor especificado podendo ser de 45°, 60° ou 70°

Também será feito uma discussão para elucidar os resultados obtidos no presente trabalho e será apresentado um *guideline* para se seguir no presente trabalho.

4.2 ABERTURA DOS FEIXES DOS TRANSDUTORES

Utilizando as expressões geometrias podemos calcular a abertura dos feixes para cada configuração de ângulo do transdutor com a frequência do mesmo. As figuras 4.1 até 4.6 mostram as aberturas dos feixes de cada transdutor que foram traçadas adotando os procedimentos descritos no item 3.5.

O cálculo para determinação das aberturas angulares dos feixes pode ser feito usando o conceito da álgebra descritiva.

Pode-se determinar o ângulo entre duas retas adotando as etapas abaixo a partir da equação 2 até equação 5, ver figura 3.12. Onde Θ é a abertura angular dos feixes de cada transdutor que possuem diferentes frequências e ângulos.

$$\cos \theta = \frac{v1 \times v2}{|v1| \times |v2|} \quad \text{Equação 2}$$

$$\theta = \arccos \frac{v1 \times v2}{|v1| \times |v2|} \quad \text{Equação 3}$$

Onde: $v1$ é vetor da Reta a

$v2$ é vetor da Reta b

$$v1 = P2 - P1$$

$$v2 = Q2 - Q1$$

P2; P1 e Q2; Q1 são os pontos da Reta a e Reta b (ver figura 3.12), respectivamente, que são retirados das Tabelas 2 e 3, para o transdutor de 2 e 4MHz respectivamente, que indica (em mm) a distância focal e a altura de cada furo em relação à superfície inferior do bloco. Essas medidas simplesmente foram lidas do equipamento ultra-sônico e registradas nas Tabelas 2 e 3.

O procedimento para determinação da abertura angular de cada transdutor é o mesmo, sendo assim, só será demonstrado o cálculo para abertura do transdutor de 45° de 2MHz. Os demais ângulos de abertura para os outros transdutores simplesmente serão apontados sem demonstração de cálculos tendo em vista que as etapas a serem seguidas são as mesmas.

$$v1 = (27,41 ; 179) - (17,01 ; 187)$$

$$v1 = (10,4 ; -8)$$

$$v2 = (17,35 ; 179) - (9,81 ; 187)$$

$$v2 = (7,54 ; -8)$$

Substituindo v1 e v2 na equação 2 temos a nova equação 4:

$$\cos \theta = \frac{78,41 + 64}{\sqrt{10,4^2 + (-8)^2} \times \sqrt{7,54^2 + (-8)^2}} \quad \text{Equação 4}$$

$$\cos \theta = \frac{142,41}{144,24} = 0,9873$$

$$\theta = \arccos(0,9873)$$

$$\theta \approx 9^\circ$$

Essa é a abertura angular dos feixes para o transdutor de 2MHz de 45°.

- Abertura angular para o transdutor de 2MHz de 60°.

$$\cos \theta = \frac{257,59 + 64}{\sqrt{25,23^2 + (-8)^2} \times \sqrt{10,21^2 + (-8)^2}}$$

$$\theta = \arccos(0,9367) \quad \theta \approx 20^\circ$$

- Abertura angular para o transdutor de 2MHz de 70°.

$$\cos \theta = \frac{435,936 + 64}{\sqrt{30,4^2 + (-8)^2} \times \sqrt{14,34^2 + (-8)^2}}$$

$$\theta = \arccos(0,9685) \quad \theta \approx 14^\circ$$

Vale ressaltar que a área na qual os feixes da onda do transdutor de 70° varre é maior que as áreas dos transdutores de 45 e 60° mesmo apresentando um ângulo menor. Esse fato fica bem evidenciado na figura 4.3 devido à abertura do feixe logo na saída do transdutor. Essa maior abertura gera uma dissipação maior do feixe. Evidencia que será comprovado ao longo deste capítulo de resultados.

Adotando o mesmo procedimento dos transdutores de 2MHz é possível calcular a abertura angular do feixe sônico dos transdutores de 4MHz.

- Abertura angular para o transdutor de 4MHz de 45°.

$$\cos \theta = \frac{71,85 + 64}{\sqrt{7,94^2 + (-8)^2} \times \sqrt{9,05^2 + (-8)^2}}$$

$$\theta = \arccos(0,9978) \quad \theta \approx 5^\circ$$

- Abertura angular para o transdutor de 4MHz de 60°.

$$\cos \theta = \frac{232,21 + 64}{\sqrt{19,16^2 + (-8)^2} \times \sqrt{12,12^2 + (-8)^2}}$$

$$\theta = \arccos(0,9824) \quad \theta \approx 15^\circ$$

- Abertura angular para o transdutor de 2MHz de 70°.

$$\cos \theta = \frac{595,94 + 64}{\sqrt{30,39^2 + (-8)^2} \times \sqrt{19,61^2 + (-8)^2}}$$

$$\theta = \arccos(0,9915) \quad \theta \approx 10^\circ$$

Vale ressaltar que a área na qual os feixes da onda do transdutor de 70° varre é maior que as áreas dos transdutores de 45 e 60° mesmo apresentando um ângulo menor. Esse fato fica bem evidenciado na Figura 4.6 devido à abertura do feixe logo na saída do transdutor. Essa maior abertura gera uma dissipação maior do feixe. Evidencia que será comprovado ao longo deste capítulo de resultados.

Tabela 2 – Distância focal para os transdutores de 2MHz

		Transdutor		Ângulo = 45° Frequência = 2Mhz							
h1(mm)	13	187	h2(mm)	21	179	h3(mm)	32	168	h4(mm)	42	158
df 20(mm)	9,81		df 20(mm)	17,35		df 20(mm)	26,91		df 20(mm)	35,81	
df 6(mm)	11,37		df 6(mm)	18,86		df 6(mm)	28,75		df 6(mm)	38,45	
dm(mm)	13,18		dm(mm)	20,66		dm(mm)	31,63		dm(mm)	41,71	
dt 6(mm)	14,8		dt 6(mm)	23,61		dt 6(mm)	36,97		dt 6(mm)	47,25	
dt 20(mm)	17,01		dt 20(mm)	27,41		dt 20(mm)	41,62		dt 20(mm)	52,86	
		Transdutor		Ângulo = 60° Frequência = 2Mhz							
h1(mm)	13	187	h2(mm)	21	179	h3(mm)	32	168	h4(mm)	42	158
df 20(mm)	15,22		df 20(mm)	25,43		df 20(mm)	41,38		df 20(mm)	54,68	
df 6(mm)	18,84		df 6(mm)	30,86		df 6(mm)	47,38		df 6(mm)	62,78	
dm(mm)	24,5		dm(mm)	37,21		dm(mm)	55,43		dm(mm)	75,08	
dt 6(mm)	31,17		dt 6(mm)	48,77		dt 6(mm)	68,28		dt 6(mm)	88,74	
dt 20(mm)	40,91		dt 20(mm)	66,14		dt 20(mm)	78,94		dt 20(mm)	106,01	
		Transdutor		Ângulo = 70° Frequência = 2Mhz							
h1(mm)	13	187	h2(mm)	21	179	h3(mm)	32	168	h4(mm)	42	158
df 20(mm)	19,87		df 20(mm)	34,21		df 20(mm)	53,2		df 20(mm)	73,82	
df 6(mm)	26,23		df 6(mm)	42,69		df 6(mm)	68,5		df 6(mm)	86,06	
dm(mm)	34,53		dm(mm)	55,8		dm(mm)	91,83		dm(mm)	103,23	
dt 6(mm)	46,52		dt 6(mm)	74		dt 6(mm)	110,51		dt 6(mm)	121,62	
dt 20(mm)	69,51		dt 20(mm)	99,91		dt 20(mm)	135,45		dt 20(mm)	145,07	

Os valores das alturas mencionadas na Tabela 2 acima, h1, h2, h3 e h4 são inseridos nas figuras 4.1 até 4.6 para poder determinar a aberturas dos feixes sônicos.

Tabela 3 – Distância focal para os transdutores de 4MHz

Transdutor												Ângulo = 45°			Frequência = 4Mhz		
h1(mm)	13	187	h2(mm)	21	179	h3(mm)	32	168	h4(mm)	42	158						
df 20(mm)	10,53		df 20(mm)	19,58		df 20(mm)	29,5		df 20(mm)	39,07							
df 6(mm)	12,19		df 6(mm)	20,73		df 6(mm)	31,32		df 6(mm)	40,51							
dm(mm)	13,58		dm(mm)	21,78		dm(mm)	32,56		dm(mm)	42,6							
dt 6(mm)	14,46		dt 6(mm)	22,82		dt 6(mm)	34,74		dt 6(mm)	45,61							
dt 20(mm)	15,53		dt 20(mm)	23,47		dt 20(mm)	36,39		dt 20(mm)	47,74							
Transdutor												Ângulo = 60°			Frequência = 4Mhz		
h1(mm)	13	187	h2(mm)	21	179	h3(mm)	32	168	h4(mm)	42	158						
df 20(mm)	18,48		df 20(mm)	30,6		df 20(mm)	49,97		df 20(mm)	66,71							
df 6(mm)	21,07		df 6(mm)	34,7		df 6(mm)	55,17		df 6(mm)	71,28							
dm(mm)	24,45		dm(mm)	39,38		dm(mm)	59,64		dm(mm)	83,28							
dt 6(mm)	27,64		dt 6(mm)	44,52		dt 6(mm)	67,15		dt 6(mm)	89,4							
dt 20(mm)	31,2		dt 20(mm)	50,36		dt 20(mm)	76,04		dt 20(mm)	103,72							
Transdutor												Ângulo = 70°			Frequência = 4Mhz		
h1(mm)	13	187	h2(mm)	21	179	h3(mm)	32	168	h4(mm)	42	158						
df 20(mm)	23,88		df 20(mm)	43,49		df 20(mm)	62,82		df 20(mm)	86,7							
df 6(mm)	30,57		df 6(mm)	49,02		df 6(mm)	76,8		df 6(mm)	97,46							
dm(mm)	38,69		dm(mm)	61,66		dm(mm)	84,77		dm(mm)	111,67							
dt 6(mm)	48,07		dt 6(mm)	81,39		dt 6(mm)	99,95		dt 6(mm)	128,45							
dt 20(mm)	64,98		dt 20(mm)	95,37		dt 20(mm)	116,78		dt 20(mm)	145,26							

Os valores das alturas mencionadas na Tabela 3, h1, h2, h3 e h4 são inseridos nas figuras 4.1 até 4.6 para determinar a aberturas dos feixes sônicos.

4.2.1 ABERTURA DOS FEIXES DO TRANSDUTOR DE 45°; 2MHZ

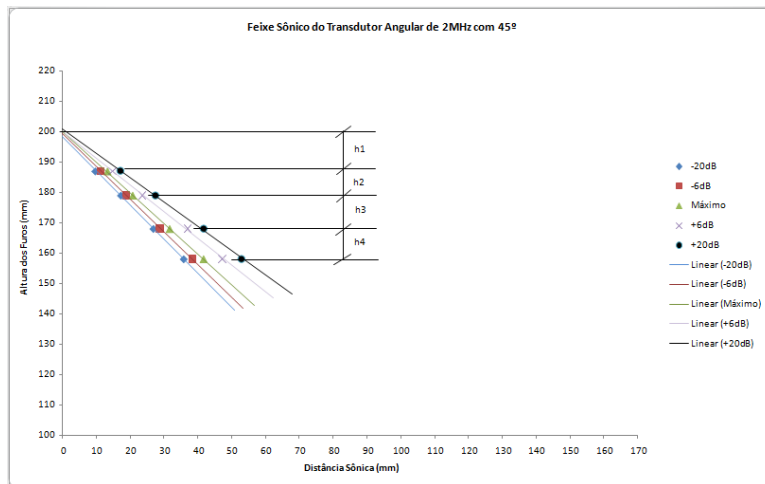


Figura 4.1 – Abertura dos feixes do transdutor de 45°

4.2.2 ABERTURA DOS FEIXES DO TRANSDUTOR DE 60°; 2MHZ

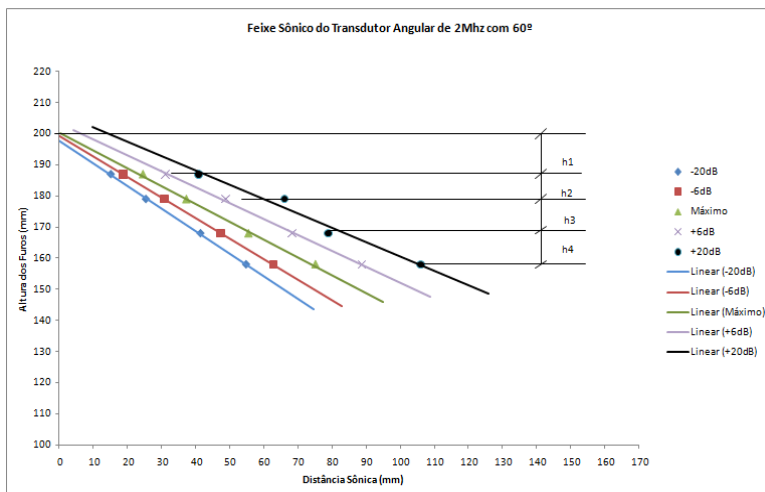


Figura 4.2 – Abertura dos feixes do transdutor de 60°

4.2.3 ABERTURA DOS FEIXES DO TRANSDUTOR DE 70°; 2MHZ

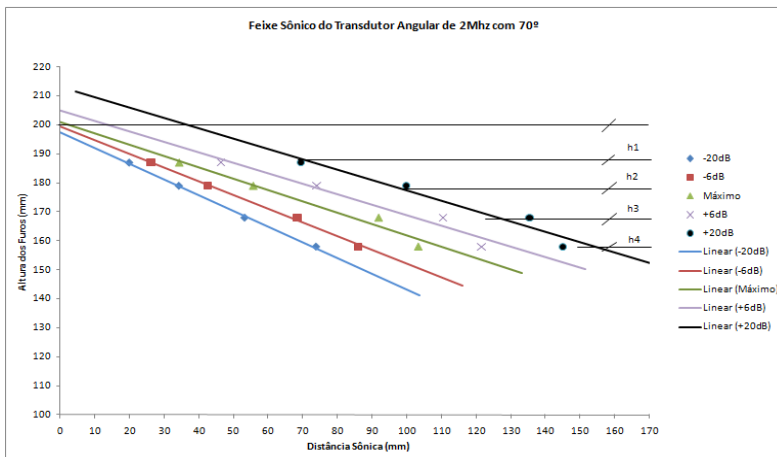


Figura 4.3 – Abertura dos feixes do transdutor de 70°

4.2.4 ABERTURA DOS FEIXES DO TRANSDUTOR DE 45°; 4MHZ

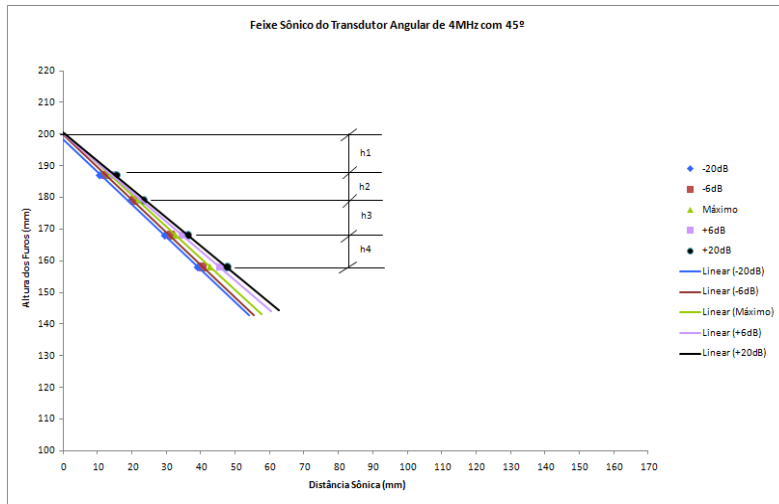


Figura 4.4 – Abertura dos feixes do transdutor de 45°

4.2.5 ABERTURA DOS FEIXES DO TRANSDUTOR DE 60°; 4MHZ

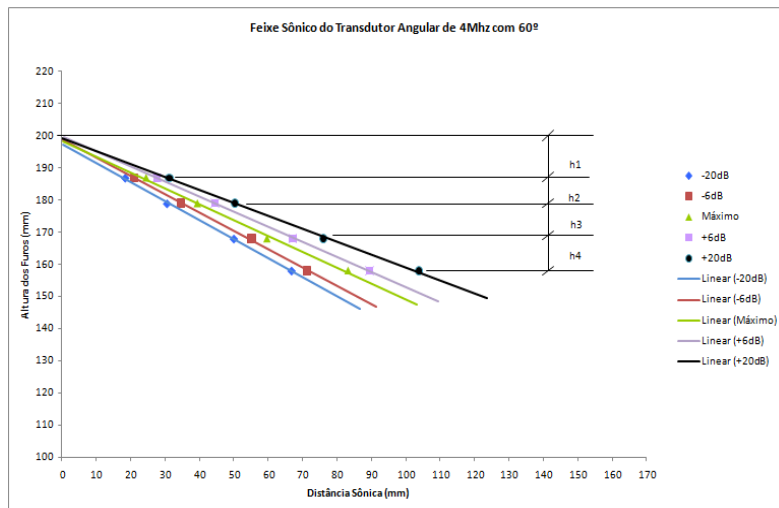


Figura 4.5 – Abertura dos feixes do transdutor de 60°

4.2.6 ABERTURA DOS FEIXES DO TRANSDUTOR DE 70°; 4MHZ

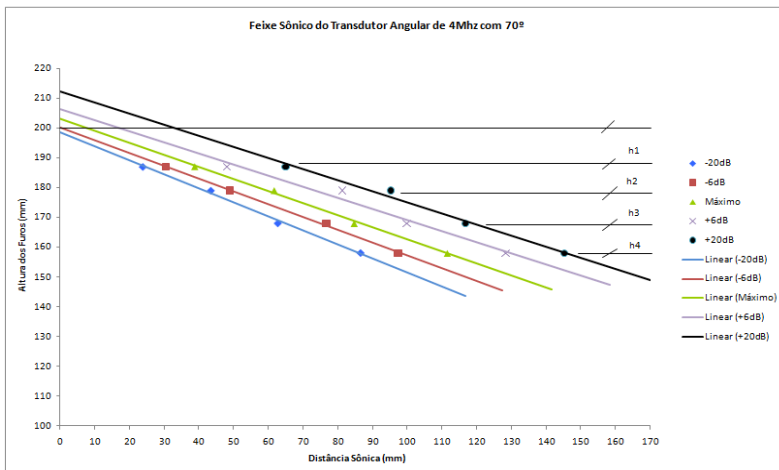


Figura 4.6 – Abertura dos feixes do transdutor de 70°

Após ter determinado as aberturas angulares dos feixes sônicos, vide item 4.2, viabilizando o prosseguimento do presente trabalho, foi realizada a inspeção seguindo as etapas descritas no item 3.8. Todos os sinais adquiridos serão apresentados no item 4.3 deste.

4.3 SINAIS DOS TRANSDUTORES DE 2MHZ

Com o intuito de corroborar com os resultados do presente trabalho os sinais foram processados utilizando o programa MATLAB, descrito no item 3.9, e são apresentados nos próximos sub-itens da seguinte maneira: Os resultados da posição 0° serão apresentados nos sub-itens 4.3.1; 4.3.2 e 4.3.3 dos transdutores de 45, 60 e 70° respectivamente.

Os resultados da posição 45° serão apresentados nos sub-itens 4.3.4; 4.3.5 e 4.3.6 dos transdutores de 45, 60 e 70° respectivamente.

Os resultados da posição 90° serão apresentados nos sub-itens 4.3.7; 4.3.8 e 4.3.9 dos transdutores de 45, 60 e 70° respectivamente.

Os resultados da posição 135° serão apresentados nos sub-itens 4.3.10; 4.3.11 e 4.3.12 dos transdutores de 45, 60 e 70° respectivamente.

Os resultados da posição 180° serão apresentados nos sub-itens 4.3.13; 4.3.14 e 4.3.15 dos transdutores de 45, 60 e 70° respectivamente.

Os resultados da posição 225° serão apresentados nos sub-itens 4.3.16; 4.3.17 e 4.3.18 dos transdutores de 45, 60 e 70° respectivamente.

Os resultados da posição 270° serão apresentados nos sub-itens 4.3.19; 4.3.20 e 4.3.21 dos transdutores de 45, 60 e 70° respectivamente.

Os resultados da posição 315° serão apresentados nos sub-itens 4.3.22; 4.3.23 e 4.3.24 dos transdutores de 45, 60 e 70° respectivamente.

4.3.1 POSIÇÃO 0° TRANSDUTOR DE 45°

Varição da amplitude, figura 4.7, ao longo da varredura feita com o transdutor de 45° com um passo manual de aproximadamente 1mm x 1mm.

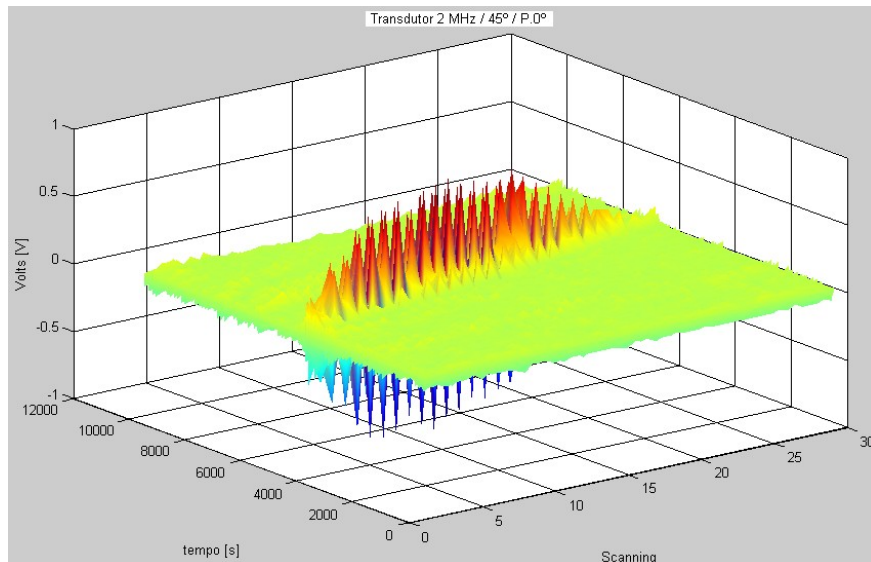


Figura 4.7 - Gráfico da variação da amplitude ao longo da varredura.

Conseqüentemente ao realizar a varredura no sentido longitudinal do duto foi realizado o dimensionamento da altura do defeito, com o transdutor de 45°, como mostrado na figura 4.8 abaixo.

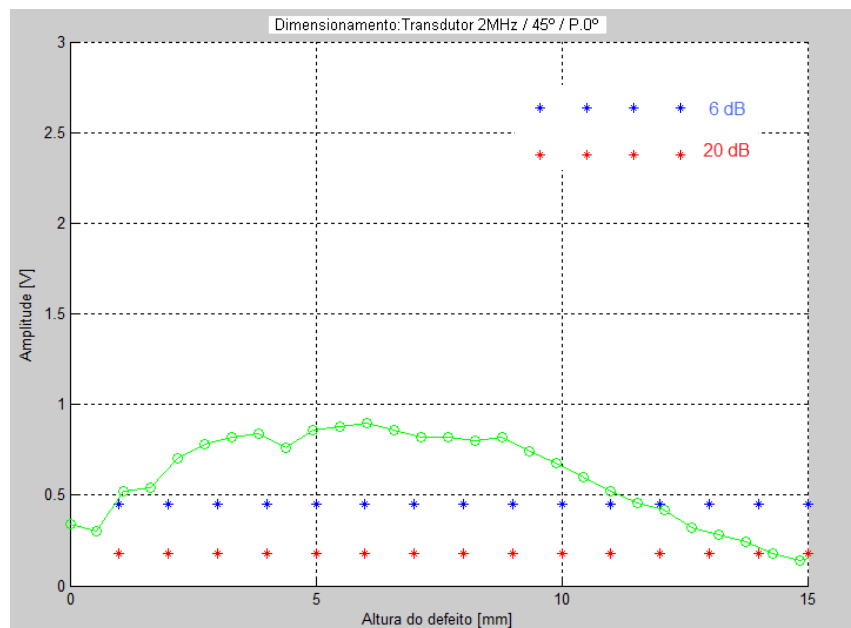


Figura 4.8 - Gráfico do dimensionamento da altura do defeito.

4.3.2 POSIÇÃO 0° TRANSDUTOR DE 60°

Varição da amplitude, figura 4.9, ao longo da varredura feita com o transdutor de 60° com um passo manual de aproximadamente 1mm x 1mm.

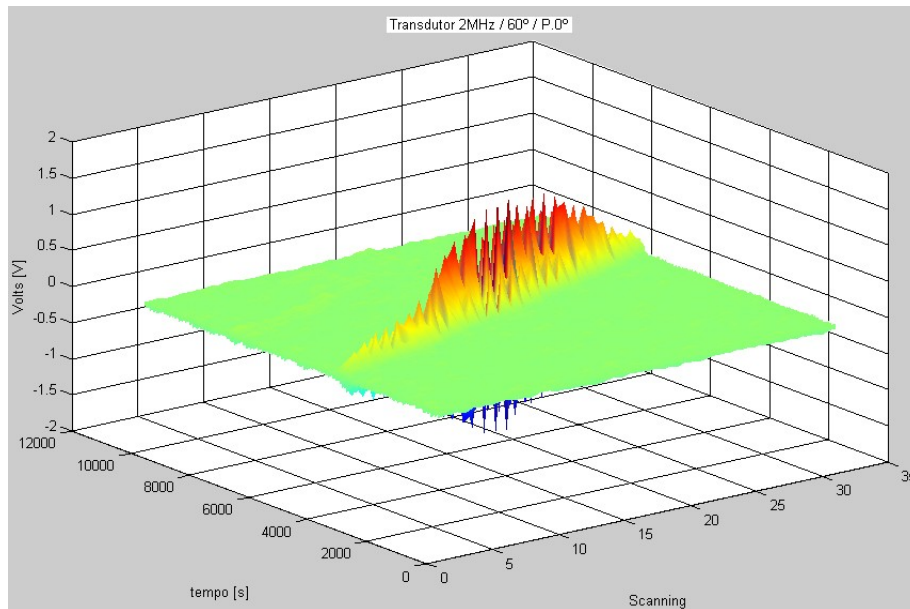


Figura 4.9 - Gráfico da variação da amplitude ao longo da varredura.

Conseqüentemente ao realizar a varredura no sentido longitudinal do duto foi realizado o dimensionamento da altura do defeito, com o transdutor de 60°, como mostrado na figura 4.10 abaixo.

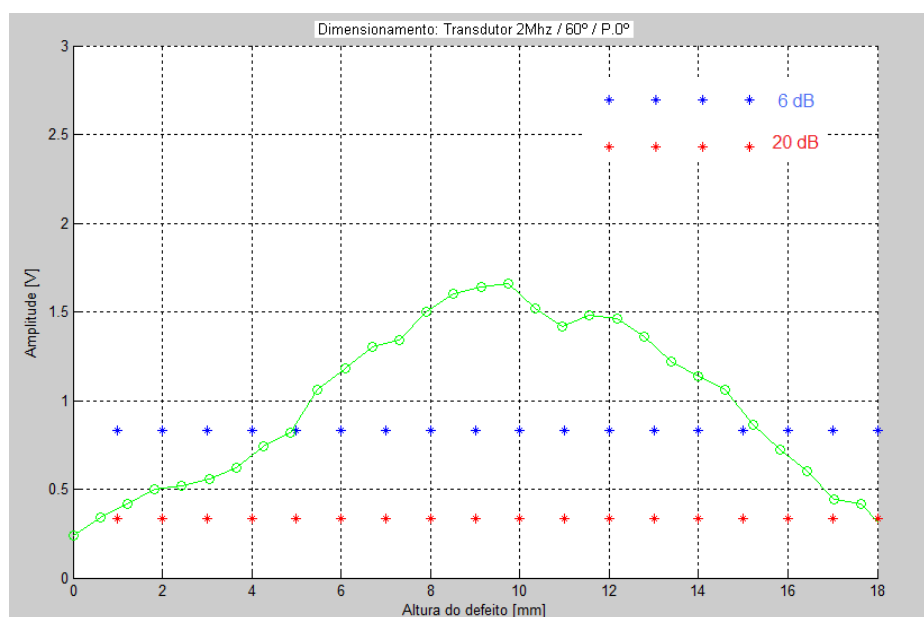


Figura 4.10 - Gráfico do dimensionamento da altura do defeito.

4.3.3 POSIÇÃO 0° TRANSDUTOR DE 70°

Variação da amplitude, figura 4.11, ao longo da varredura feita com o transdutor de 70° com um passo manual de aproximadamente 1mm x 1mm.

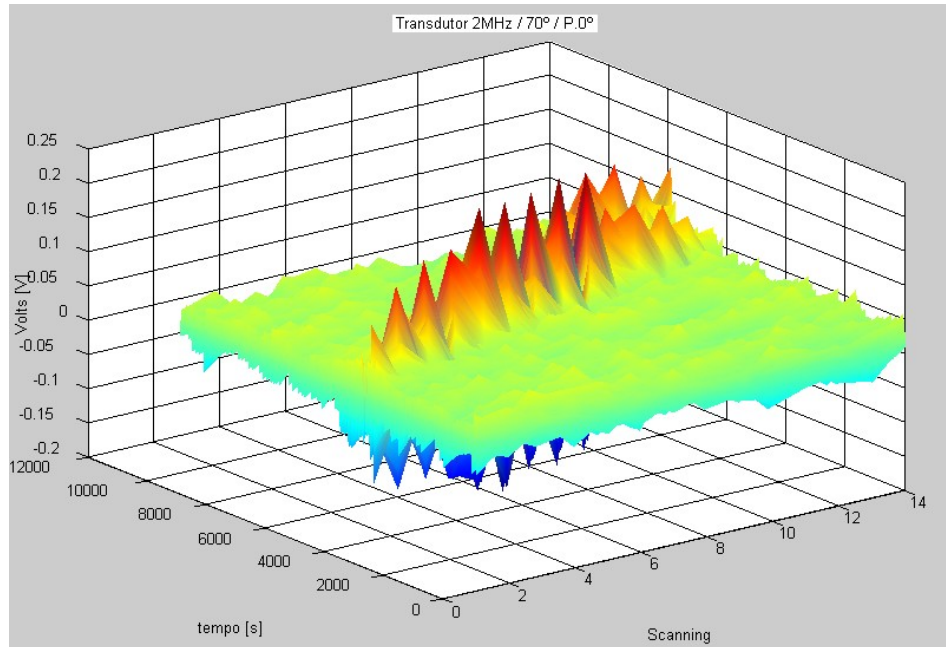


Figura 4.11 - Gráfico da variação da amplitude ao longo da varredura.

Conseqüentemente ao realizar a varredura no sentido longitudinal do duto foi realizado o dimensionamento da altura do defeito, com o transdutor de 70°, como mostrado na figura 4.12 abaixo.

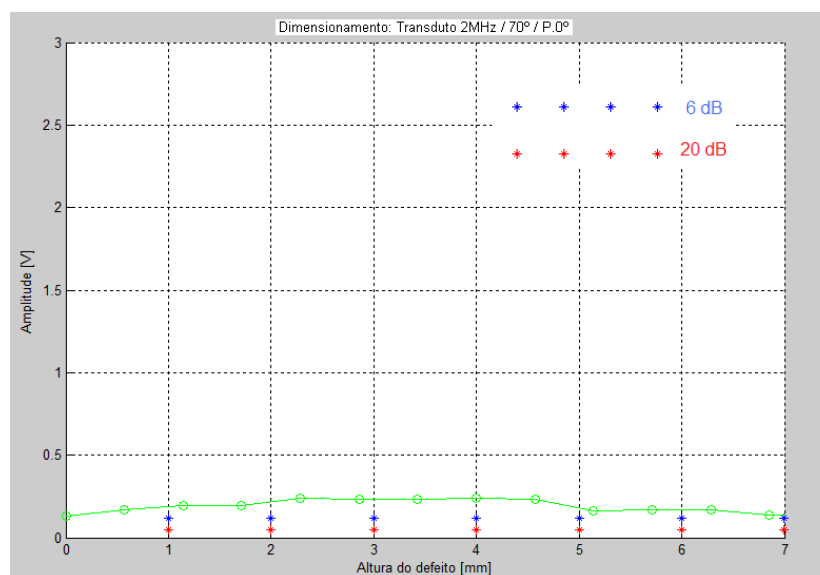


Figura 4.12 - Gráfico do dimensionamento da altura do defeito.

4.3.4 POSIÇÃO 45° TRANSDUTOR DE 45°

Variação da amplitude, figura 4.13, ao longo da varredura feita com o transdutor de 45° com um passo manual de aproximadamente 1mm x 1mm.

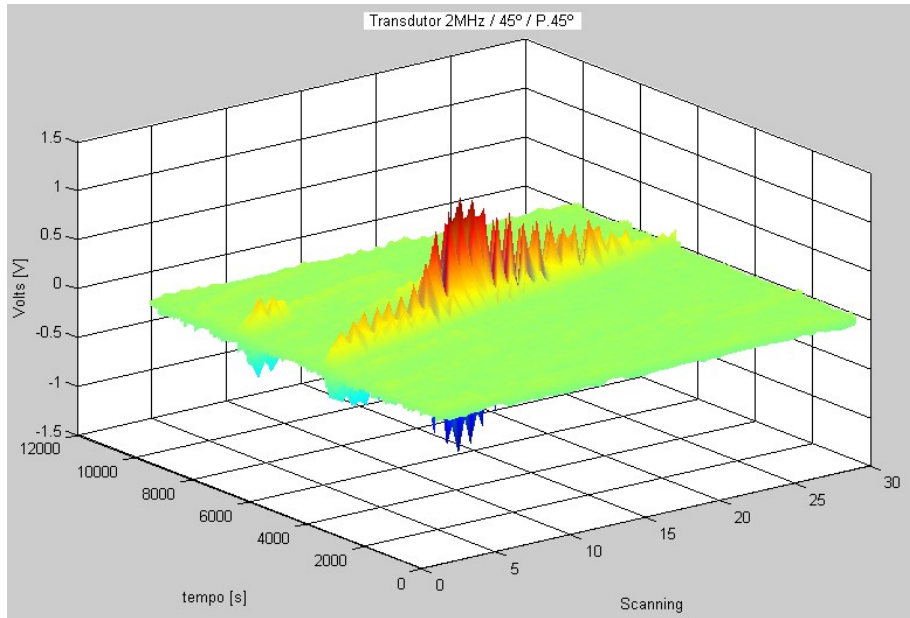


Figura 4.13 - Gráfico da variação da amplitude ao longo da varredura.

Conseqüentemente ao realizar a varredura no sentido longitudinal do duto foi realizado o dimensionamento da altura do defeito, com o transdutor de 45°, como mostrado na figura 4.14 abaixo.

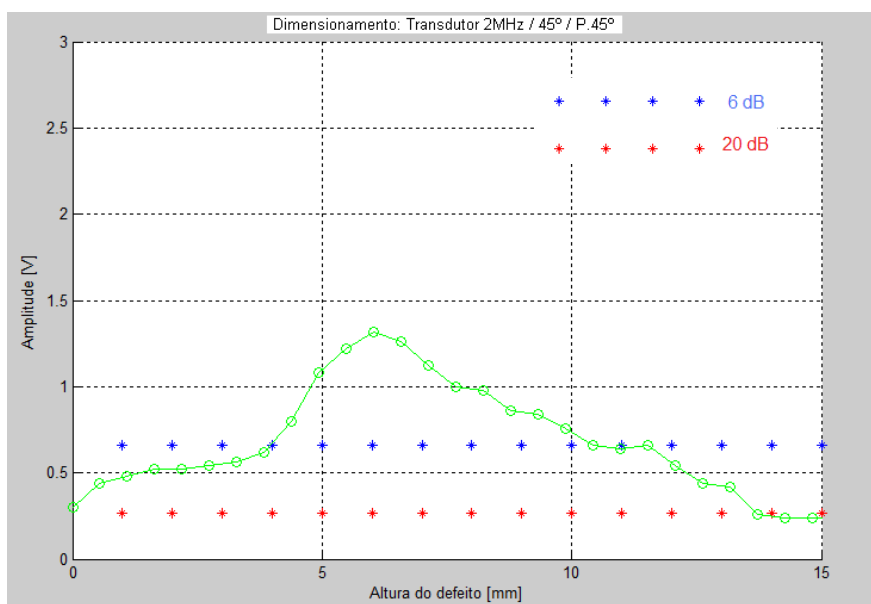


Figura 4.14 - Gráfico do dimensionamento da altura do defeito.

4.3.5 POSIÇÃO 45° TRANSDUTOR 60°

Varição da amplitude, figura 4.15, ao longo da varredura feita com o transdutor de 60° com um passo manual de aproximadamente 1mm x 1mm.

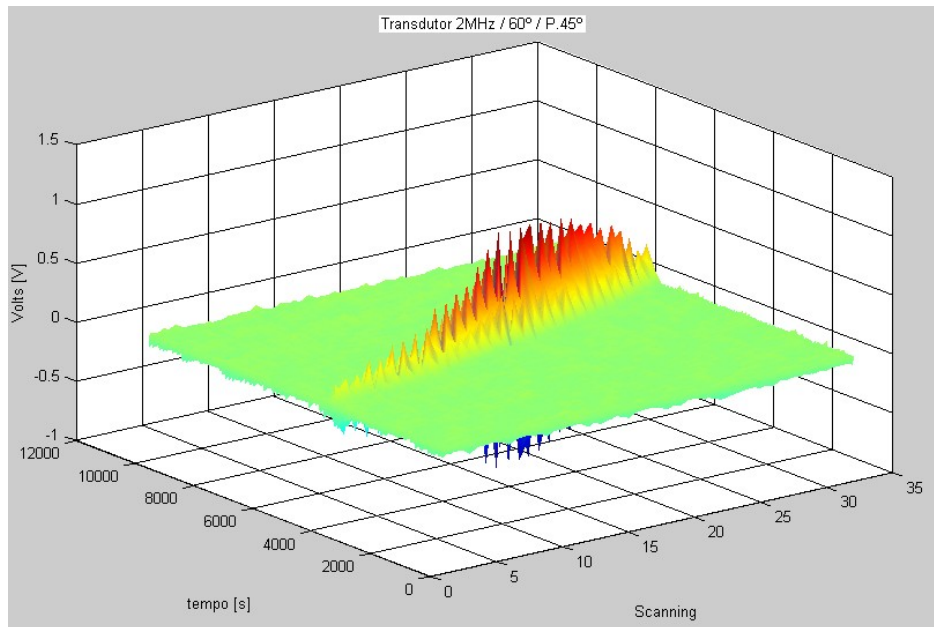


Figura 4.15 - Gráfico da variação da amplitude ao longo da varredura.

Conseqüentemente ao realizar a varredura no sentido longitudinal do duto foi realizado o dimensionamento da altura do defeito, com o transdutor de 60°, como mostrado na figura 4.16 abaixo.

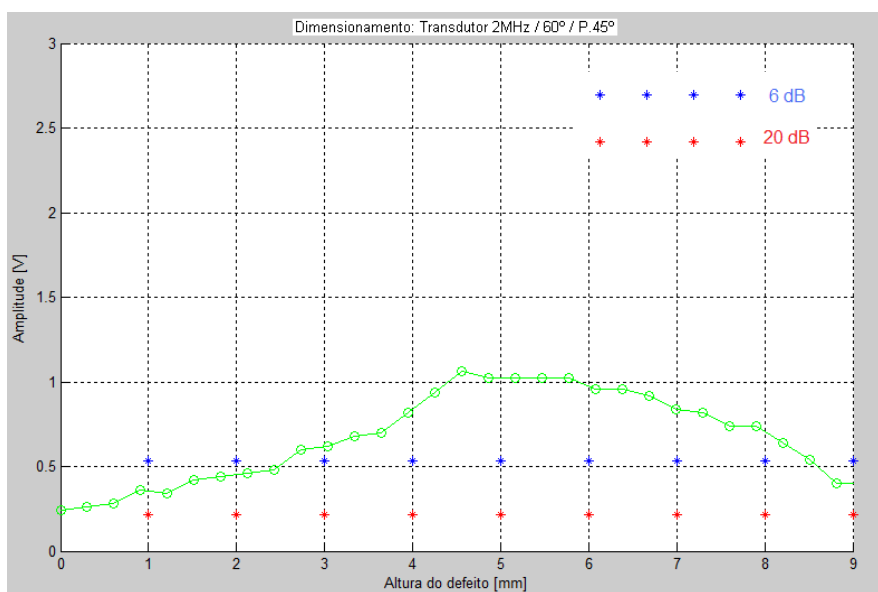


Figura 4.16 - Gráfico do dimensionamento da altura do defeito.

4.3.6 POSIÇÃO 45° TRANSDUTOR 70°

Variação da amplitude, figura 4.17, ao longo da varredura feita com o transdutor de 70° com um passo manual de aproximadamente 1mm x 1mm.

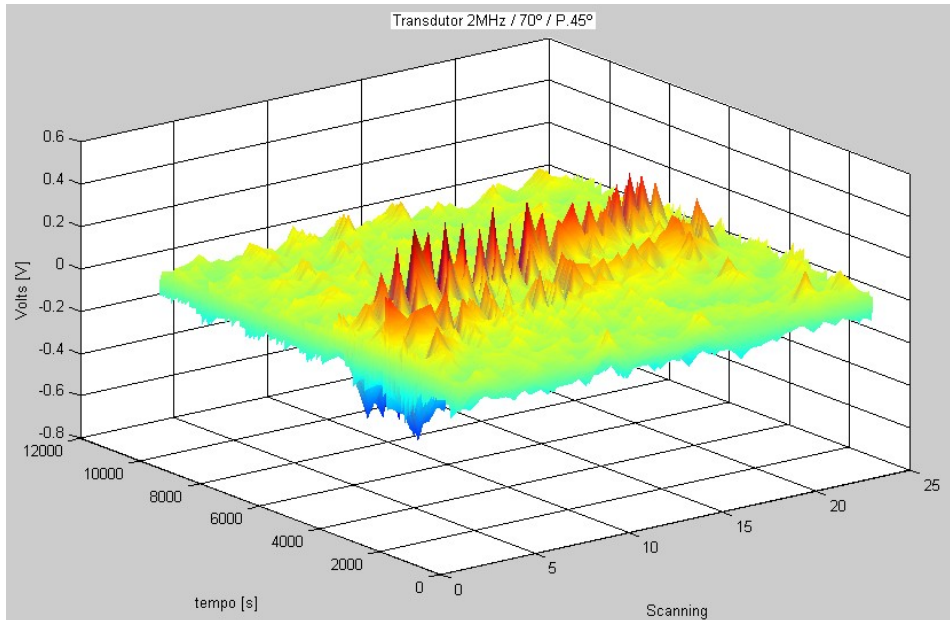


Figura 4.17 - Gráfico da variação da amplitude ao longo da varredura.

Conseqüentemente ao realizar a varredura no sentido longitudinal do duto foi realizado o dimensionamento da altura do defeito, com o transdutor de 70°, como mostrado na figura 4.18 abaixo.

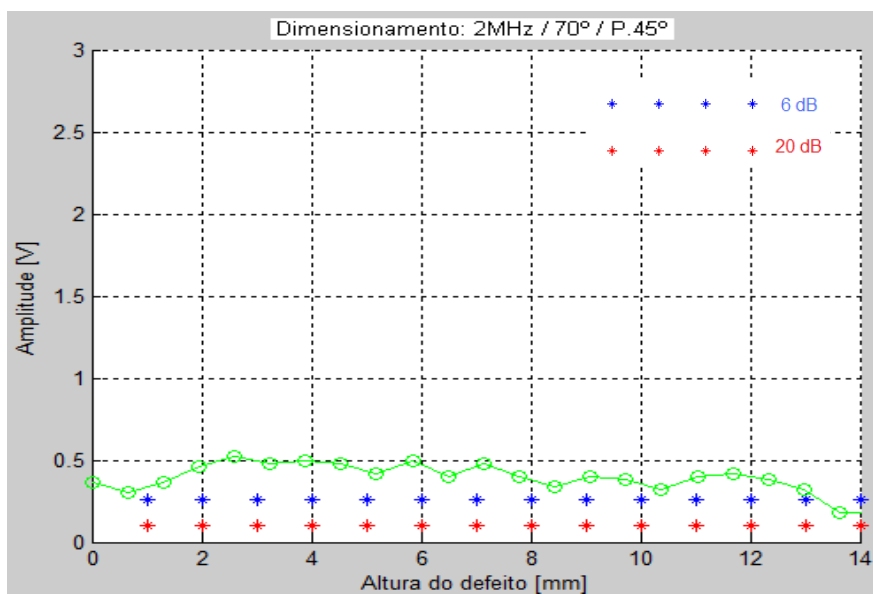


Figura 4.18 - Gráfico do dimensionamento da altura do defeito.

4.3.7 POSIÇÃO 90° TRANSDUTOR DE 45°

Varição da amplitude, figura 4.19, ao longo da varredura feita com o transdutor de 45° com um passo manual de aproximadamente 1mm x 1mm.

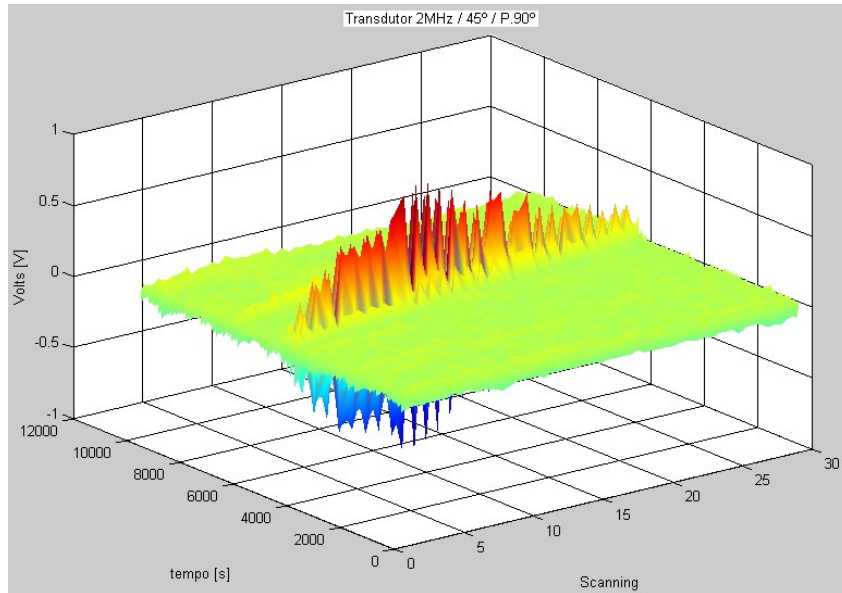


Figura 4.19 - Gráfico da variação da amplitude ao longo da varredura.

Conseqüentemente ao realizar a varredura no sentido longitudinal do duto foi realizado o dimensionamento da altura do defeito, com o transdutor de 45°, como mostrado na figura 4.20 abaixo.

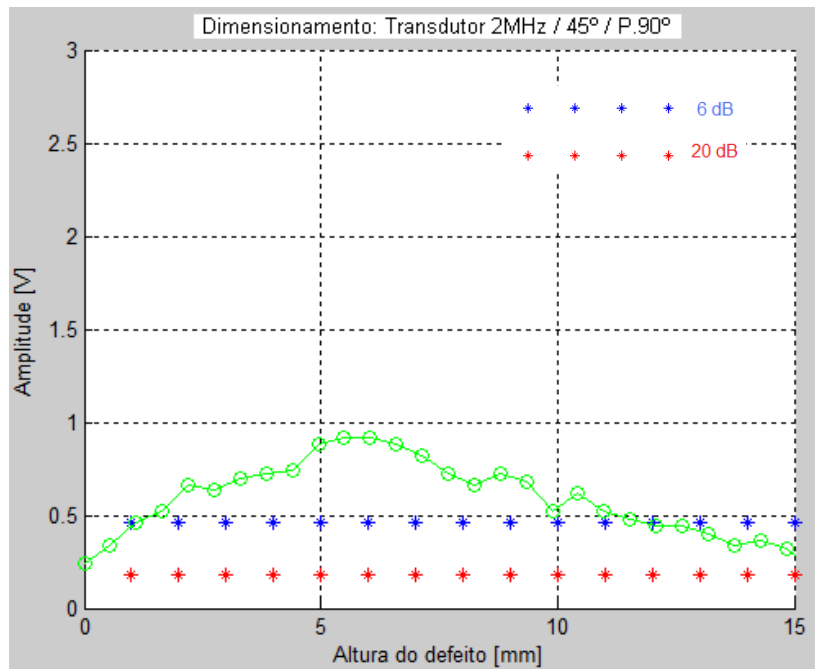


Figura 4.20 - Gráfico do dimensionamento da altura do defeito.

4.3.8 POSIÇÃO 90° TRANSDUTOR 60°

Varição da amplitude, figura 4.21, ao longo da varredura feita com o transdutor de 60° com um passo manual de aproximadamente 1mm x 1mm.

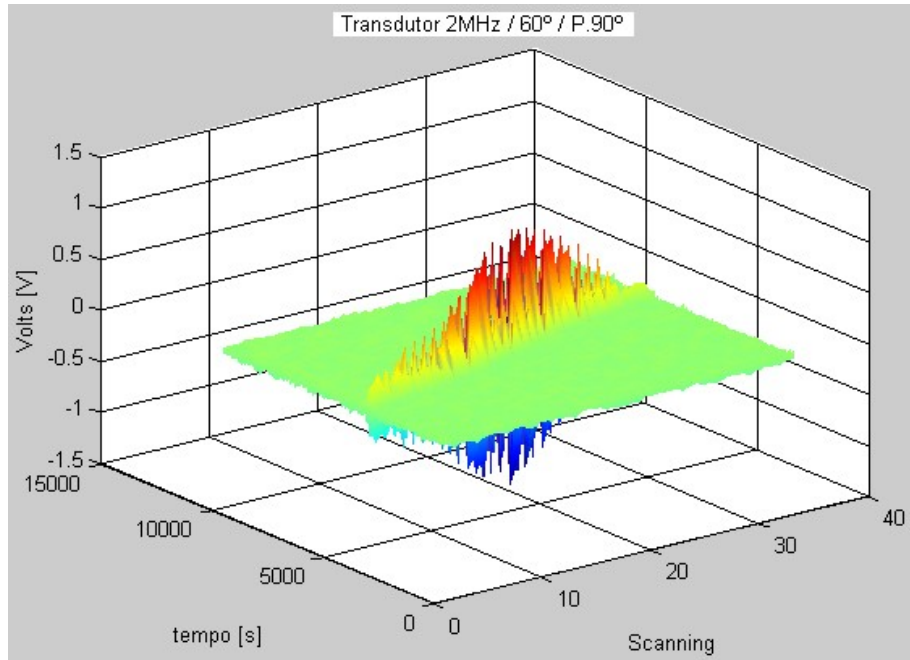


Figura 4.21 - Gráfico da variação da amplitude ao longo da varredura.

Conseqüentemente ao realizar a varredura no sentido longitudinal do duto foi realizado o dimensionamento da altura do defeito, com o transdutor de 60°, como mostrado na figura 4.23 abaixo.

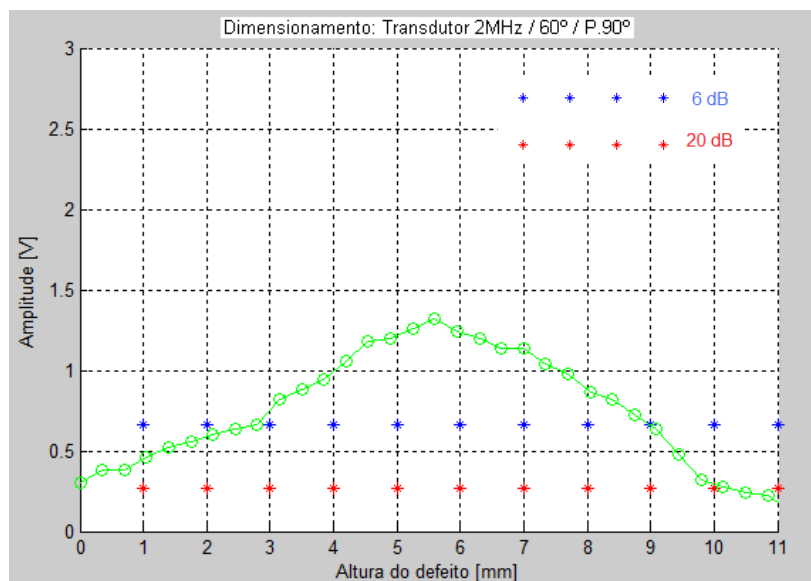


Figura 4.22 - Gráfico do dimensionamento da altura do defeito.

4.3.9 POSIÇÃO 90° TRANSDUTOR 70°

Varição da amplitude, figura 2.23, ao longo da varredura feita com o transdutor de 70° com um passo manual de aproximadamente 1mm x 1mm.

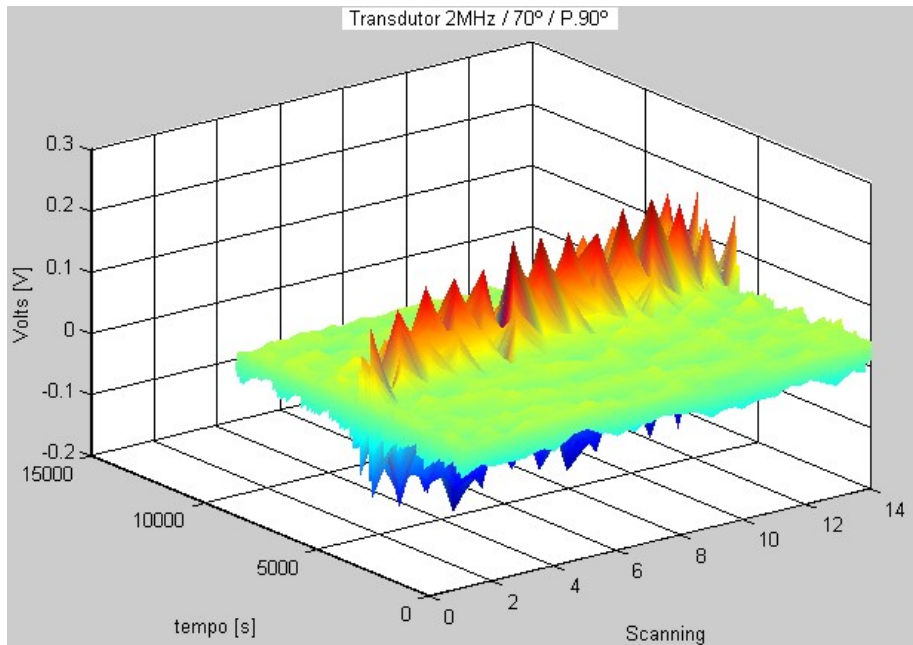


Figura 4.23 - Gráfico da variação da amplitude ao longo da varredura.

Conseqüentemente ao realizar a varredura no sentido longitudinal do duto foi realizado o dimensionamento da altura do defeito, com o transdutor de 70°, como mostrado na figura 4.24 abaixo.

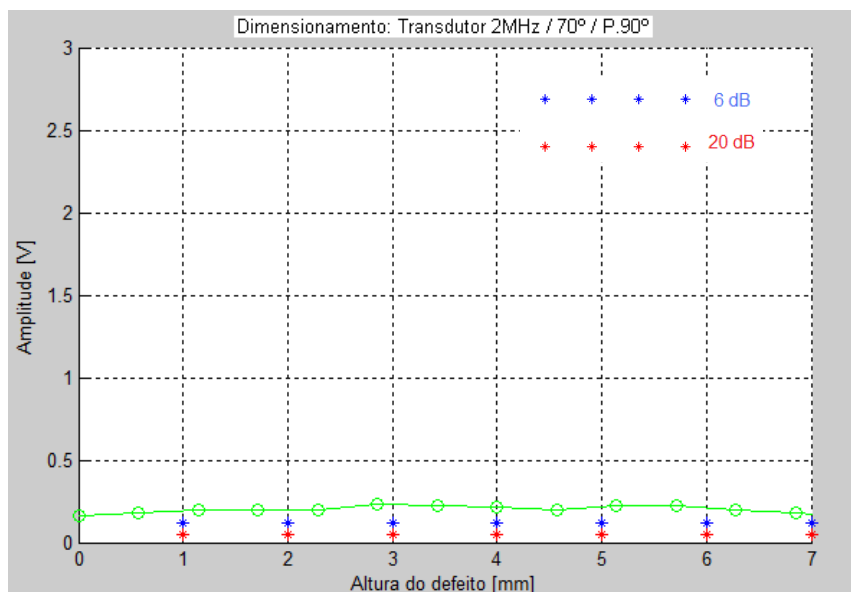


Figura 4.24 - Gráfico do dimensionamento da altura do defeito.

4.3.10 POSIÇÃO 135° TRANSDUTOR DE 45°

Variação da amplitude, figura 4.25, ao longo da varredura feita com o transdutor de 45° com um passo manual de aproximadamente 1mm x 1mm.

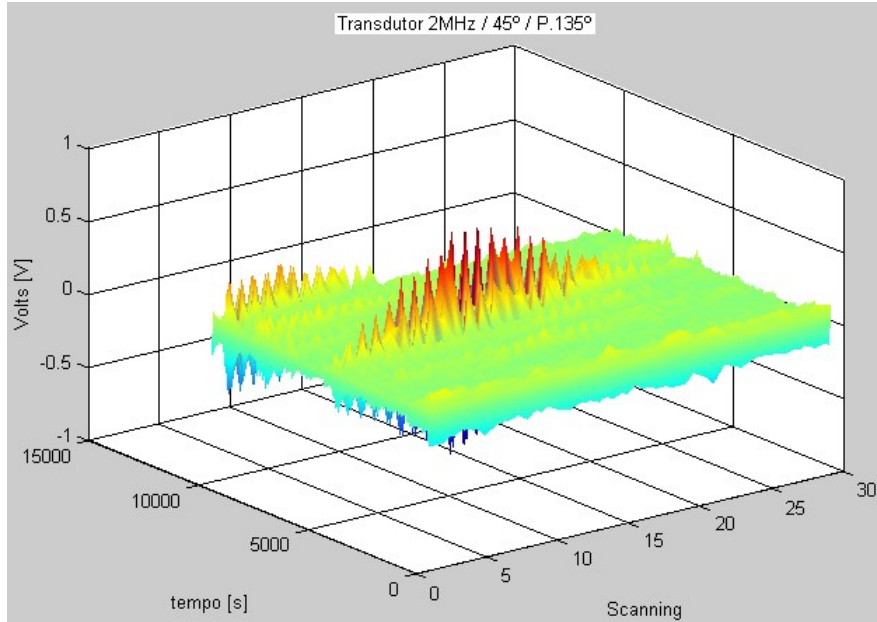


Figura 4.25 - Gráfico da variação da amplitude ao longo da varredura.

Conseqüentemente ao realizar a varredura no sentido longitudinal do duto foi realizado o dimensionamento da altura do defeito, com o transdutor de 45°, como mostrado na figura 4.26 abaixo.

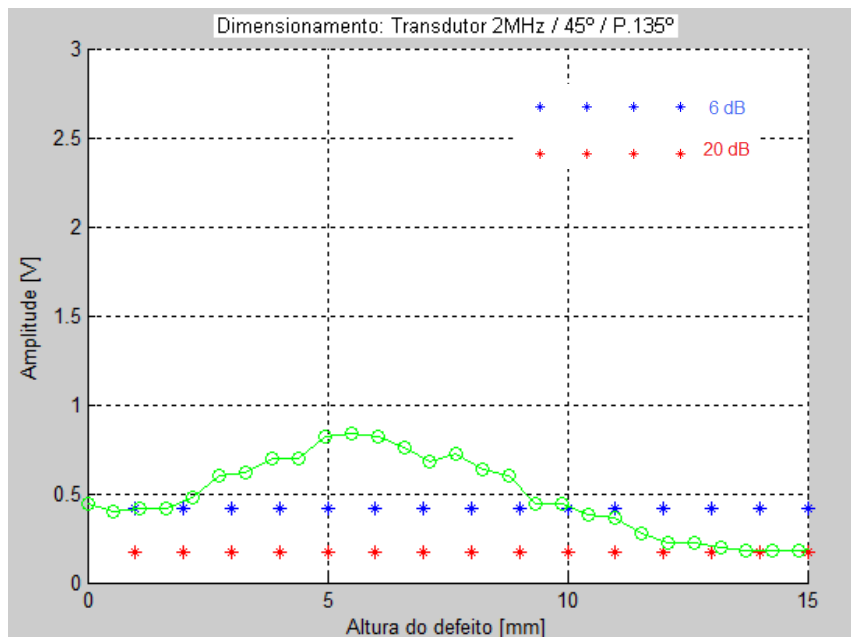


Figura 4.26 - Gráfico do dimensionamento da altura do defeito.

4.3.11 POSIÇÃO 135° TRANSDUTOR 60°

Varição da amplitude, figura 4.27, ao longo da varredura feita com o transdutor de 60° com um passo manual de aproximadamente 1mm x 1mm.

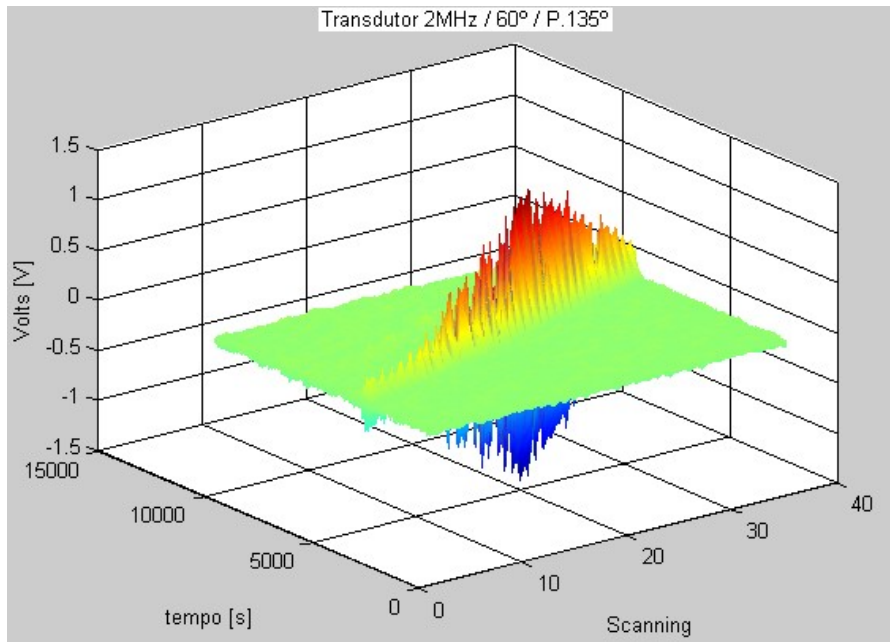


Figura 4.27 - Gráfico da variação amplitude ao longo da varredura.

Conseqüentemente ao realizar a varredura no sentido longitudinal do duto foi realizado o dimensionamento da altura do defeito, com o transdutor de 60°, como mostrado na figura 4.28 abaixo.

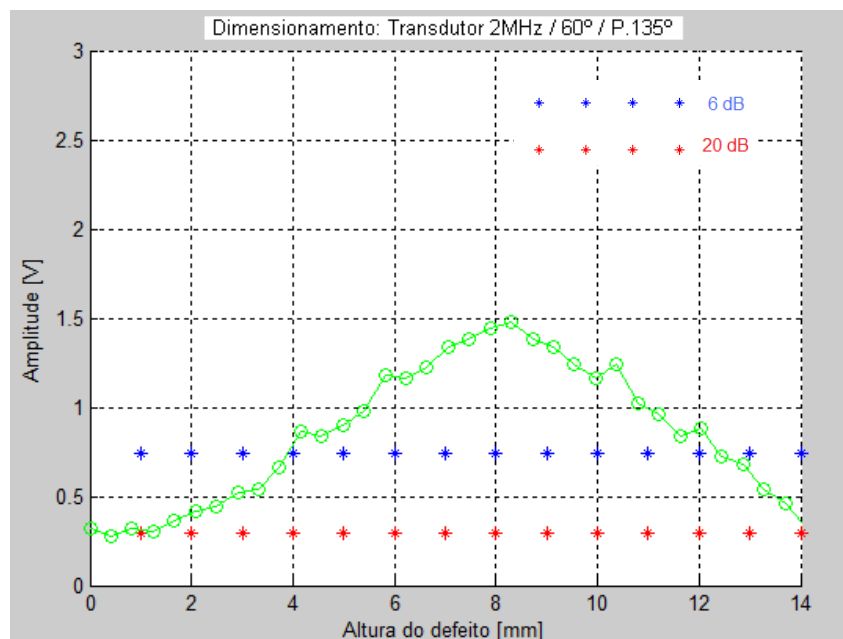


Figura 4.28 - Gráfico do dimensionamento da altura do defeito.

4.3.12 POSIÇÃO 135° TRANSDUTOR 70°

Varição da amplitude, figura 4.29, ao longo da varredura feita com o transdutor de 70° com um passo manual de aproximadamente 1mm x 1mm.

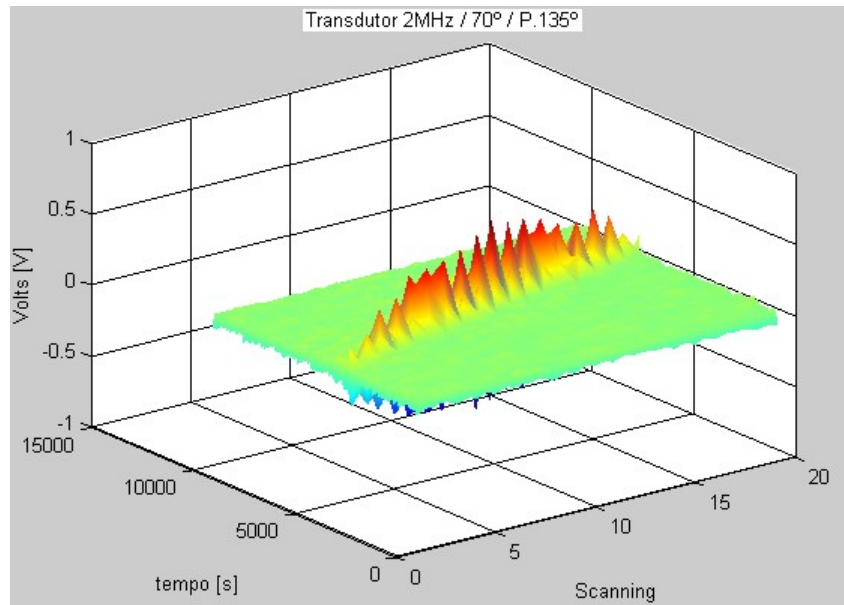


Figura 4.29 - Gráfico da variação da amplitude ao longo da varredura.

Conseqüentemente ao realizar a varredura no sentido longitudinal do duto foi realizado o dimensionamento da altura do defeito, com o transdutor de 70°, como mostrado na figura 4.30 abaixo.

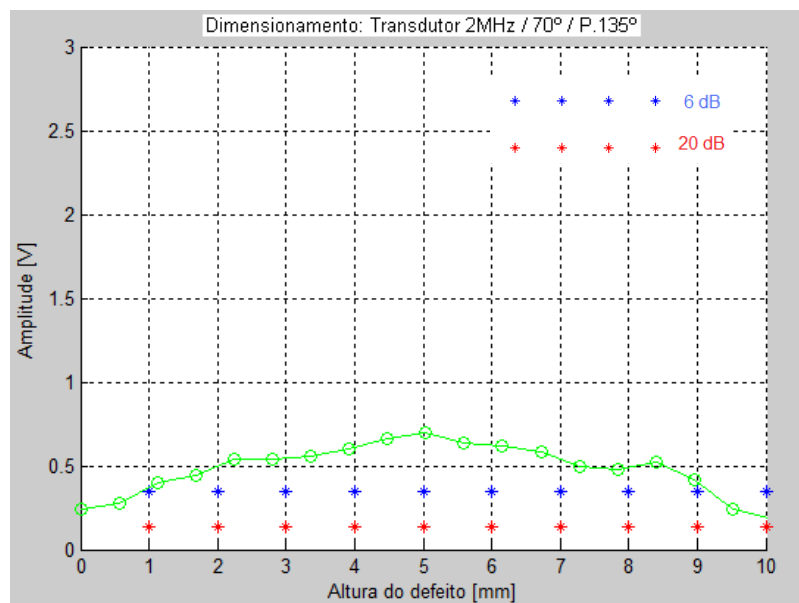


Figura 4.30 - Gráfico do dimensionamento da altura do defeito.

4.3.13 POSIÇÃO 180° TRANSDUTOR DE 45°

Varição da amplitude, figura 4.31, ao longo da varredura feita com o transdutor de 45° com um passo manual de aproximadamente 1mm x 1mm.

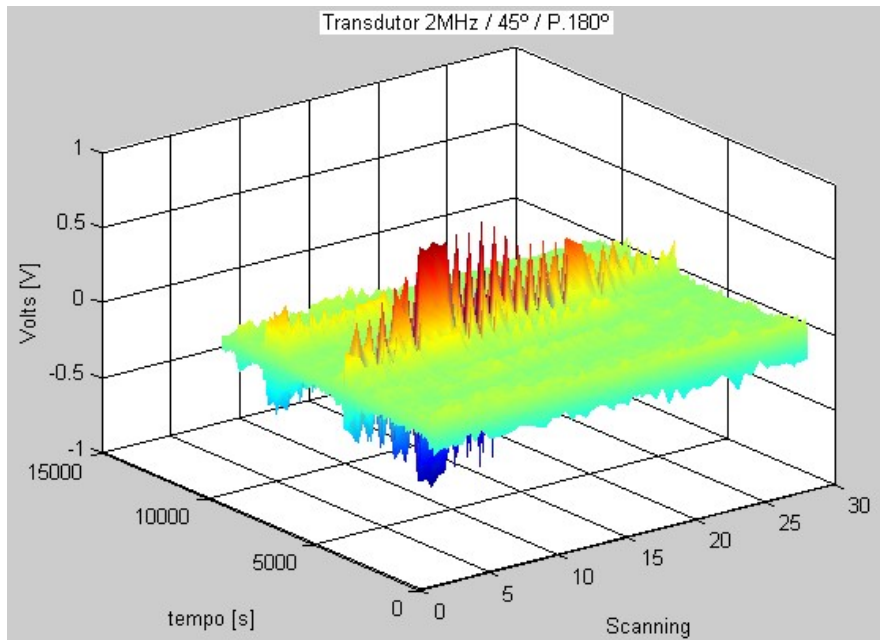


Figura 4.31 - Gráfico da variação da amplitude ao longo da varredura.

Conseqüentemente ao realizar a varredura no sentido longitudinal do duto foi realizado o dimensionamento da altura do defeito, com o transdutor de 45°, como mostrado na figura 4.32 abaixo.

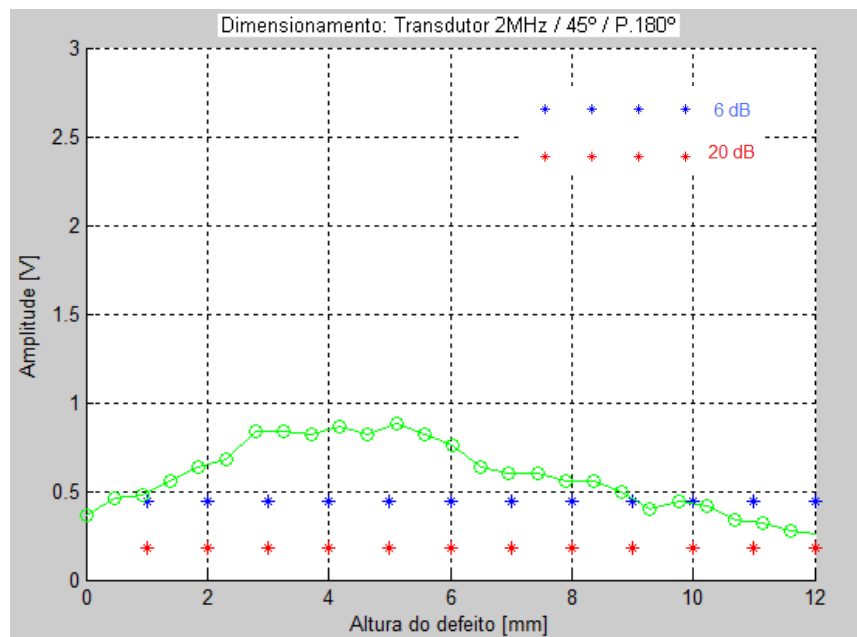


Figura 4.32 - Gráfico do dimensionamento da altura do defeito.

4.3.14 POSIÇÃO 180° TRANSDUTOR 60°

Varição da amplitude, figura 4.33, ao longo da varredura feita com o transdutor de 60° com um passo manual de aproximadamente 1mm x 1mm.

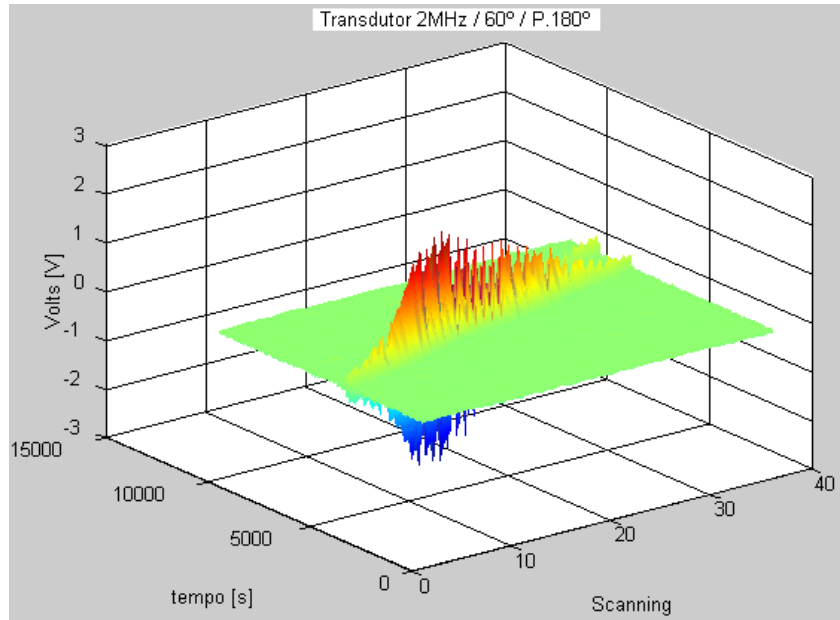


Figura 4.33 - Gráfico da variação da amplitude ao longo da varredura.

Conseqüentemente ao realizar a varredura no sentido longitudinal do duto foi realizado o dimensionamento da altura do defeito, com o transdutor de 60°, como mostrado na figura 4.34 abaixo.

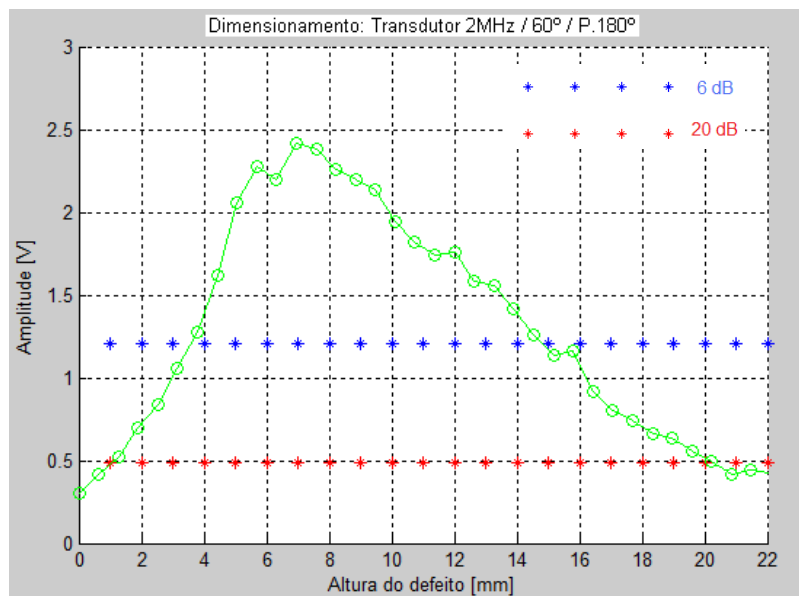


Figura 4.34 - Gráfico do dimensionamento da altura do defeito.

4.3.15 POSIÇÃO 180° TRANSDUTOR 70°

Varição da amplitude, figura 4.35, ao longo da varredura feita com o transdutor de 70° com um passo manual de aproximadamente 1mm x 1mm.

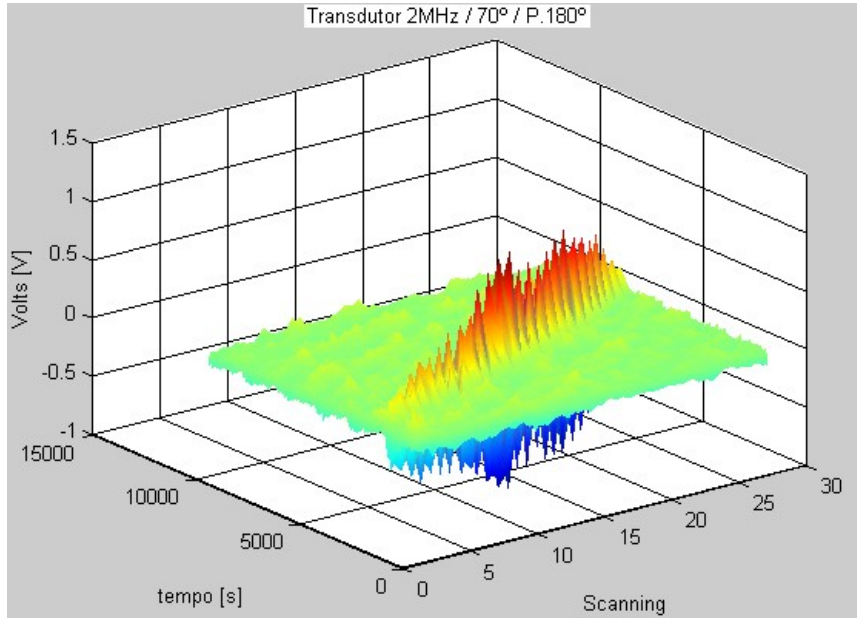


Figura 4.35 - Gráfico da variação da amplitude ao longo da varredura.

Conseqüentemente ao realizar a varredura no sentido longitudinal do duto foi realizado o dimensionamento da altura do defeito, com o transdutor de 70°, como mostrado na figura 4.36 abaixo.

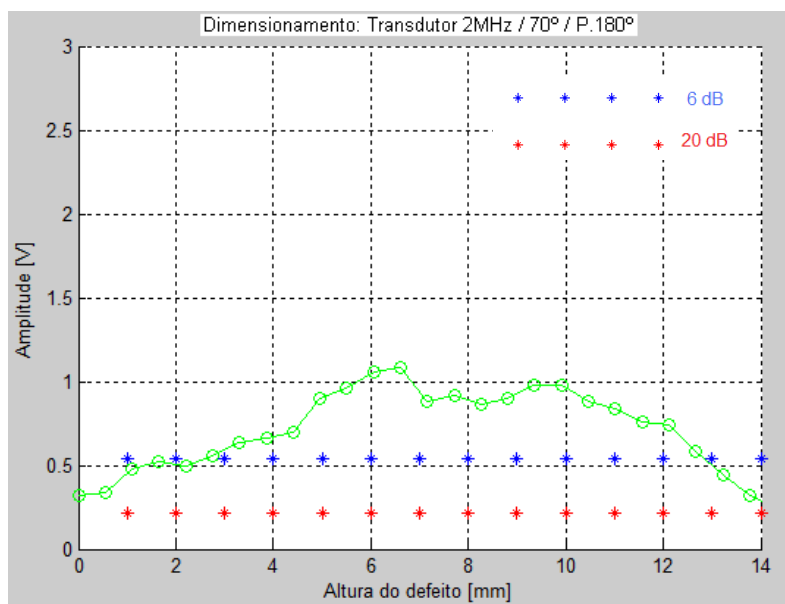


Figura 4.36 - Gráfico do dimensionamento da altura do defeito.

4.3.16 POSIÇÃO 225° TRANSDUTOR DE 45°

Varição da amplitude, figura 4.37, ao longo da varredura feita com o transdutor de 45° com um passo manual de aproximadamente 1mm x 1mm.

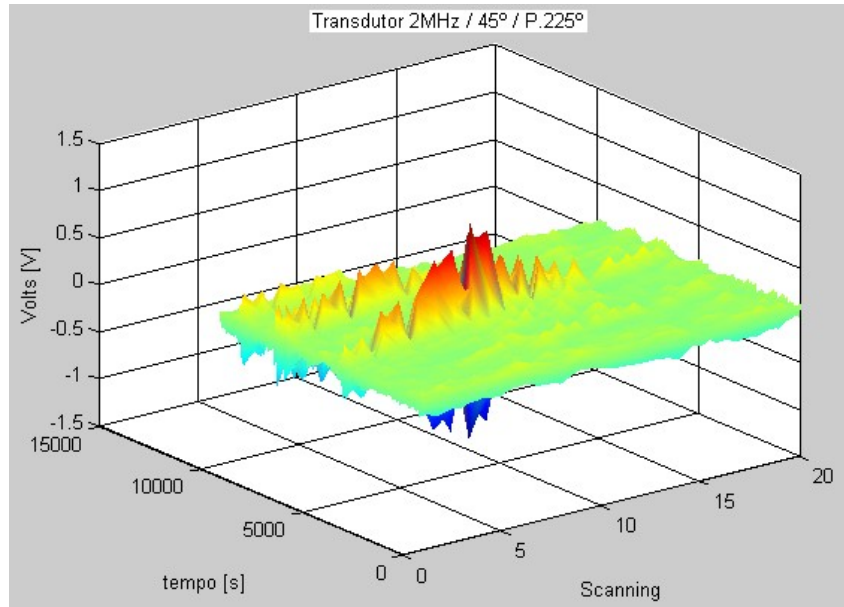


Figura 4.37 - Gráfico da variação da amplitude ao longo da varredura.

Conseqüentemente ao realizar a varredura no sentido longitudinal do duto foi realizado o dimensionamento da altura do defeito, com o transdutor de 45°, como mostrado na figura 4.38 abaixo.

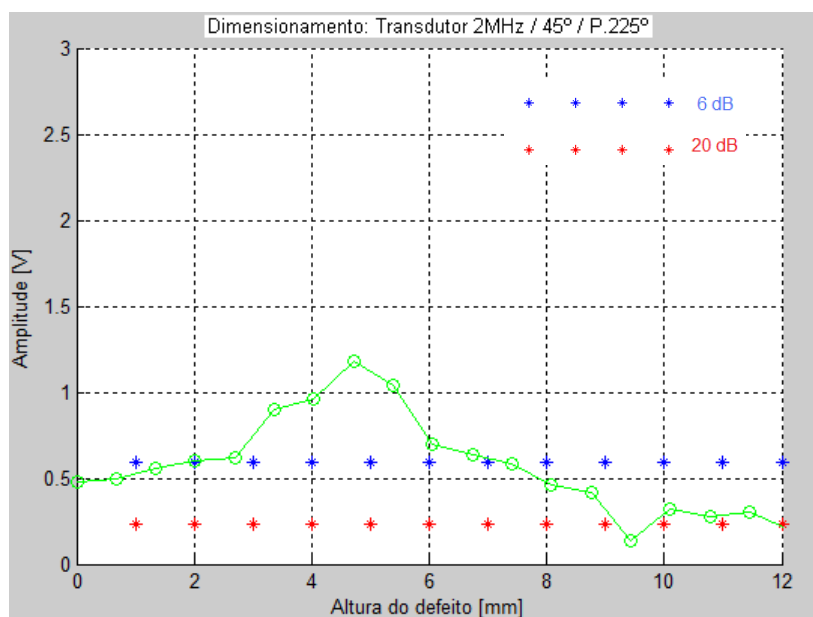


Figura 4.38 - Gráfico do dimensionamento da altura do defeito.

4.3.17 POSIÇÃO 225° TRANSDUTOR 60°

Variação da amplitude, figura 4.39, ao longo da varredura feita com o transdutor de 60° com um passo manual de aproximadamente 1mm x 1mm.

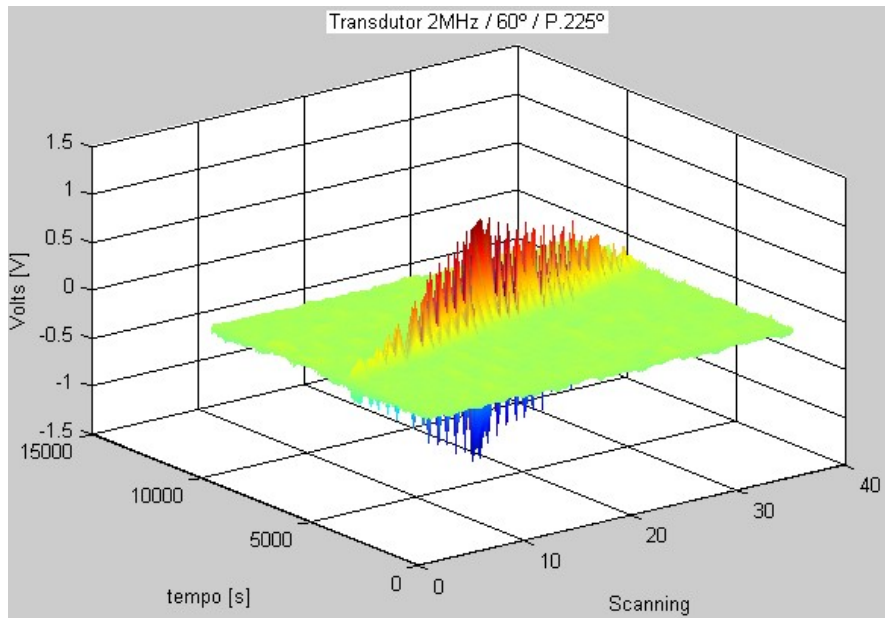


Figura 4.39 - Gráfico da variação da amplitude ao longo da varredura.

Conseqüentemente ao realizar a varredura no sentido longitudinal do duto foi realizado o dimensionamento da altura do defeito, com o transdutor de 60°, como mostrado na figura 4.40 abaixo.

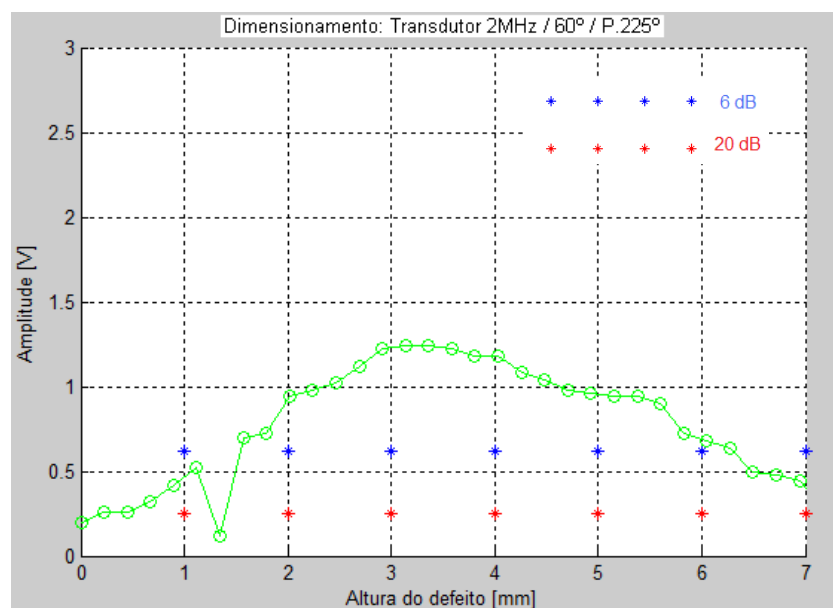


Figura 4.40 - Gráfico do dimensionamento da altura do defeito.

4.3.18 POSIÇÃO 225° TRANSDUTOR 70°

Varição da amplitude, figura 4.41, ao longo da varredura feita com o transdutor de 70° com um passo manual de aproximadamente 1mm x 1mm.

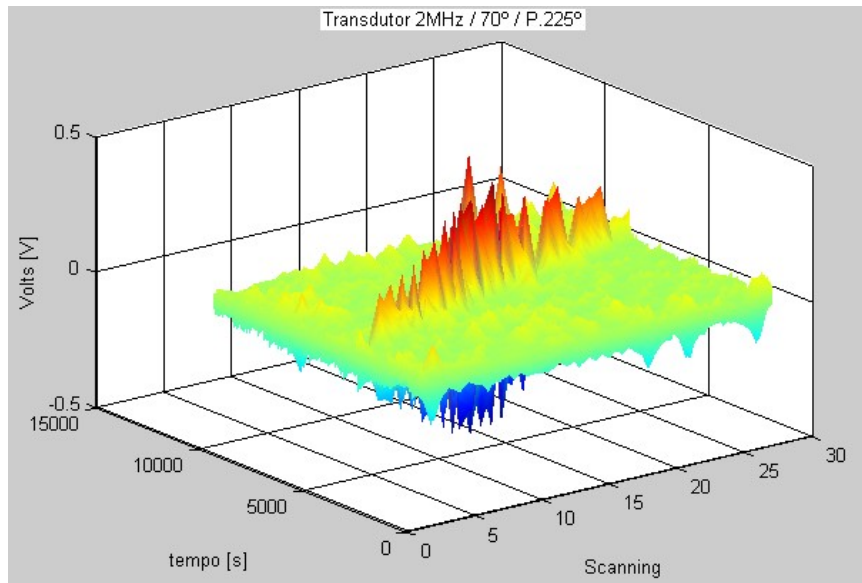


Figura 4.41 - Gráfico da variação da amplitude ao longo da varredura.

Conseqüentemente ao realizar a varredura no sentido longitudinal do duto foi realizado o dimensionamento da altura do defeito, com o transdutor de 70°, como mostrado na figura 4.42 abaixo.

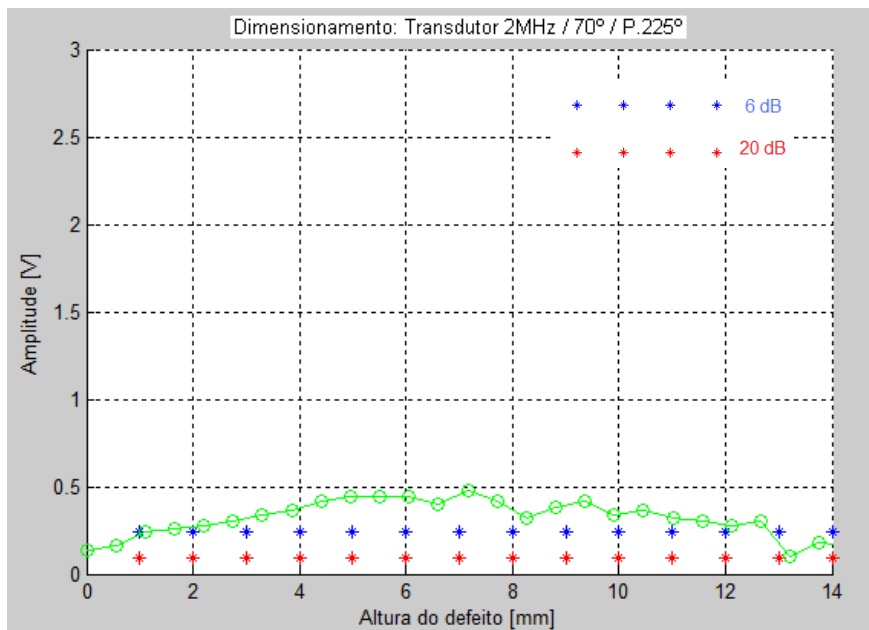


Figura 4.42 - Gráfico do dimensionamento da altura do defeito.

4.3.19 POSIÇÃO 270° TRANSDUTOR DE 45°

Varição da amplitude, figura 4.43, ao longo da varredura feita com o transdutor de 45° com um passo manual de aproximadamente 1mm x 1mm.

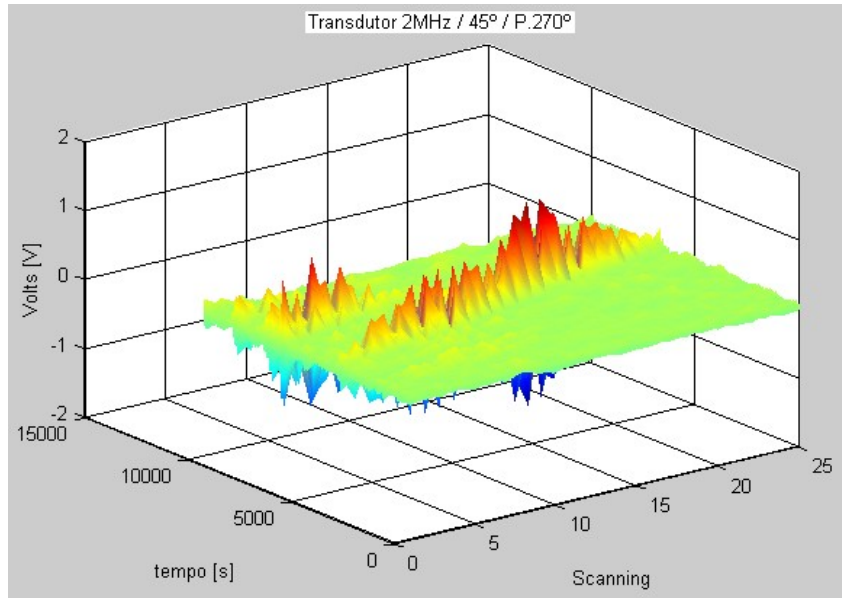


Figura 4.43 - Gráfico da variação da amplitude ao longo da varredura.

Conseqüentemente ao realizar a varredura no sentido longitudinal do duto foi realizado o dimensionamento da altura do defeito, com o transdutor de 45°, como mostrado na figura 4.44 abaixo.

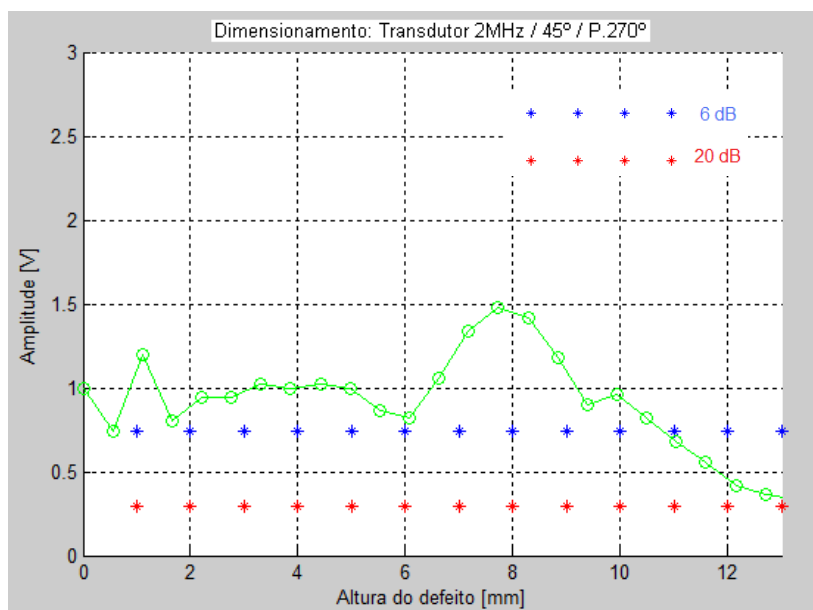


Figura 4.44 - Gráfico do dimensionamento da altura do defeito.

4.3.20 POSIÇÃO 270° TRANSDUTOR 60°

Varição da amplitude, figura 4.45, ao longo da varredura feita com o transdutor de 60° com um passo manual de aproximadamente 1mm x 1mm.

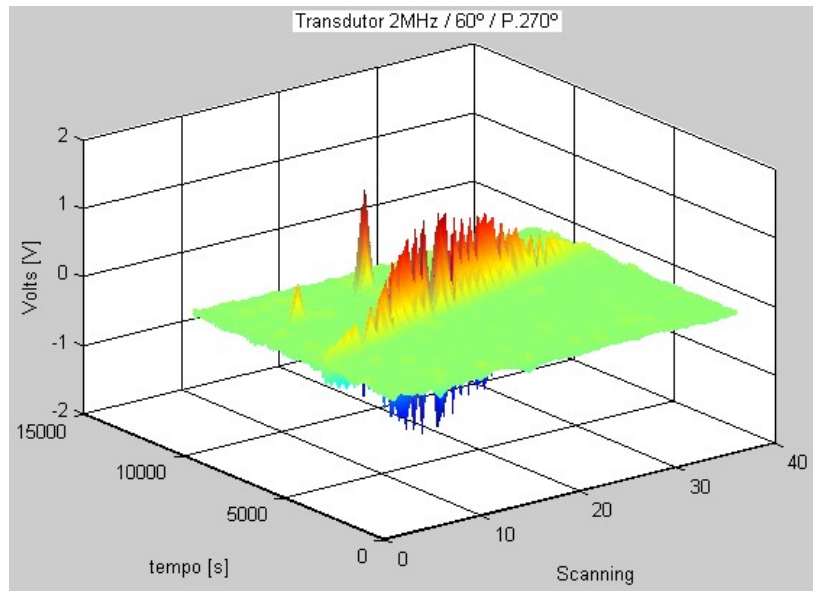


Figura 4.45 - Gráfico da variação da amplitude ao longo da varredura.

Conseqüentemente ao realizar a varredura no sentido longitudinal do duto foi realizado o dimensionamento da altura do defeito, com o transdutor de 60°, como mostrado na figura 4.46 abaixo.

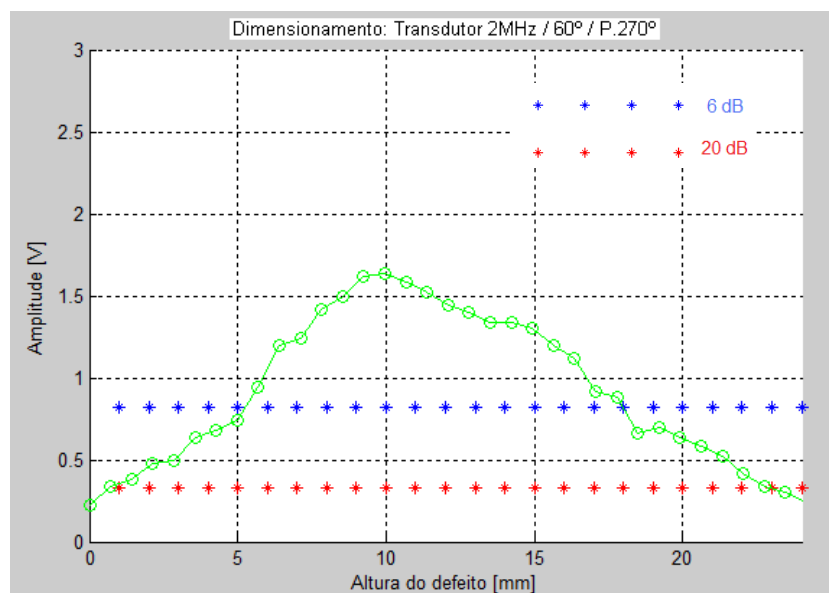


Figura 4.46 - Gráfico do dimensionamento da altura do defeito.

4.3.21 POSIÇÃO 270° TRANSDUTOR 70°

Varição da amplitude, figura 4.47, ao longo da varredura feita com o transdutor de 70° com um passo manual de aproximadamente 1mm x 1mm.

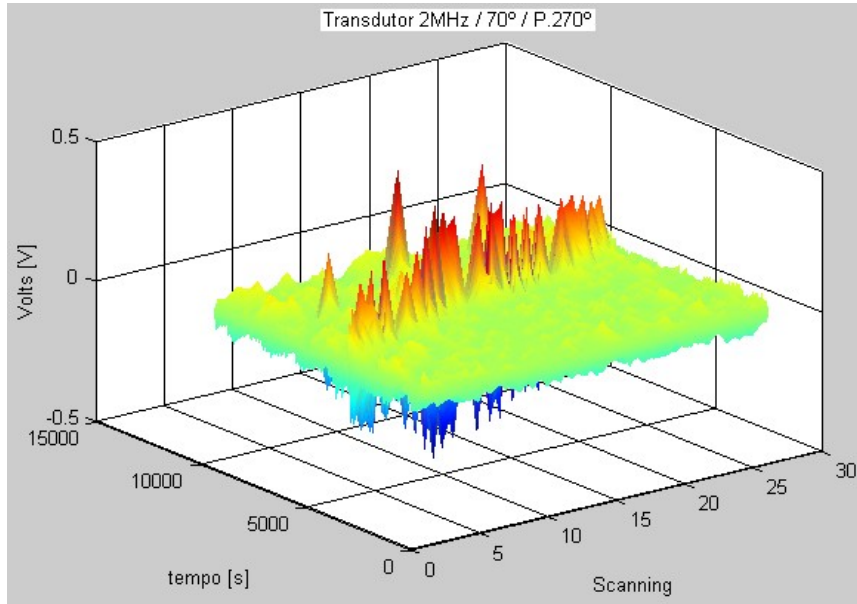


Figura 4.47 - Gráfico da variação da amplitude ao longo da varredura.

Conseqüentemente ao realizar a varredura no sentido longitudinal do duto foi realizado o dimensionamento da altura do defeito, com o transdutor de 70°, como mostrado na figura 4.48 abaixo.

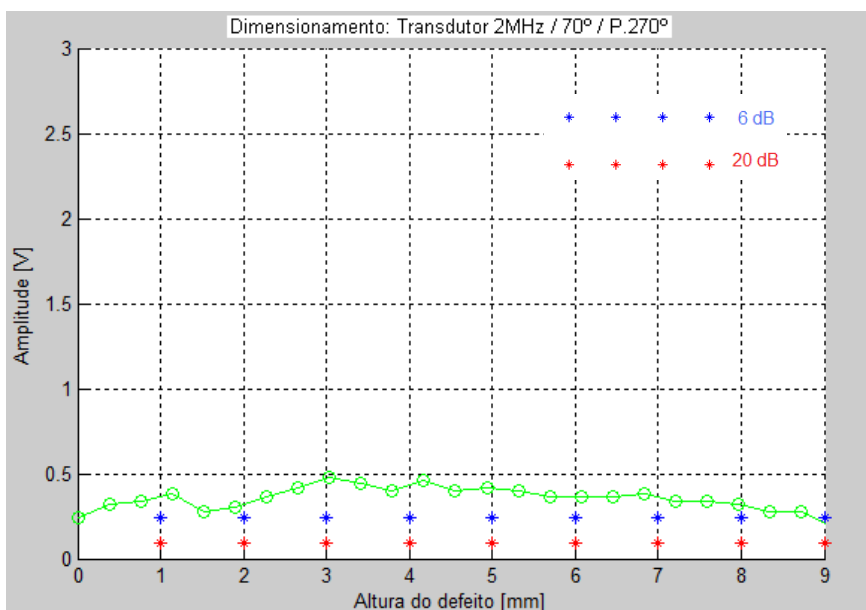


Figura 4.48 - Gráfico do dimensionamento da altura do defeito.

4.3.22 POSIÇÃO 315° TRANSDUTOR DE 45°

Varição da amplitude, figura 4.49, ao longo da varredura feita com o transdutor de 45° com um passo manual de aproximadamente 1mm x 1mm.

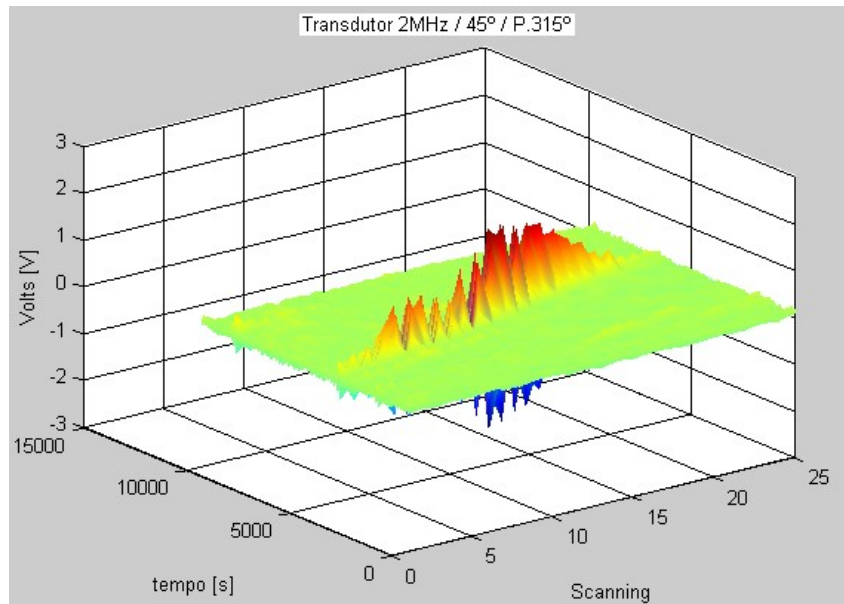


Figura 4.49 - Gráfico da variação da amplitude ao longo da varredura.

Conseqüentemente ao realizar a varredura no sentido longitudinal do duto foi realizado o dimensionamento da altura do defeito, com o transdutor de 45°, como mostrado na figura 4.50 abaixo.

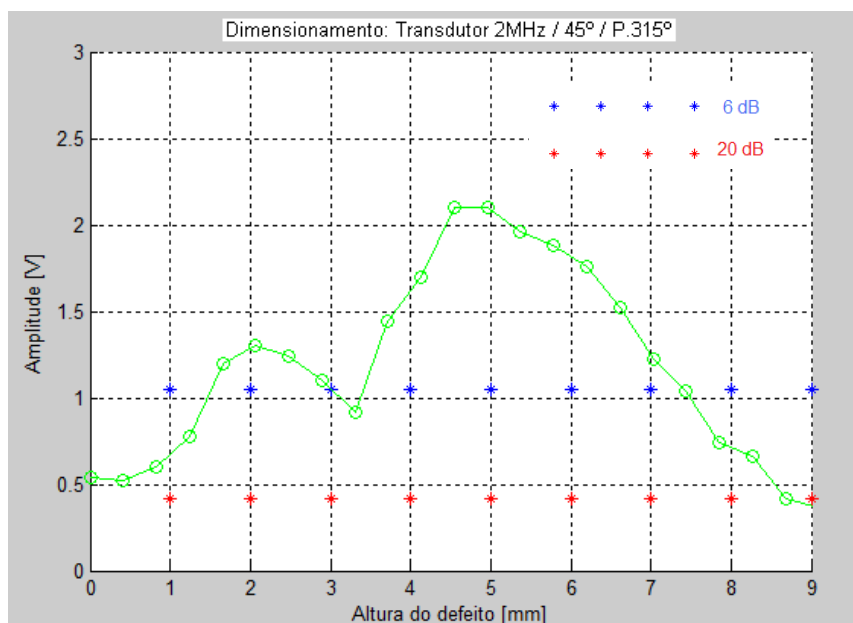


Figura 4.50 - Gráfico da variação – Dimensionamento da altura do defeito.

4.3.23 POSIÇÃO 315° TRANSDUTOR 60°

Varição da amplitude, figura 4.51, ao longo da varredura feita com o transdutor de 60° com um passo manual de aproximadamente 1mm x 1mm.

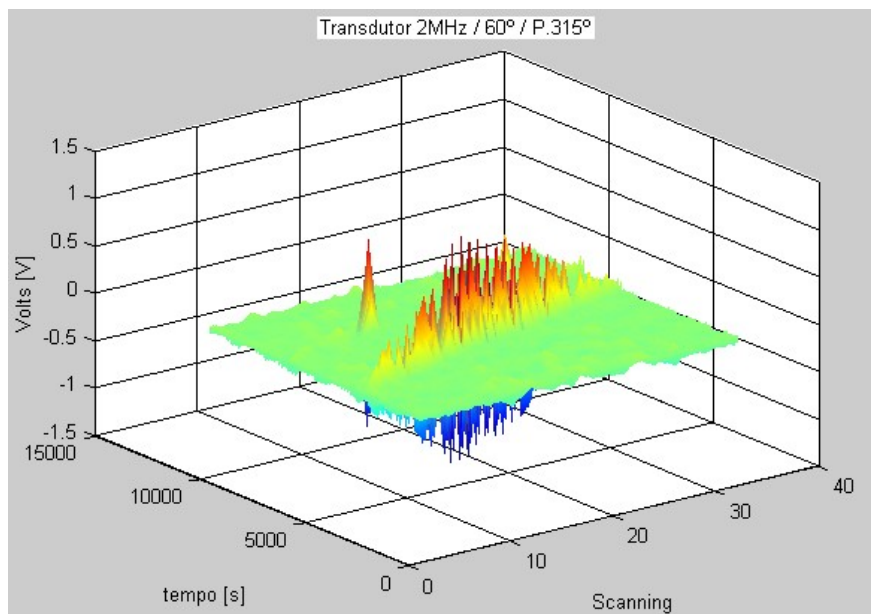


Figura 4.51 - Gráfico da variação da amplitude ao longo da varredura.

Conseqüentemente ao realizar a varredura no sentido longitudinal do duto foi realizado o dimensionamento da altura do defeito, com o transdutor de 60°, como mostrado na figura 4.52 abaixo.

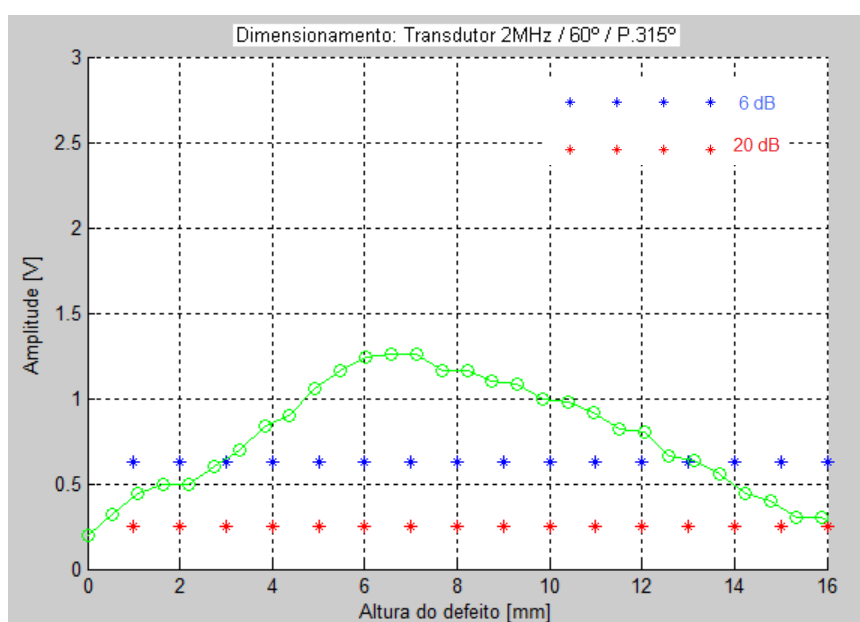


Figura 4.52 - Gráfico do dimensionamento da altura do defeito.

4.3.24 POSIÇÃO 315° TRANSDUTOR 70°

Variação da amplitude, figura 4.53, ao longo da varredura feita com o transdutor de 70° com um passo manual de aproximadamente 1mm x 1mm.

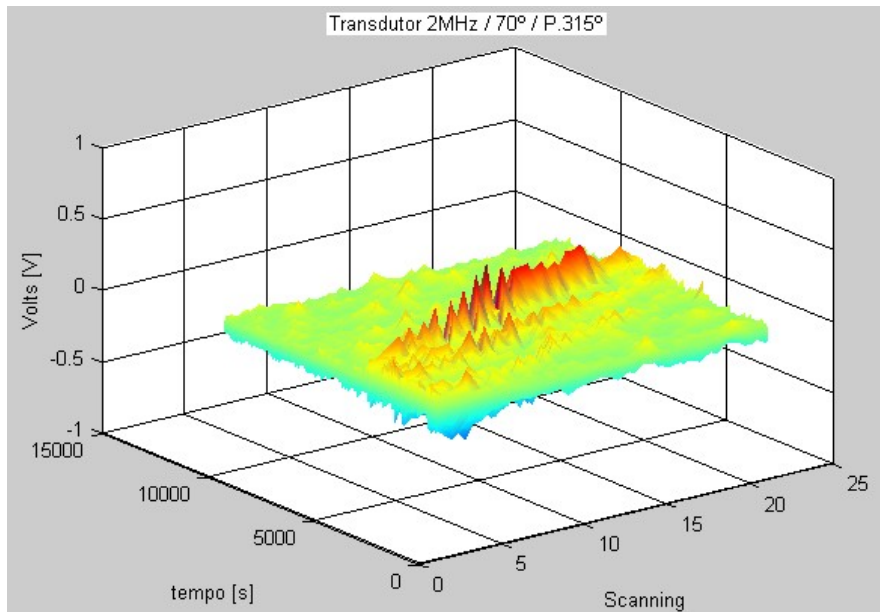


Figura 4.53 - Gráfico da variação da amplitude ao longo da varredura.

Conseqüentemente ao realizar a varredura no sentido longitudinal do duto foi realizado o dimensionamento da altura do defeito, com o transdutor de 70°, como mostrado na figura 4.54 abaixo.

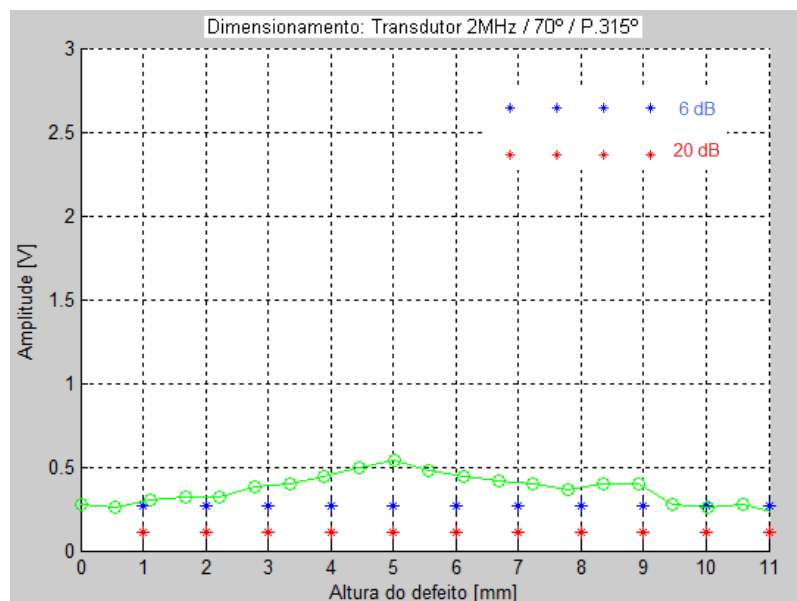


Figura 4.54 - Gráfico do dimensionamento da altura do defeito.

4.4 COMPARAÇÃO DOS TRANSDUTORES DE 2MHz DE 45, 60 E 70°

Nesse item serão apresentados os resultados da comparação das amplitudes dos transdutores de mesma frequência, de 2MHz, no entanto com os três ângulos de incidência diferentes (45, 60 e 70°).

Com a finalidade de analisar as possíveis diferenças das respostas dos sinais ultra-sônicos de cada transdutor, estes, serão apresentados em um único gráfico dos sub-itens 4.4.1 ao 4.4.8.

Todos os resultados são apresentados nas figuras 4.55 até 4.62.

Vale ressaltar que dos oito resultados obtidos para transdutores de 2MHz, somente os resultados das figuras 4.56 e 4.62 não apresentaram os dados esperados, ou seja, em todos os casos a resposta da amplitude dos sinais do transdutor de 60° foi mais alta em relação ao transdutor de 45° e 70°.

Quando uma onda ultra-sônica encontra uma fronteira do meio em que está se propagando (isto é, a superfície de uma trinca, por exemplo) pode acontecer que ela se divida em duas ou mais partes ou que ocorra o fenômeno da reflexão. No entanto, só é possível detectar um sinal, se somente os feixes da onda incidirem perpendicularmente à superfície de uma trinca, gerando um eco na tela do equipamento.

Mediante ao que foi exposto no parágrafo acima, as maiores amplitudes dos ecos na tela do equipamento, felizmente, são referentes às amplitudes do transdutor de 60°.

O fato da amplitude ser mais alta no transdutor de 60° é devido à incidência, praticamente, normal à superfície do bisel que apresenta uma angulação de 35°.

O ângulo do bisel é informado no item 3.6 do presente trabalho, logo a maior amplitude seria com um transdutor de 55°, pois é o ângulo complementar de 35° formando 90°, ou seja, total incidência perpendicular à superfície.

Como no atual presente trabalho foram utilizados os transdutores de 45°, 60° e 70° o ângulo que mais se aproxima da incidência perpendicular à superfície (55°) é o transdutor com ângulo de 60°.

4.4.1 POSIÇÃO 0°, TRANSDUTORES DE 2MHZ DE 45, 60 E 70°

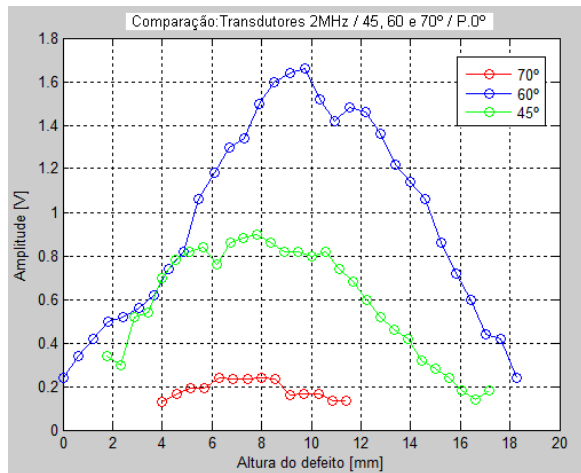


Figura 4.55 – Amplitudes do transdutor de 2MHz de 45, 60 e 70° na P.0°

4.4.2 POSIÇÃO 45°, TRANSDUTORES DE 2MHZ DE 45, 60 E 70°

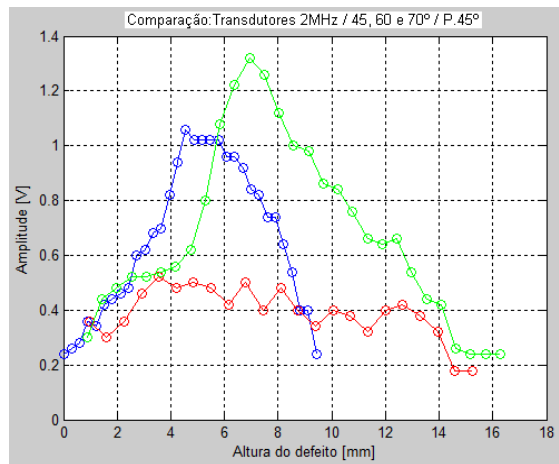


Figura 4.56 - Amplitudes do transdutor de 2MHz de 45, 60 e 70° na P.45°

4.4.3 POSIÇÃO 90°, TRANSDUTORES DE 2MHZ DE 45, 60 E 70°

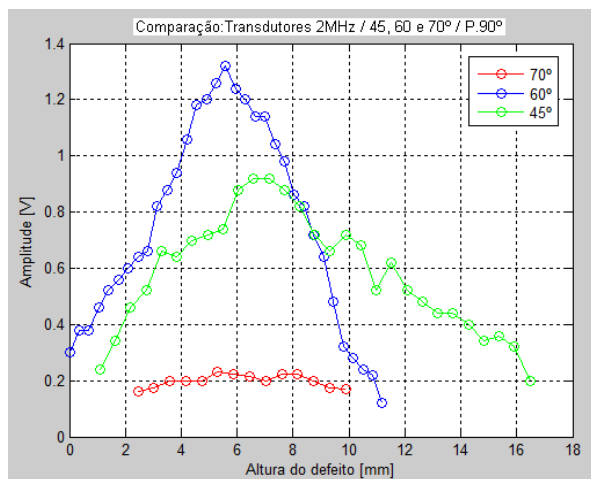


Figura 4.57 - Amplitudes transdutor de 2MHz de 45, 60 e 70° na P.90°

4.4.4 POSIÇÃO 135°, TRANSDUTORES DE 2MHZ DE 45, 60 E 70°

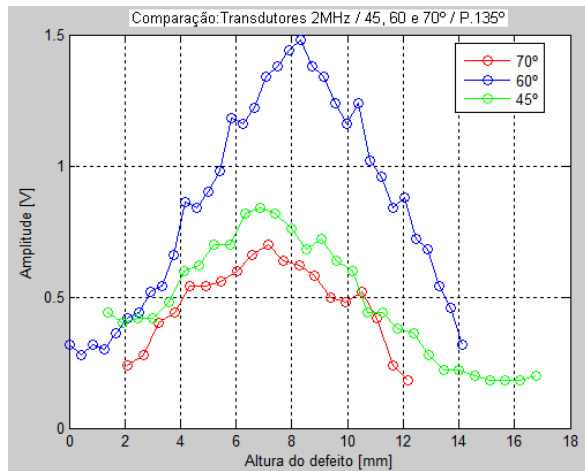


Figura 4.58 – Amplitudes do transdutor de 2MHz de 45, 60 e 70° na P.135°

4.4.5 POSIÇÃO 180°, TRANSDUTORES DE 2MHZ DE 45, 60 E 70°

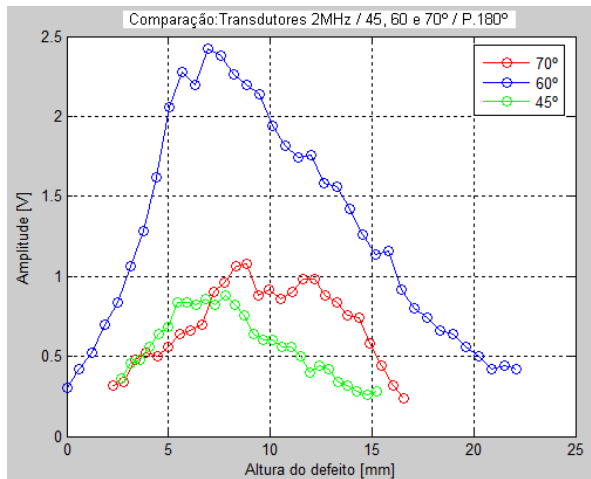


Figura 4.59 – Amplitudes do transdutor de 2MHz de 45, 60 e 70° na P.180°

4.4.6 POSIÇÃO 225°, TRANSDUTORES DE 2MHZ DE 45, 60 E 70°

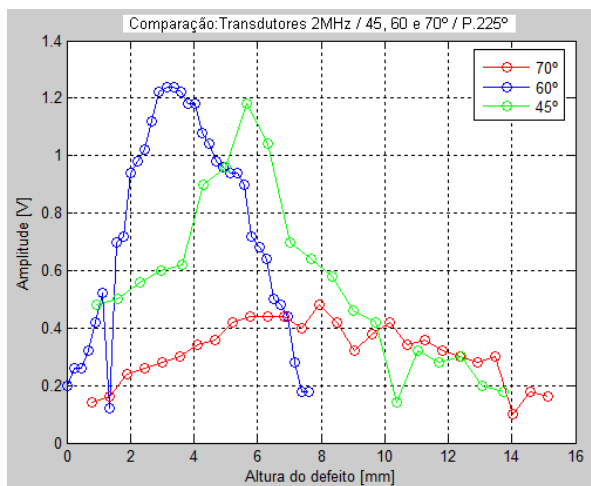


Figura 4.60 – Amplitudes do transdutor de 2MHz de 45, 60 e 70° na P.225°

4.4.7 POSIÇÃO 270°, TRANSDUTORES DE 2MHZ DE 45, 60 E 70°

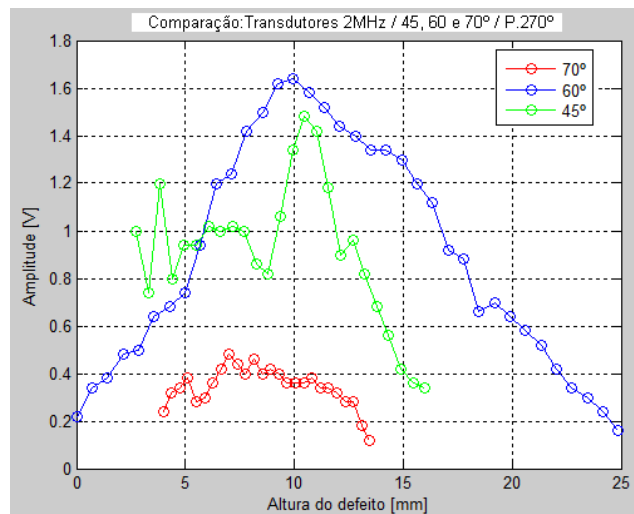


Figura 61 – Amplitudes do transdutor de 2MHz de 45, 60 e 70° na P.270°

4.4.8 POSIÇÃO 315°, TRANSDUTORES DE 2MHZ DE 45, 60 E 70°

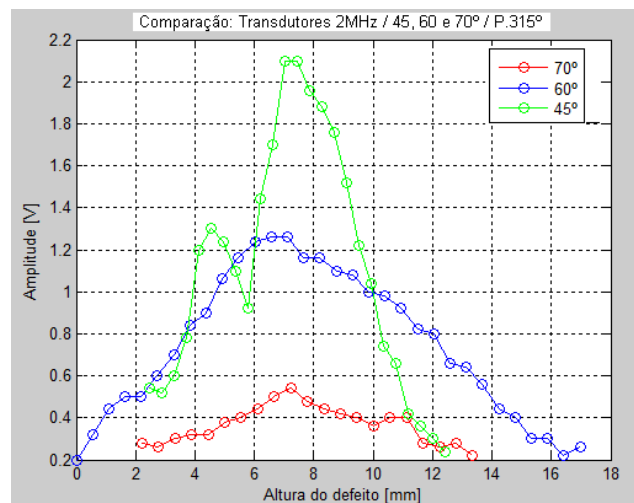


Figura 4.62 – Amplitudes do transdutor de 2MHz de 45, 60 e 70° na P.315°

4.5 DIMENSÃO DOS DEFEITOS

Nesse item será montada uma tabela, Tabela 4, a fim de sintetizar todas as alturas dos defeitos que já foram mostrados de outra maneira pelos gráficos dos sub-itens 4.3.1 ao 4.3.24 dos transdutores de 2MHz.

Tabela 4 – Dimensionamento (mm) das alturas dos defeitos para os transdutores de 2 MHz

Posição circunferencial no Duto	Ângulo do Transdutor	Altura do Defeito (mm)
0°	45°	10,5
	60°	10,0
	70°	7,5
45°	45°	6,5
	60°	6,0
	70°	12,5
90°	45°	8,0
	60°	6,0
	70°	7,0
135°	45°	8,0
	60°	8,5
	70°	8,0
180°	45°	8,0
	60°	10,0
	70°	10,0
225°	45°	4,0
	60°	4,5
	70°	10,0
270°	45°	9,0
	60°	12,0
	70°	8,5
315°	45°	6,0
	60°	10,0
	70°	9,0

Em vista da Tabela 4 exposta acima, fica claro que os dimensionamentos entre os três ângulos dos transdutores do atual trabalho foram coerentes.

Como descrito no item 4.3 foi utilizado o MATLAB para plotar gráficos informando as alturas dos defeitos. Os valores na tabela em questão simplesmente foram retirados das figuras 4.7 até 4.54. Sendo que a leitura foi

feita tomando como referência a linha dos 6dB (em azul) mostrada em cada figura dos dimensionamentos, ver as mesmas figuras de 4.7 até 4.54.

Somente dois valores estão escritos de vermelhos, os mesmos significam que o valor marcado excede mais que o dobro das medidas dos outros transdutores na mesma posição. Como ilustrado nas Tabelas 5 e 6.

Tabela 5 – Medidas marcadas na cor vermelha na posição 45°.

45°	45°	6,5
	60°	6,0
	70°	12,5

Tabela 6 – Medidas marcadas na cor vermelha na posição 225°.

225°	45°	4,0
	60°	4,5
	70°	10,0

Esse fato pode ter ocorrido devido à imprecisão do executante durante o atual trabalho. Outro fato que pode ter corroborado foi a grande abertura que os transdutores de 70° apresentam, ou seja, grande dissipação de energia e conseqüentemente um mau registro.

A metodologia adotada no presente trabalho foi bastante coerente e permitiu uma detecção consistente das alturas dos defeitos, pois somente duas alturas das vinte e quatro se desviaram do esperado.

4.6 SINAIS DOS TRANSDUTORES DE 4MHZ

Com o intuito de corroborar com os resultados do presente trabalho os sinais foram processados utilizando o programa MATLAB, descrito no item 3.9, e são apresentados nos próximos sub-itens da seguinte maneira: Os resultados da posição 0° serão apresentados nos sub-itens 4.6.1,2,3 dos transdutores de 45, 60 e 70° respectivamente.

Os resultados da posição 45° serão apresentados nos sub-itens 4.6.4; 4.6.5 e 4.6.6 dos transdutores de 45, 60 e 70° respectivamente.

Os resultados da posição 90° serão apresentados nos sub-itens 4.6.7; 4.6.8 e 4.6.9 dos transdutores de 45, 60 e 70° respectivamente.

Os resultados da posição 135° serão apresentados nos sub-itens 4.6.10; 4.6.11 e 4.6.12 dos transdutores de 45, 60 e 70° respectivamente.

Os resultados da posição 180° serão apresentados nos sub-itens 4.6.13; 4.6.14 e 4.6.15 dos transdutores de 45, 60 e 70° respectivamente.

Os resultados da posição 225° serão apresentados nos sub-itens 4.6.16; 4.6.17 e 4.6.18 dos transdutores de 45, 60 e 70° respectivamente.

Os resultados da posição 270° serão apresentados nos sub-itens 4.6.19; 4.6.20 e 4.6.21 dos transdutores de 45, 60 e 70° respectivamente.

Os resultados da posição 315° serão apresentados nos sub-itens 4.6.22; 4.6.23 e 4.6.24 dos transdutores de 45, 60 e 70° respectivamente.

4.6.1 POSIÇÃO 0° TRANSDUTOR DE 45°

Varição da amplitude, figura 4.63, ao longo da varredura feita com o transdutor de 45° com um passo manual de aproximadamente 1mm x 1mm.

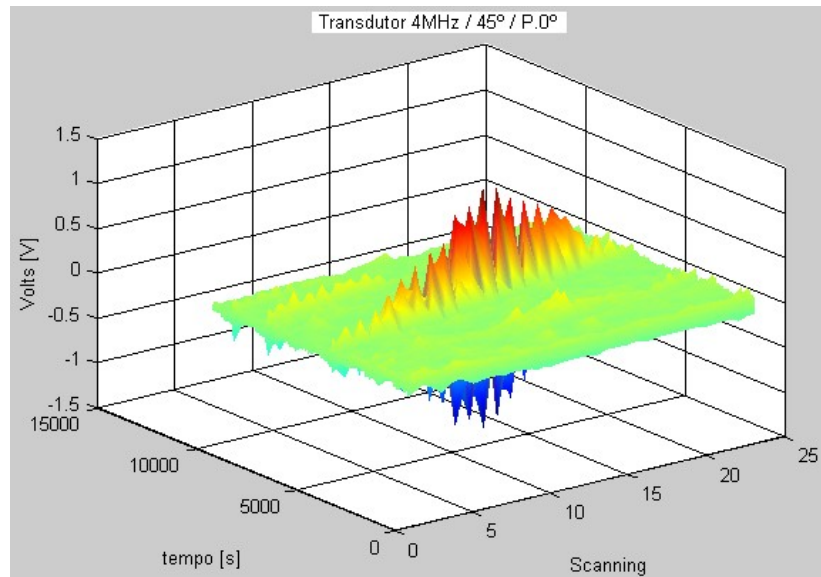


Figura 4.63 – Gráfico da variação da amplitude ao longo da varredura.

Conseqüentemente ao realizar a varredura no sentido longitudinal do duto foi realizado o dimensionamento da altura do defeito, com o transdutor de 45°, como mostrado na figura 4.64 abaixo.

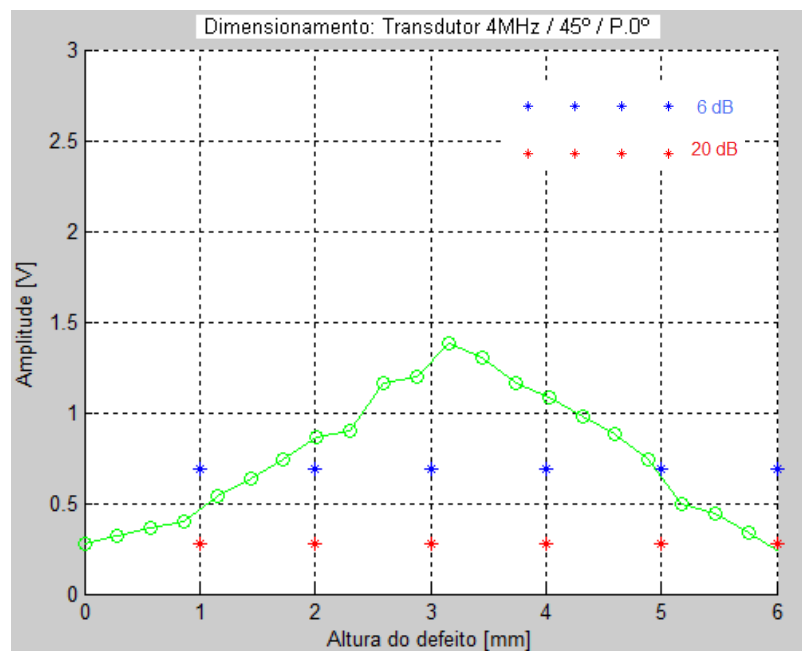


Figura 4.64 – Gráfico do dimensionamento da altura do defeito.

4.6.2 POSIÇÃO 0° TRANSDUTOR DE 60°

Varição da amplitude, figura 4.65, ao longo da varredura feita com o transdutor de 60° com um passo manual de aproximadamente 1mm x 1mm.

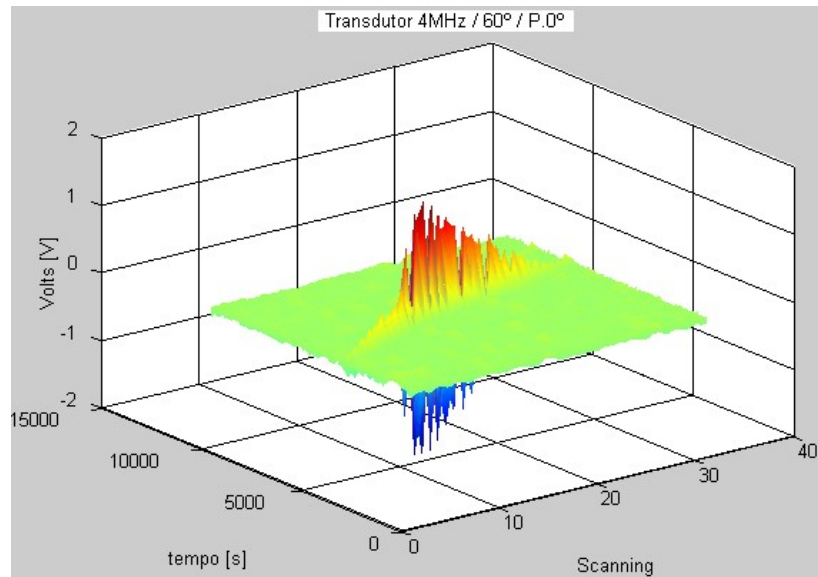


Figura 4.65 – Variação da amplitude ao longo da varredura.

Conseqüentemente ao realizar a varredura no sentido longitudinal do duto foi realizado o dimensionamento da altura do defeito, com o transdutor de 60°, como mostrado na figura 4.66 abaixo.

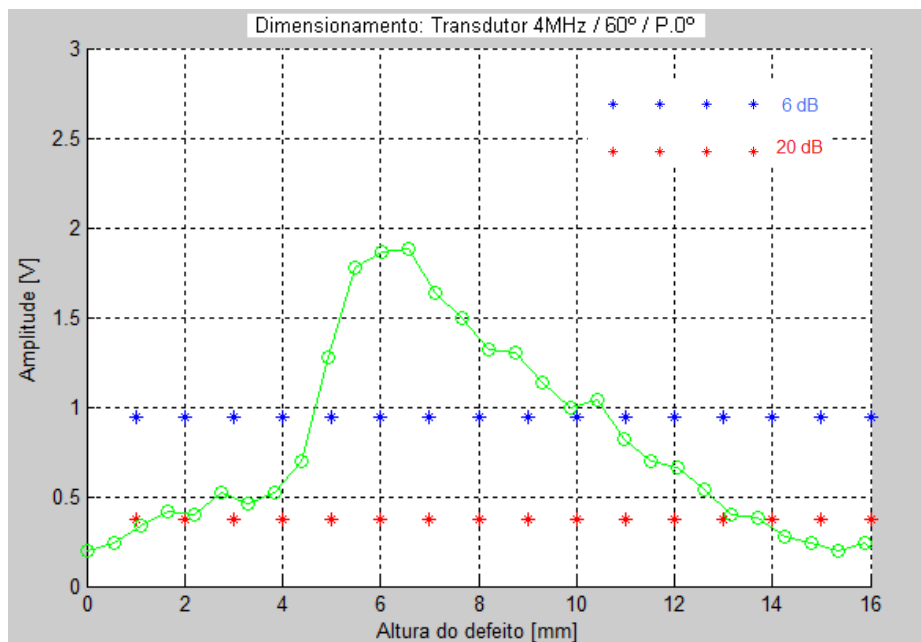


Figura 4.66 – Dimensionamento da altura do defeito.

4.6.3 POSIÇÃO 0° TRANSDUTOR DE 70°

Varição da amplitude, figura 4.67, ao longo da varredura feita com o transdutor de 70° com um passo manual de aproximadamente 1mm x 1mm.

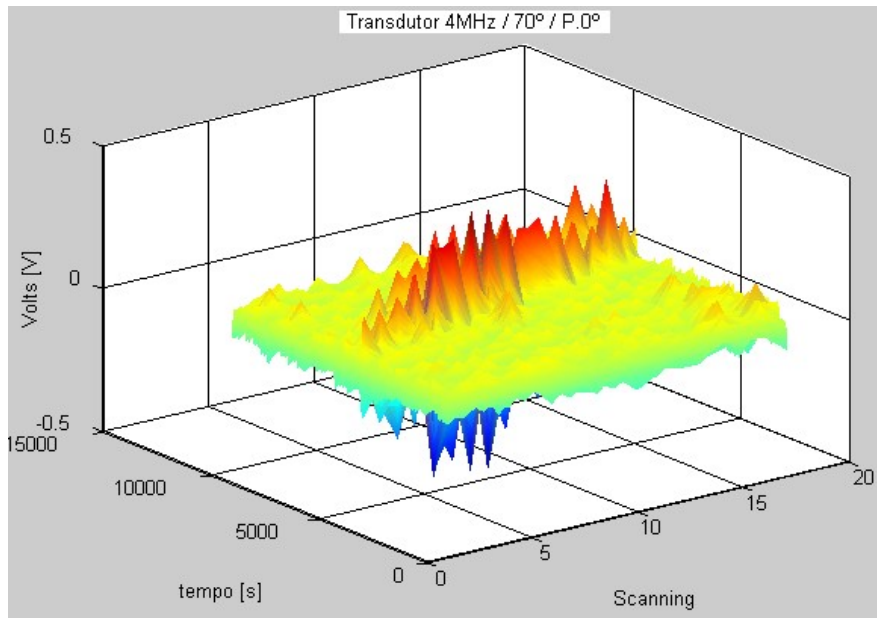


Figura 4.67 – Variação da amplitude ao longo da varredura.

Conseqüentemente ao realizar a varredura no sentido longitudinal do duto foi realizado o dimensionamento da altura do defeito, com o transdutor de 70°, como mostrado na figura 4.68 abaixo.

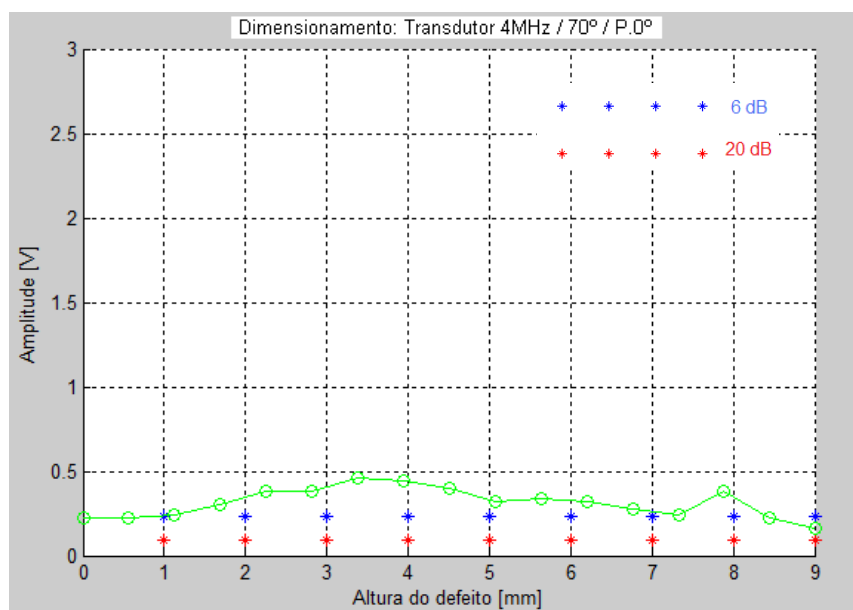


Figura 4.68 – Dimensionamento da altura do defeito.

4.6.4 POSIÇÃO 45° TRANSDUTOR DE 45°

Variação da amplitude, figura 4.69, ao longo da varredura feita com o transdutor de 45° com um passo manual de aproximadamente 1mm x 1mm.

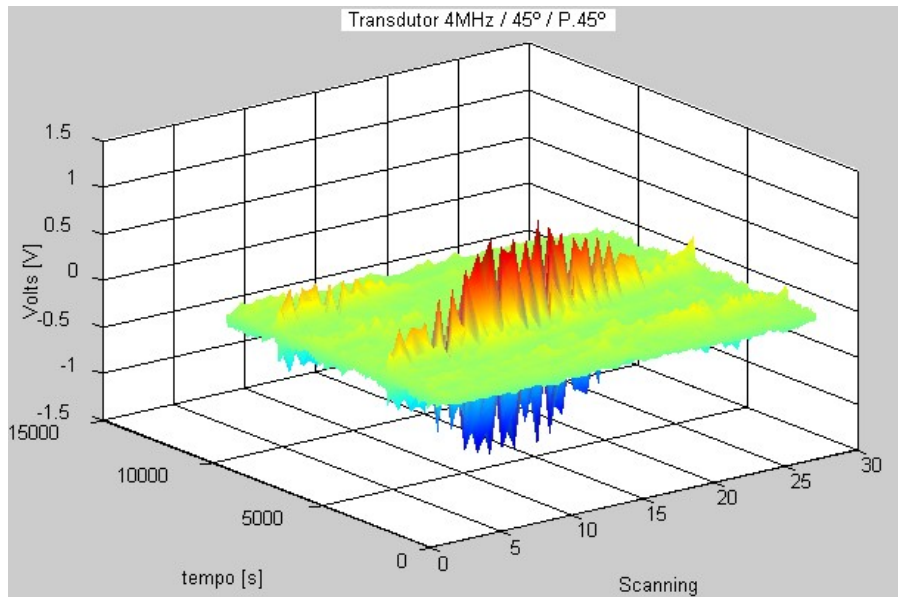


Figura 4.69 – Variação da amplitude ao longo da varredura.

Conseqüentemente ao realizar a varredura no sentido longitudinal do duto foi realizado o dimensionamento da altura do defeito, com o transdutor de 45°, como mostrado na figura 4.70 abaixo.

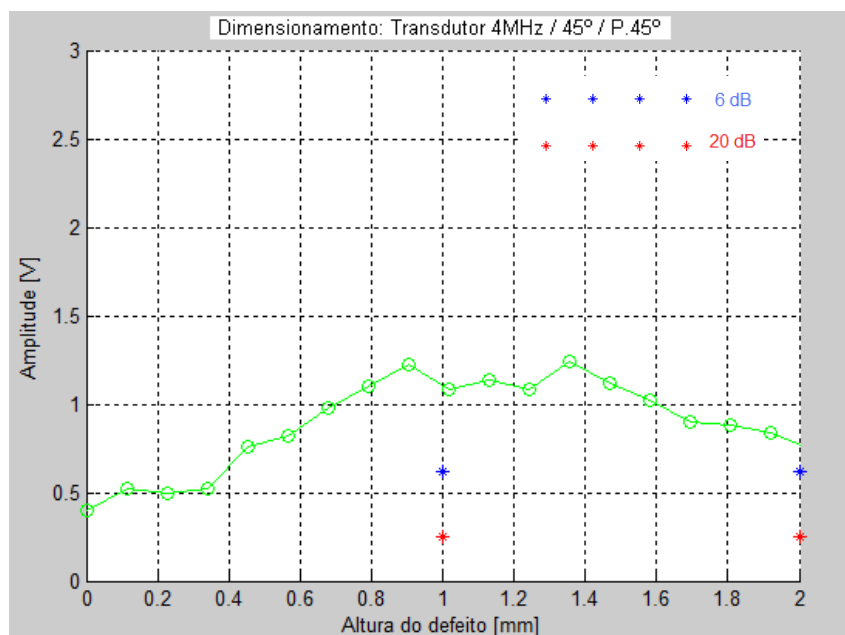


Figura 4.70 – Dimensionamento da altura do defeito.

4.6.5 POSIÇÃO 45° TRANSDUTOR 60°

Variação da amplitude, figura 4.71, ao longo da varredura feita com o transdutor de 60° com um passo manual de aproximadamente 1mm x 1mm.

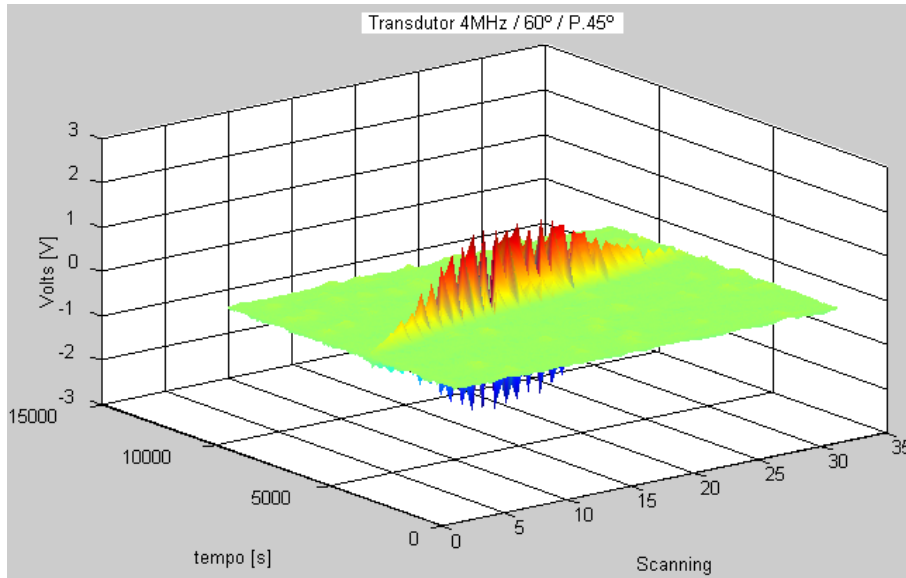


Figura 4.71 – Variação da amplitude ao longo da varredura.

Conseqüentemente ao realizar a varredura no sentido longitudinal do duto foi realizado o dimensionamento da altura do defeito, com o transdutor de 60°, como mostrado na figura 4.72 abaixo.

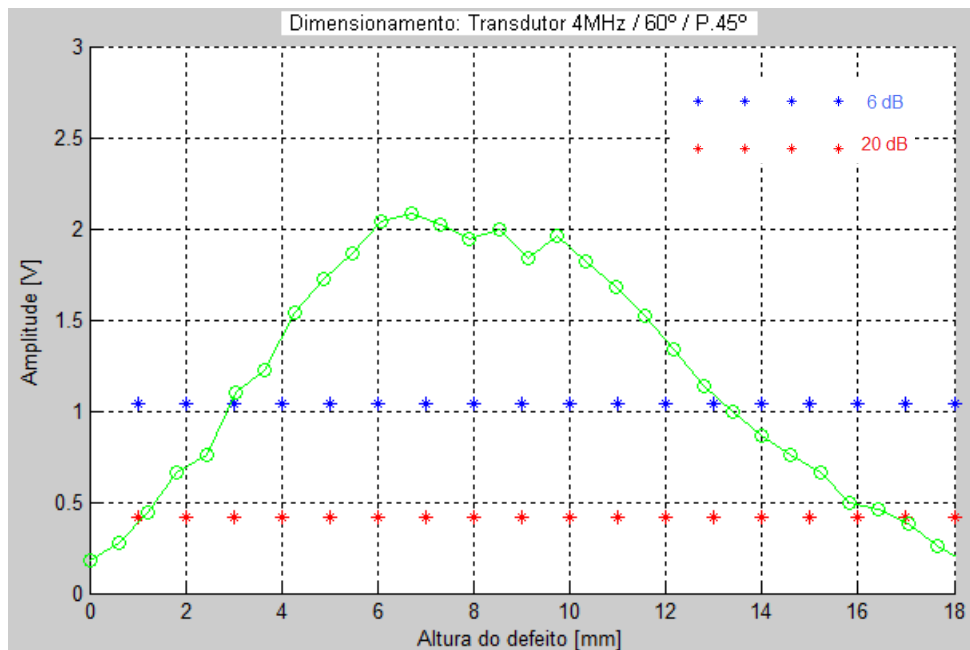


Figura 4.72 – Dimensionamento da altura do defeito.

4.6.6 POSIÇÃO 45° TRANSDUTOR 70°

Variação da amplitude, figura 4.73, ao longo da varredura feita com o transdutor de 70° com um passo manual de aproximadamente 1mm x 1mm.

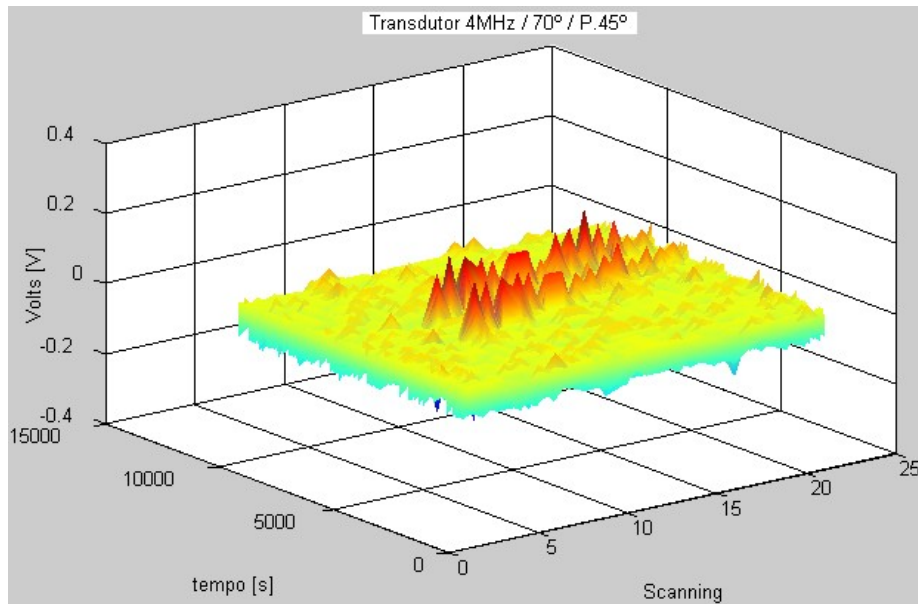


Figura 4.73 – Variação da amplitude ao longo da varredura.

Conseqüentemente ao realizar a varredura no sentido longitudinal do duto foi realizado o dimensionamento da altura do defeito, com o transdutor de 70°, como mostrado na figura 4.74 abaixo.

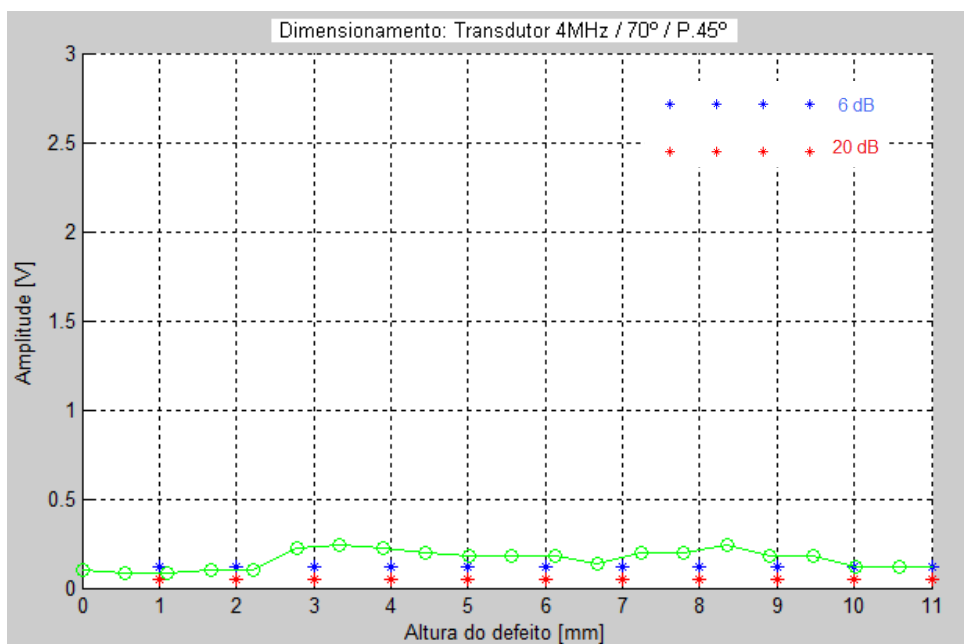


Figura 4,74 – Dimensionamento da altura do defeito.

4.6.7 POSIÇÃO 90° TRANSDUTOR DE 45°

Variação da amplitude, figura 4.75, ao longo da varredura feita com o transdutor de 45° com um passo manual de aproximadamente 1mm x 1mm.

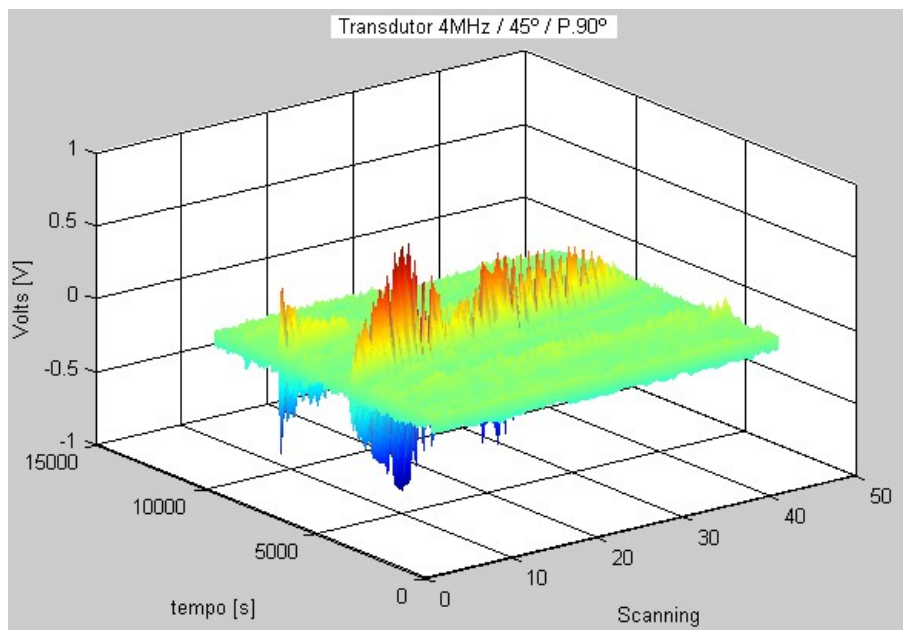


Figura 4.75 – Variação da amplitude ao longo da varredura.

Conseqüentemente ao realizar a varredura no sentido longitudinal do duto foi realizado o dimensionamento da altura do defeito, com o transdutor de 45°, como mostrado na figura 4.76 abaixo.

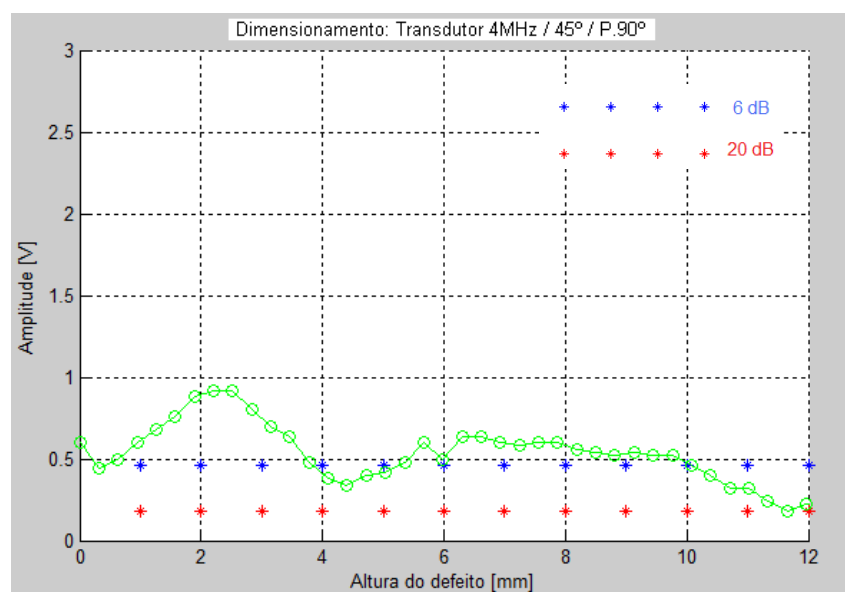


Figura 4.76 – Dimensionamento da altura do defeito.

4.6.8 POSIÇÃO 90° TRANSDUTOR 60°

Variação da amplitude, figura 4.77, ao longo da varredura feita com o transdutor de 60° com um passo manual de aproximadamente 1mm x 1mm.

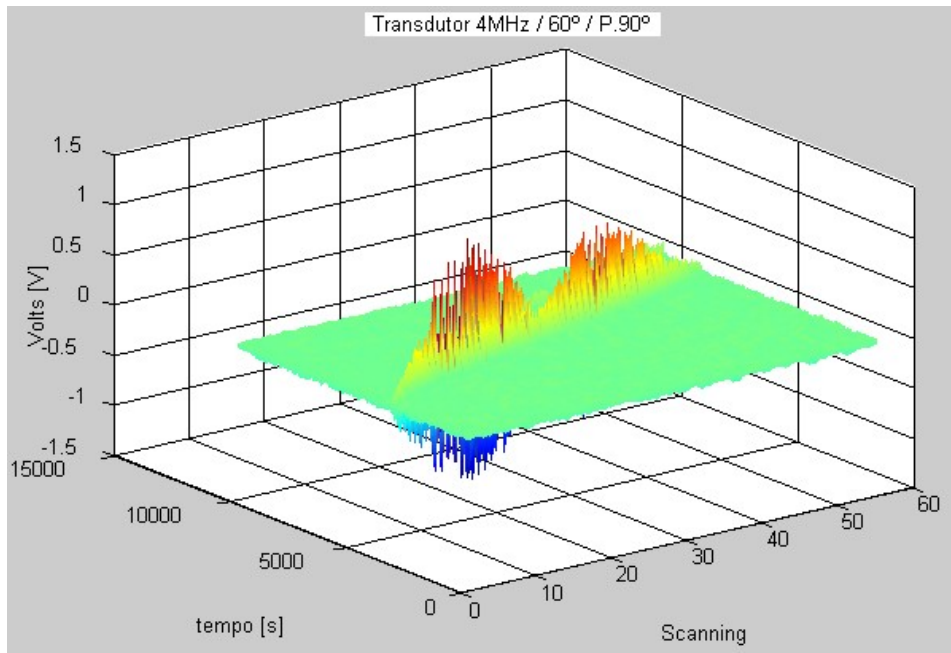


Figura 4.77 – Variação da amplitude ao longo da varredura.

Conseqüentemente ao realizar a varredura no sentido longitudinal do duto foi realizado o dimensionamento da altura do defeito, com o transdutor de 60°, como mostrado na figura 4.78 abaixo.

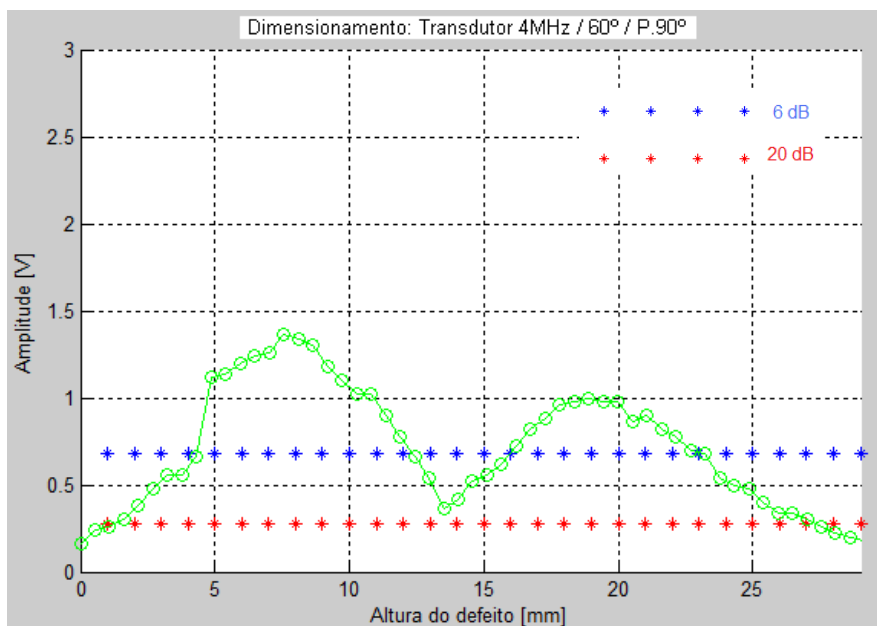


Figura 4.78 – Dimensionamento da altura do defeito.

4.6.9 POSIÇÃO 90° TRANSDUTOR 70°

Varição da amplitude, figura 4.79, ao longo da varredura feita com o transdutor de 70° com um passo manual de aproximadamente 1mm x 1mm.

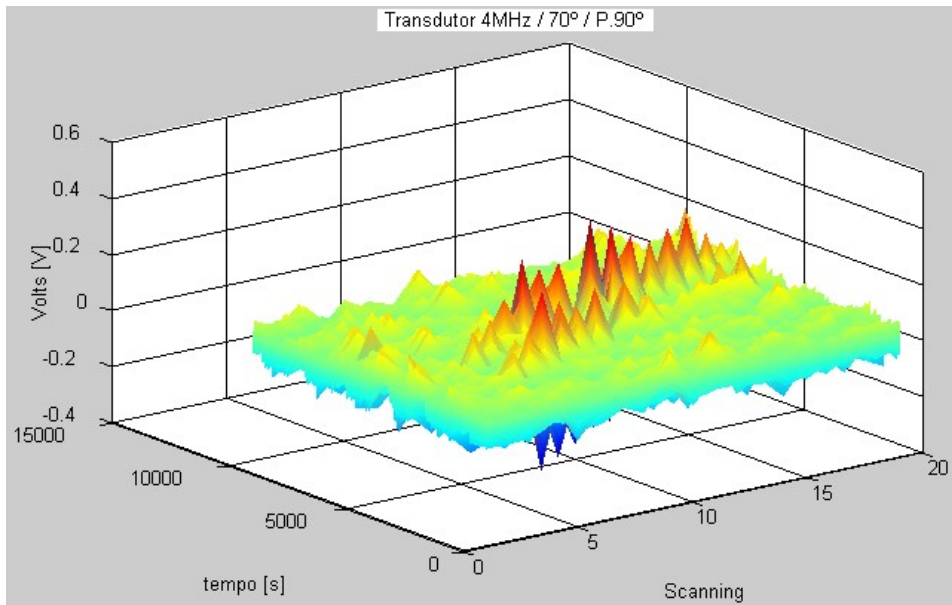


Figura 4.79 – Variação da amplitude ao longo da varredura.

Conseqüentemente ao realizar a varredura no sentido longitudinal do duto foi realizado o dimensionamento da altura do defeito, com o transdutor de 70°, como mostrado na figura 4.80 abaixo.

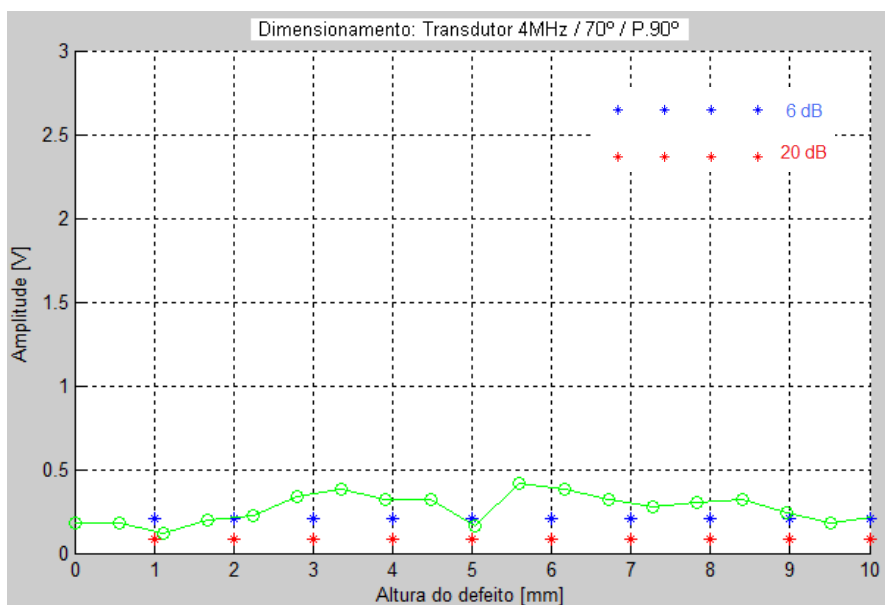


Figura 4.80 – Dimensionamento da altura do defeito.

4.6.10 POSIÇÃO 135° TRANSDUTOR DE 45°

Variação da amplitude, figura 4.81, ao longo da varredura feita com o transdutor de 45° com um passo manual de aproximadamente 1mm x 1mm.

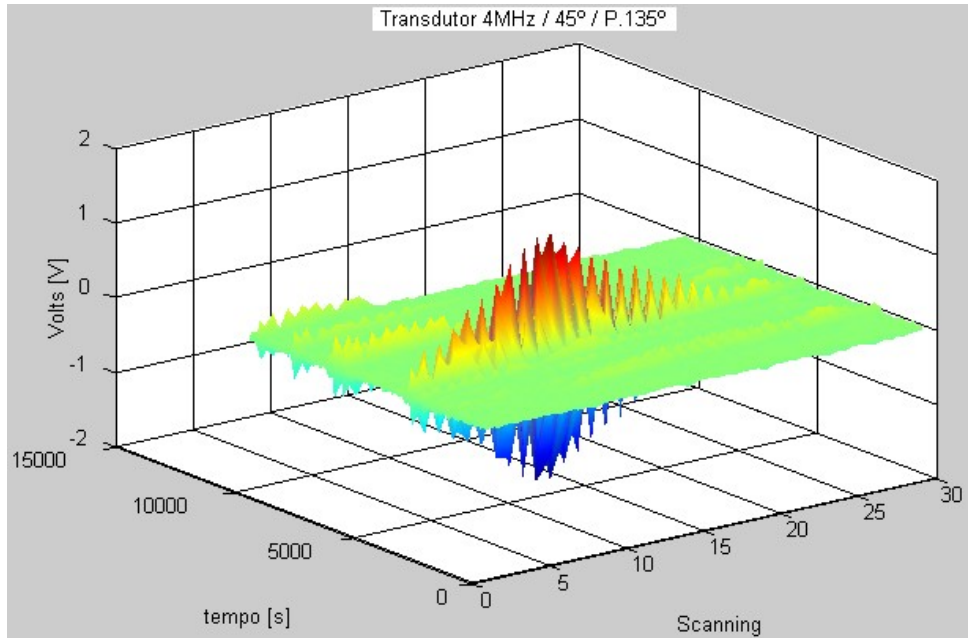


Figura 4.81 – Variação da amplitude ao longo da varredura.

Conseqüentemente ao realizar a varredura no sentido longitudinal do duto foi realizado o dimensionamento da altura do defeito, com o transdutor de 45°, como mostrado na figura 4.82 abaixo.

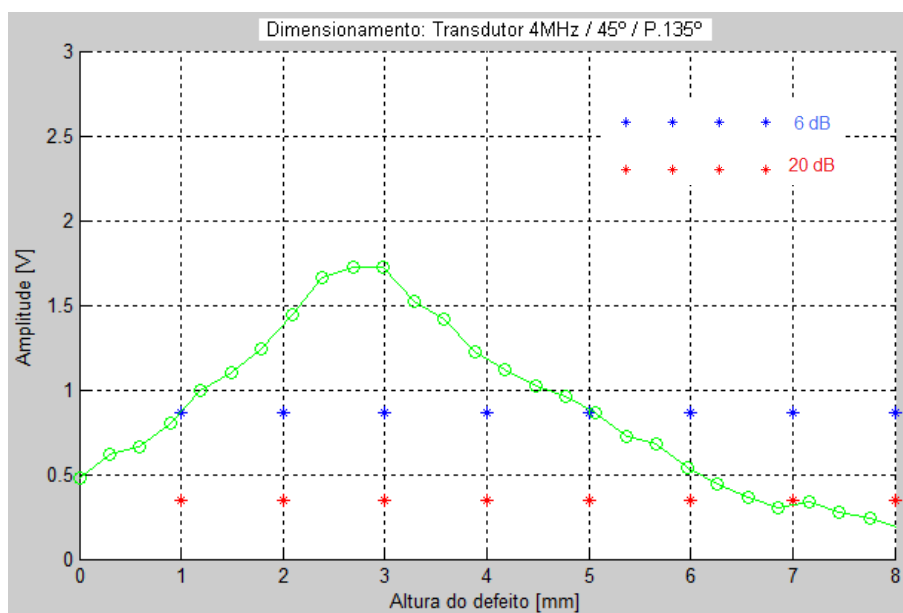


Figura 4.82 – Dimensionamento da altura do defeito.

4.6.11 POSIÇÃO 135° TRANSDUTOR 60°

Varição da amplitude, figura 4.83, ao longo da varredura feita com o transdutor de 60° com um passo manual de aproximadamente 1mm x 1mm.

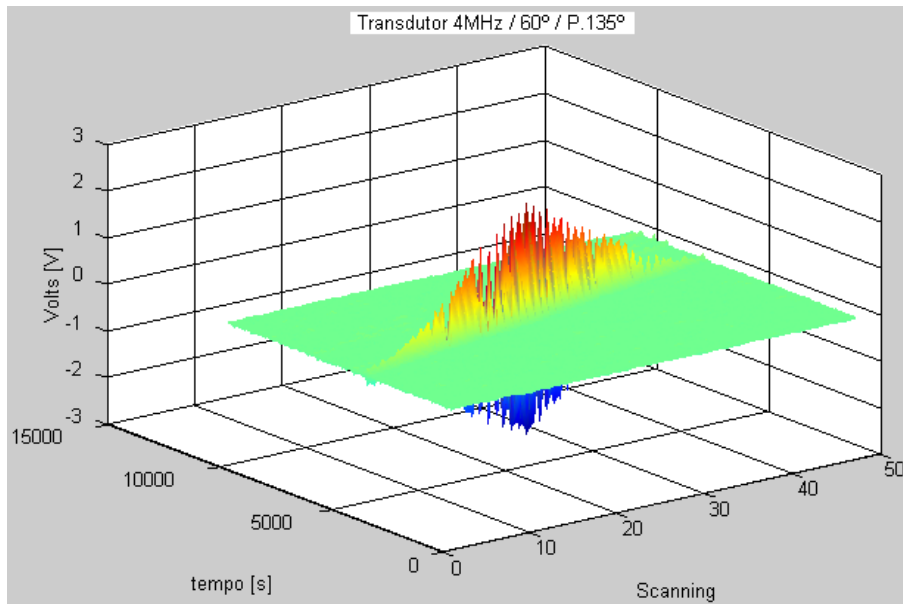


Figura 4.83 – Variação da amplitude ao longo da varredura.

Conseqüentemente ao realizar a varredura no sentido longitudinal do duto foi realizado o dimensionamento da altura do defeito, com o transdutor de 60°, como mostrado na figura 4.84 abaixo.

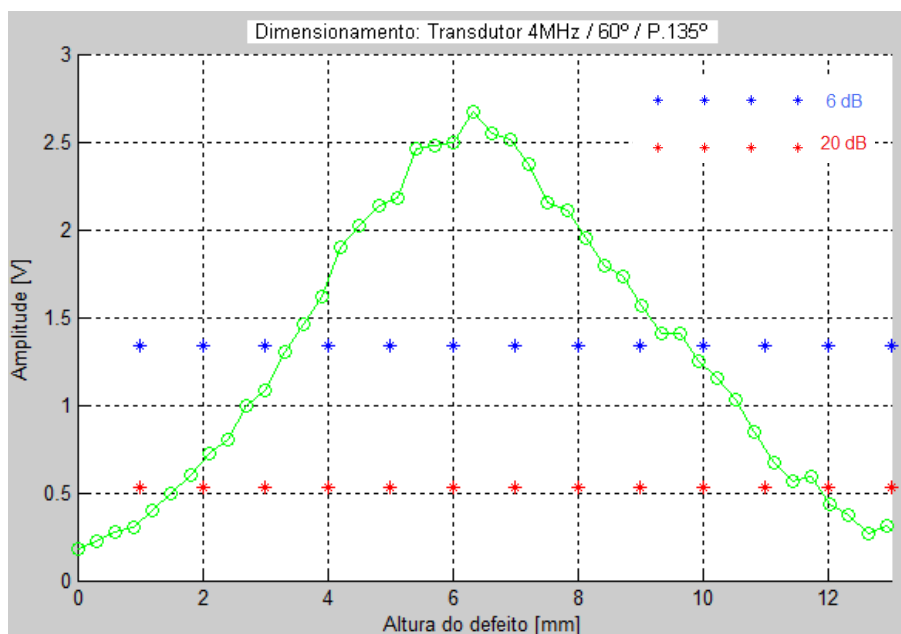


Figura 4.84 – Dimensionamento da altura do defeito.

4.6.12 POSIÇÃO 135° TRANSDUTOR 70°

Varição da amplitude, figura 4.85, ao longo da varredura feita com o transdutor de 70° com um passo manual de aproximadamente 1mm x 1mm.

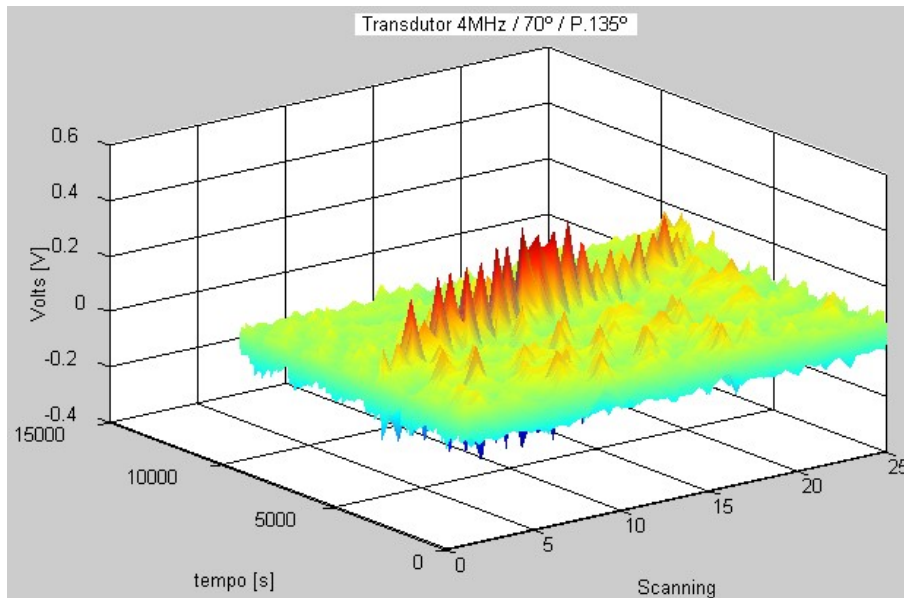


Figura 4.85 – Variação da amplitude ao longo da varredura.

Conseqüentemente ao realizar a varredura no sentido longitudinal do duto foi realizado o dimensionamento da altura do defeito, com o transdutor de 70°, como mostrado na figura 4.86 abaixo.

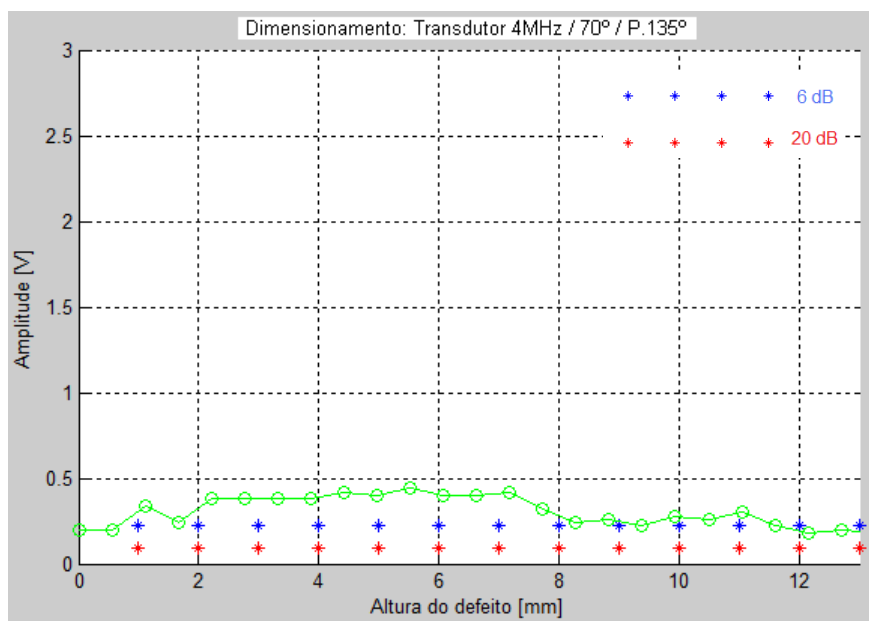


Figura 4.86 – Dimensionamento da altura do defeito.

4.6.13 POSIÇÃO 180° TRANSDUTOR DE 45°

Varição da amplitude, figura 4.87, ao longo da varredura feita com o transdutor de 45° com um passo manual de aproximadamente 1mm x 1mm.

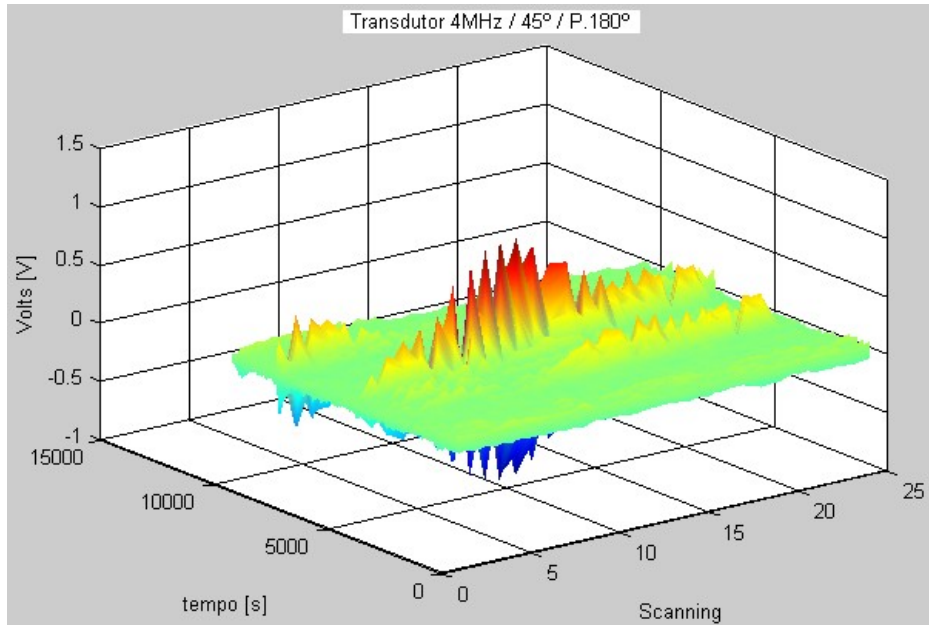


Figura 4.87 – Variação da amplitude ao longo da varredura.

Conseqüentemente ao realizar a varredura no sentido longitudinal do duto foi realizado o dimensionamento da altura do defeito, com o transdutor de 45°, como mostrado na figura 4.88 abaixo.

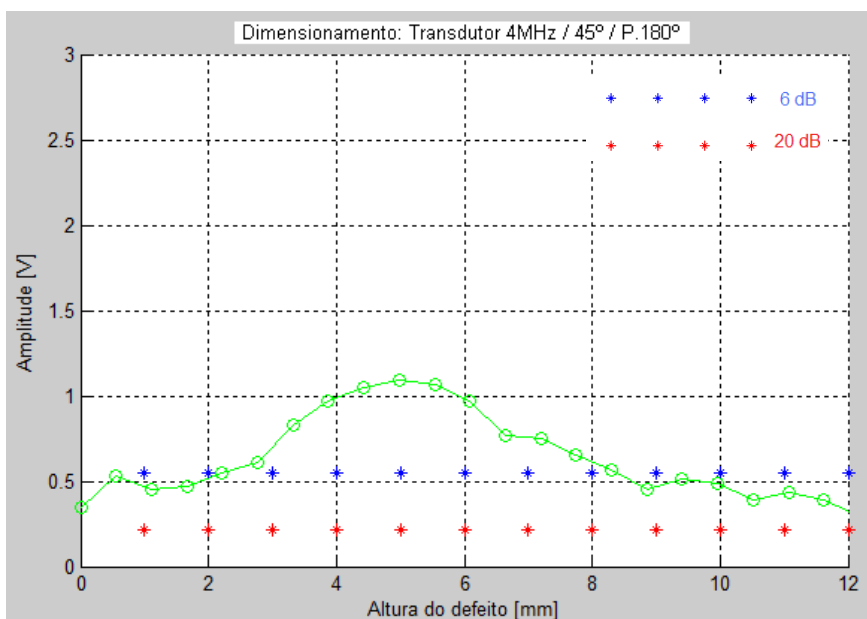


Figura 4.88 – Dimensionamento da altura do defeito.

4.6.14 POSIÇÃO 180° TRANSDUTOR 60°

Varição da amplitude, figura 4.89, ao longo da varredura feita com o transdutor de 60° com um passo manual de aproximadamente 1mm x 1mm.

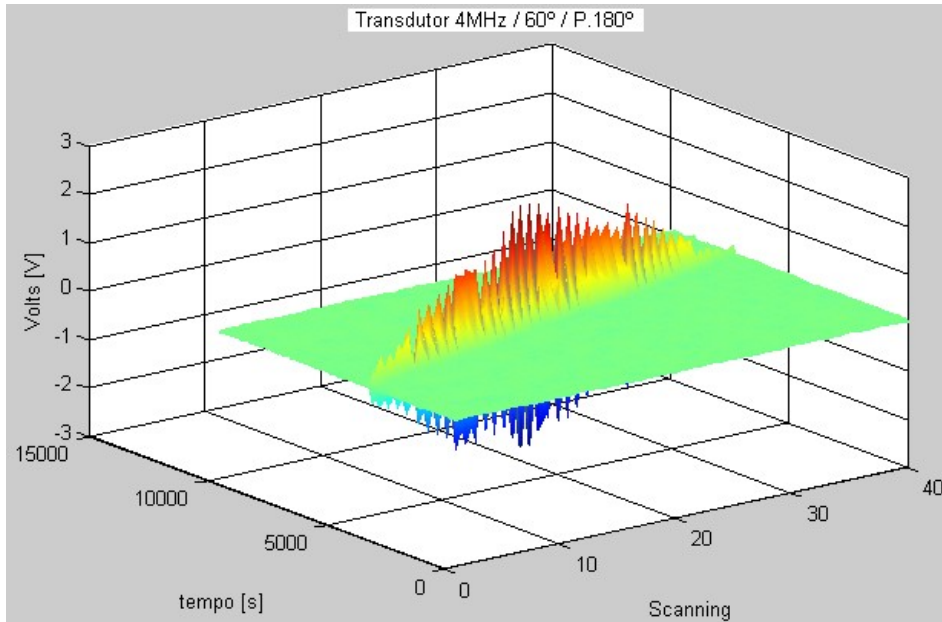


Figura 4.89 – Variação da amplitude ao longo da varredura.

Conseqüentemente ao realizar a varredura no sentido longitudinal do duto foi realizado o dimensionamento da altura do defeito, com o transdutor de 60°, como mostrado na figura 4.90 abaixo.

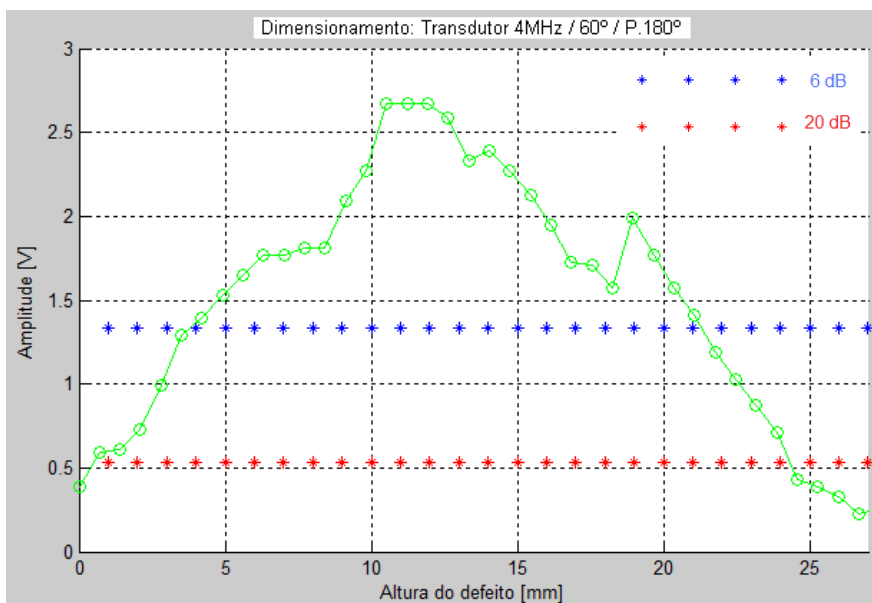


Figura 4.90 – Dimensionamento da altura do defeito.

4.6.15 POSIÇÃO 180° TRANSDUTOR 70°

Varição da amplitude, figura 4.91, ao longo da varredura feita com o transdutor de 70° com um passo manual de aproximadamente 1mm x 1mm.

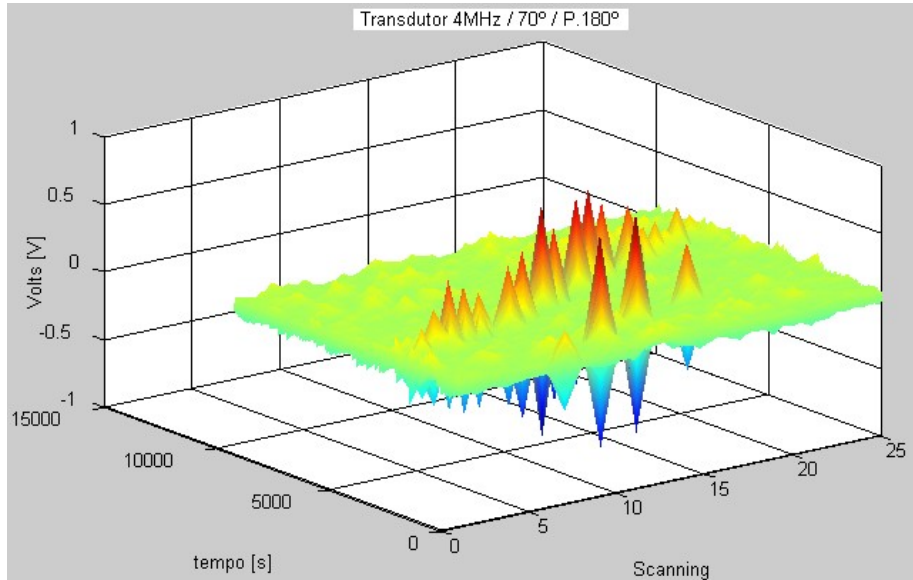


Figura 4.91 – Variação da amplitude ao longo da varredura.

Conseqüentemente ao realizar a varredura no sentido longitudinal do duto foi realizado o dimensionamento da altura do defeito, com o transdutor de 70°, como mostrado na figura 4.92 abaixo.

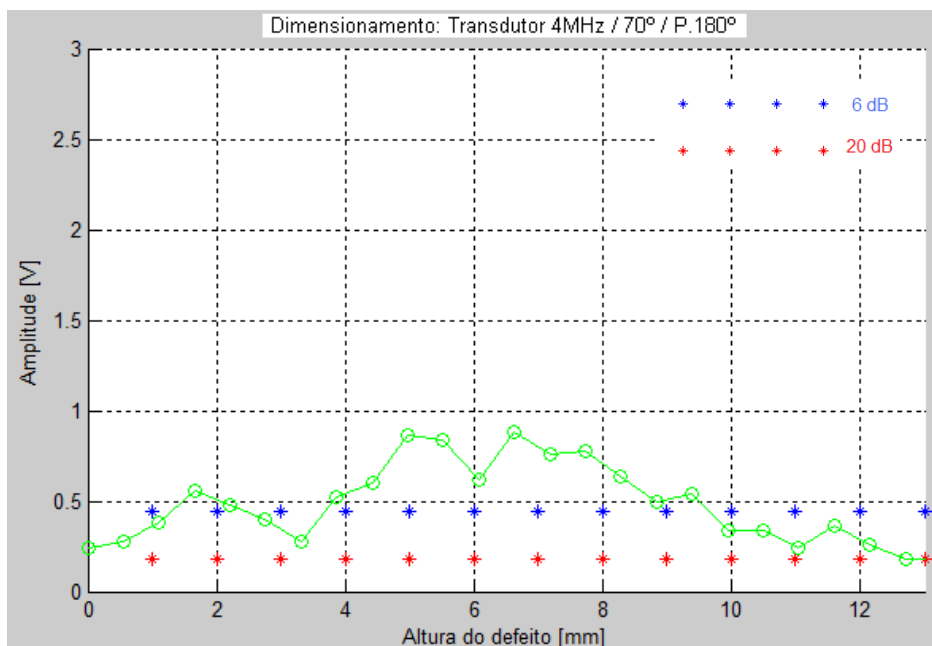


Figura 4.92 – Dimensionamento da altura do defeito.

4.6.16 POSIÇÃO 225° TRANSDUTOR DE 45°

Variação da amplitude, figura 4.93, ao longo da varredura feita com o transdutor de 45° com um passo manual de aproximadamente 1mm x 1mm.

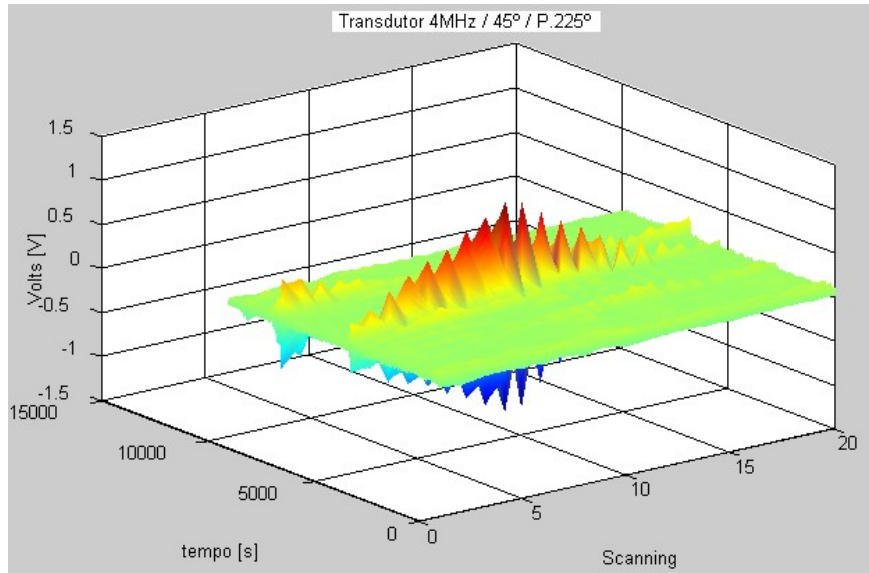


Figura 4.93 – Variação da amplitude ao longo da varredura.

Conseqüentemente ao realizar a varredura no sentido longitudinal do duto foi realizado o dimensionamento da altura do defeito, com o transdutor de 45°, como mostrado na figura 4.94 abaixo.

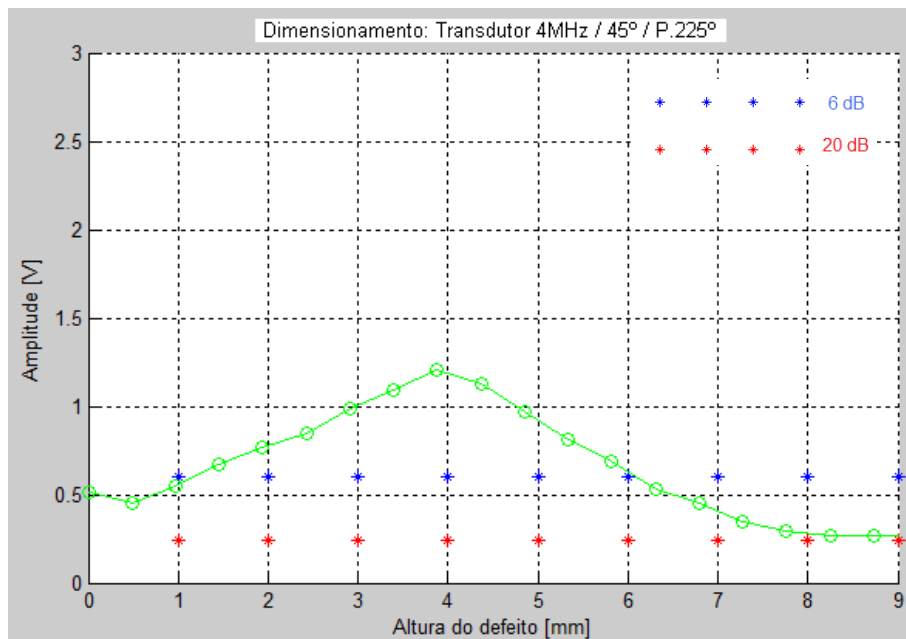


Figura 4.94 – Dimensionamento da altura do defeito.

4.6.17 POSIÇÃO 225° TRANSDUTOR 60°

Varição da amplitude, figura 4.95, ao longo da varredura feita com o transdutor de 60° com um passo manual de aproximadamente 1mm x 1mm.

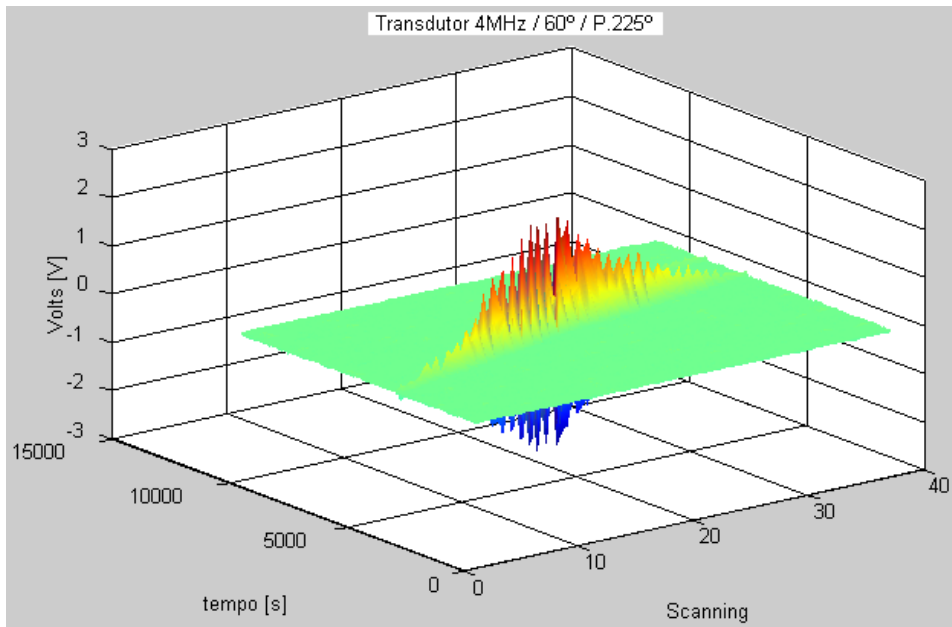


Figura 4.95 – Variação da amplitude ao longo da varredura.

Conseqüentemente ao realizar a varredura no sentido longitudinal do duto foi realizado o dimensionamento da altura do defeito, com o transdutor de 60°, como mostrado na figura 4.96 abaixo.

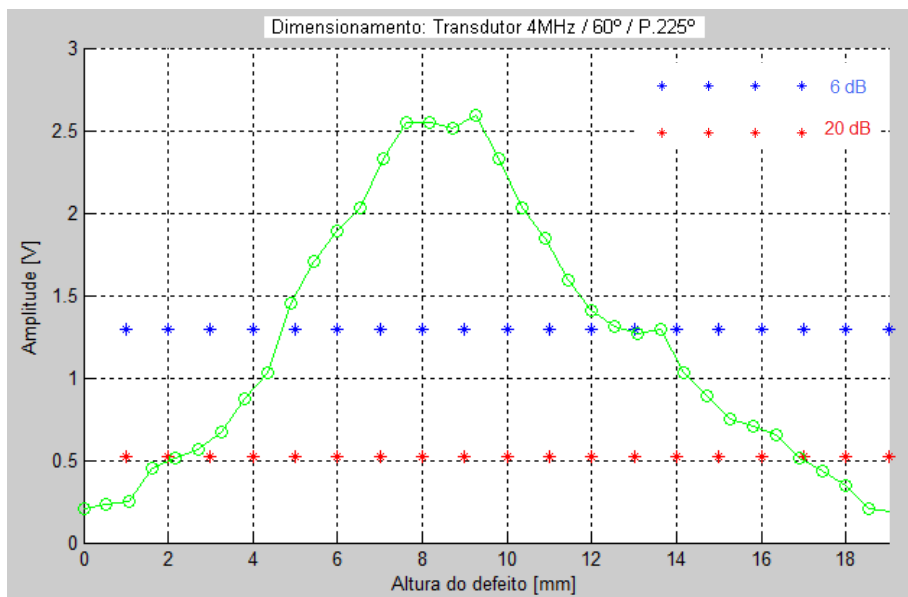


Figura 4.96 – Dimensionamento da altura do defeito.

4.6.18 POSIÇÃO 225° TRANSDUTOR 70°

Varição da amplitude, figura 4.97, ao longo da varredura feita com o transdutor de 70° com um passo manual de aproximadamente 1mm x 1mm.

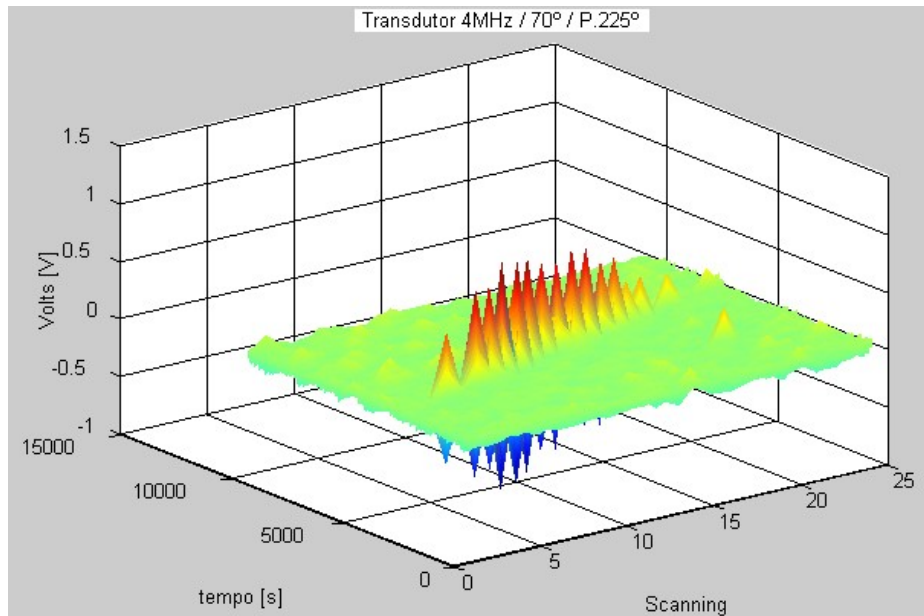


Figura 4.97 – Variação da amplitude ao longo da varredura.

Conseqüentemente ao realizar a varredura no sentido longitudinal do duto foi realizado o dimensionamento da altura do defeito, com o transdutor de 70°, como mostrado na figura 4.98 abaixo.

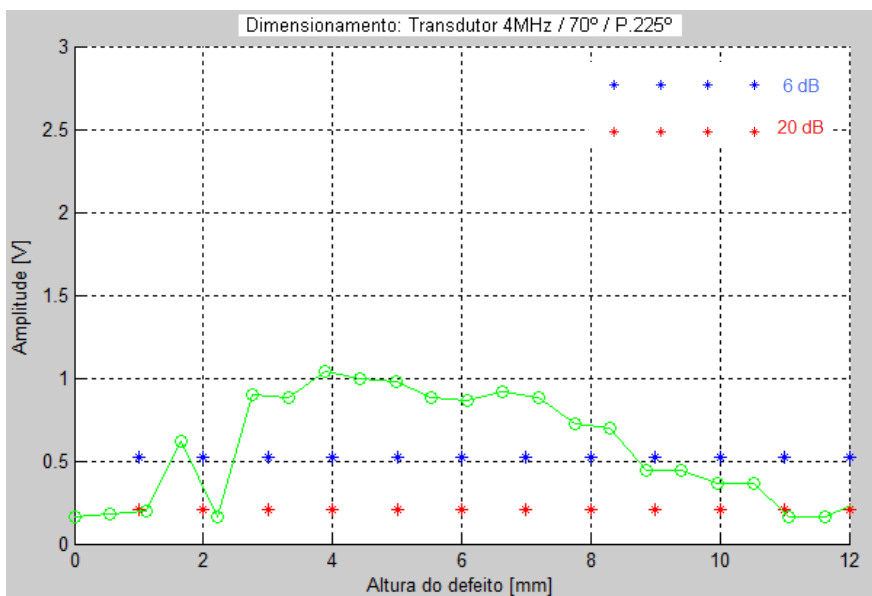


Figura 4.98 – Dimensionamento da altura do defeito.

4.6.19 POSIÇÃO 45° TRANSDUTOR DE 270°

Varição da amplitude, figura 4.99, ao longo da varredura feita com o transdutor de 45° com um passo manual de aproximadamente 1mm x 1mm.

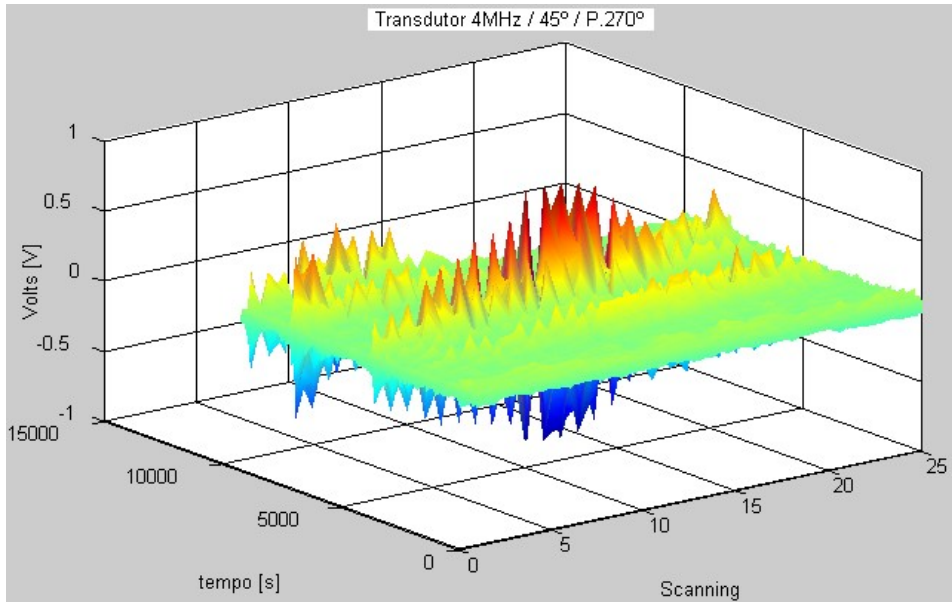


Figura 4.99 – Variação da amplitude ao longo da varredura.

Conseqüentemente ao realizar a varredura no sentido longitudinal do duto foi realizado o dimensionamento da altura do defeito, com o transdutor de 45°, como mostrado na figura 4.100 abaixo.

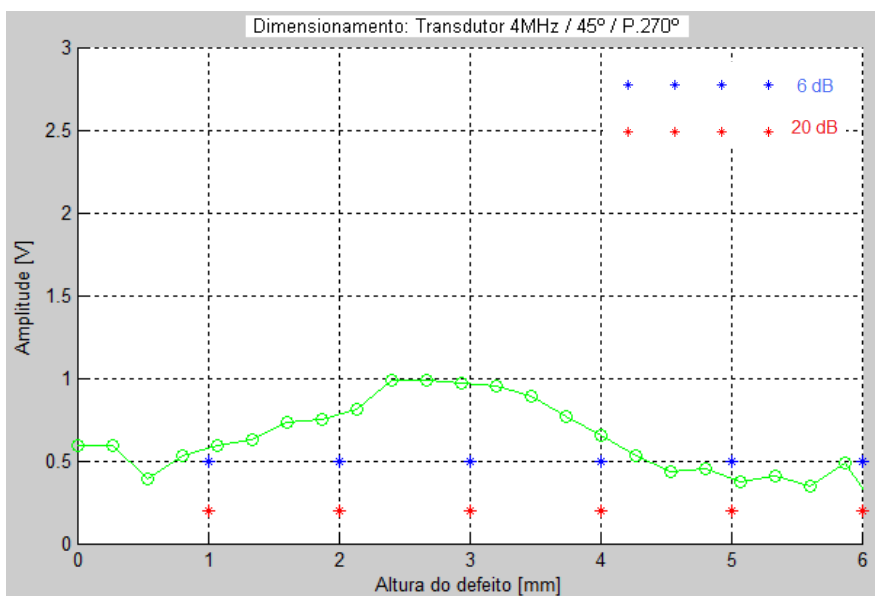


Figura 4.100 – Dimensionamento da altura do defeito.

4.6.20 POSIÇÃO 270° TRANSDUTOR 60°

Variação da amplitude, figura 4.101, ao longo da varredura feita com o transdutor de 60° com um passo manual de aproximadamente 1mm x 1mm.

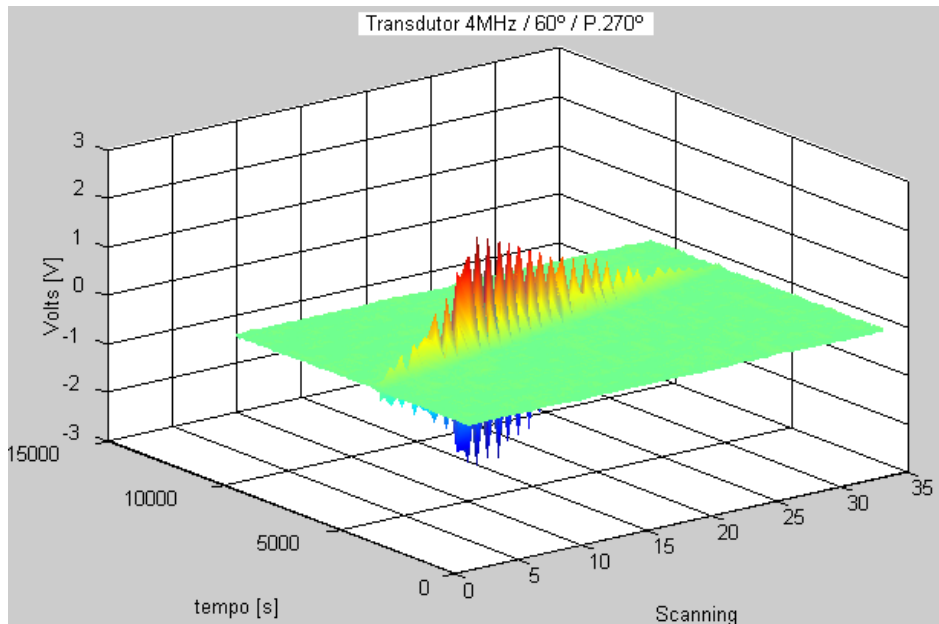


Figura 4.101 – Variação da amplitude ao longo da varredura.

Conseqüentemente ao realizar a varredura no sentido longitudinal do duto foi realizado o dimensionamento da altura do defeito, com o transdutor de 60°, como mostrado na figura 4.102 abaixo.

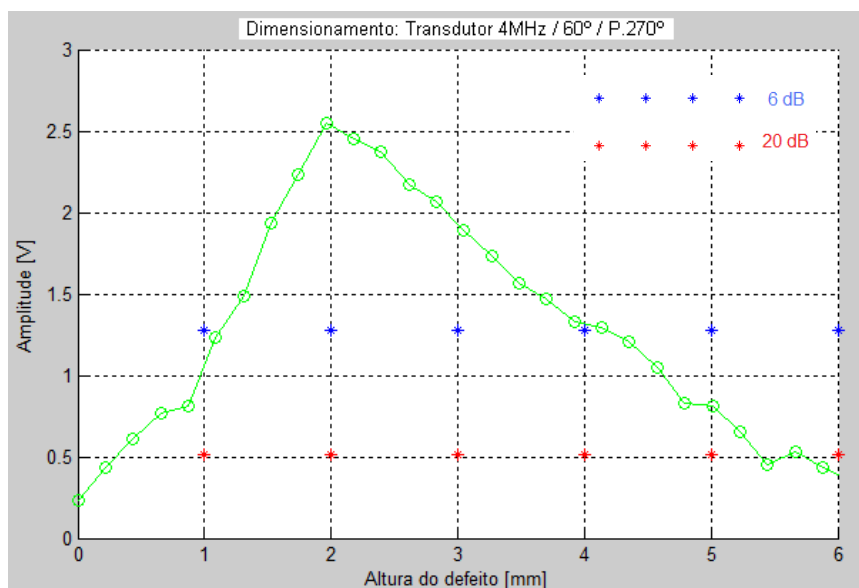


Figura 4.102 – Dimensionamento da altura do defeito.

4.6.21 POSIÇÃO 270° TRANSDUTOR 70°

Variação da amplitude, figura 4.103, ao longo da varredura feita com o transdutor de 70° com um passo manual de aproximadamente 1mm x 1mm.

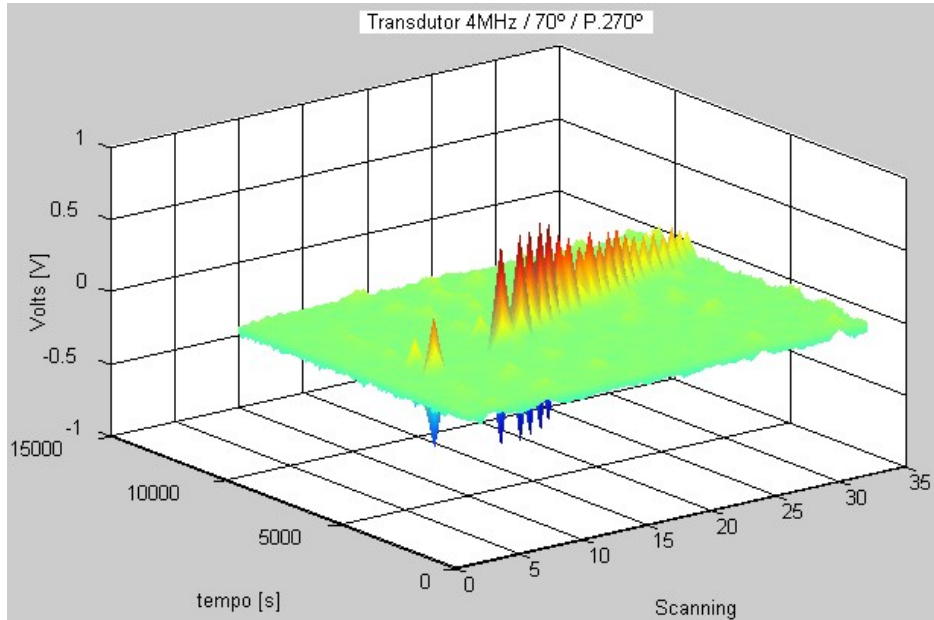


Figura 4.103 – Variação da amplitude ao longo da varredura.

Conseqüentemente ao realizar a varredura no sentido longitudinal do duto foi realizado o dimensionamento da altura do defeito, com o transdutor de 70°, como mostrado na figura 4.104 abaixo.

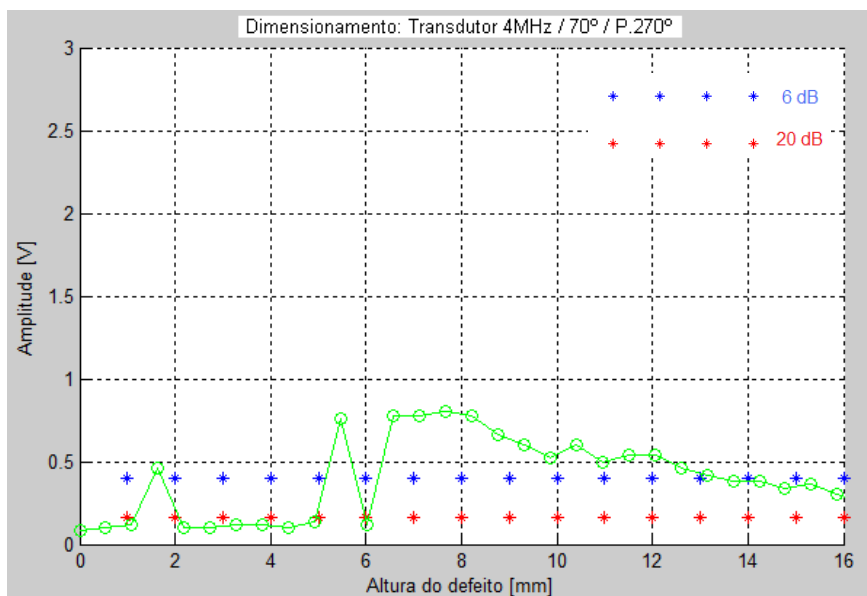


Figura 4.104 – Dimensionamento da altura do defeito.

4.6.22 POSIÇÃO 315° TRANSDUTOR DE 45°

Varição da amplitude, figura 4.105, ao longo da varredura feita com o transdutor de 45° com um passo manual de aproximadamente 1mm x 1mm.

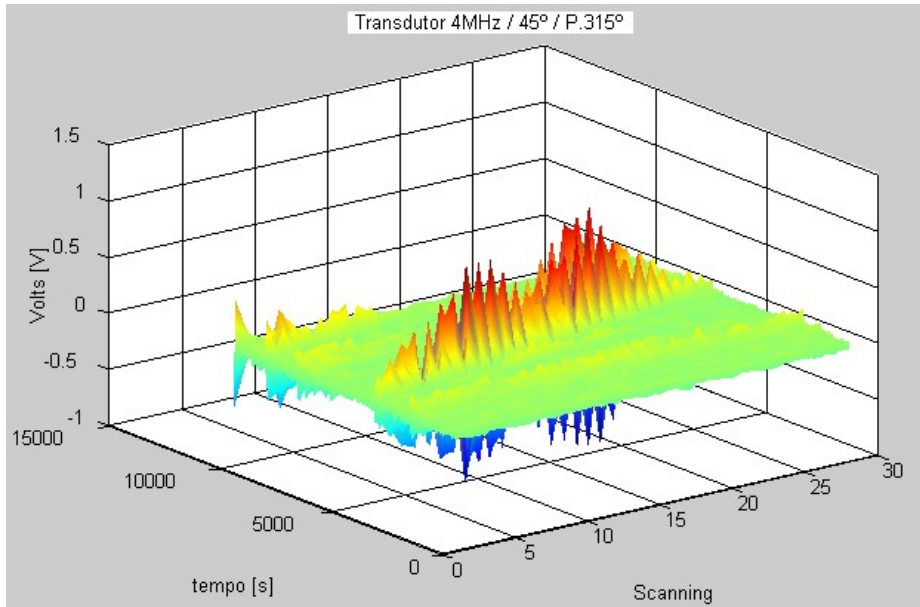


Figura 4.105 – Variação da amplitude ao longo da varredura.

Conseqüentemente ao realizar a varredura no sentido longitudinal do duto foi realizado o dimensionamento da altura do defeito, com o transdutor de 45°, como mostrado na figura 4.106 abaixo.

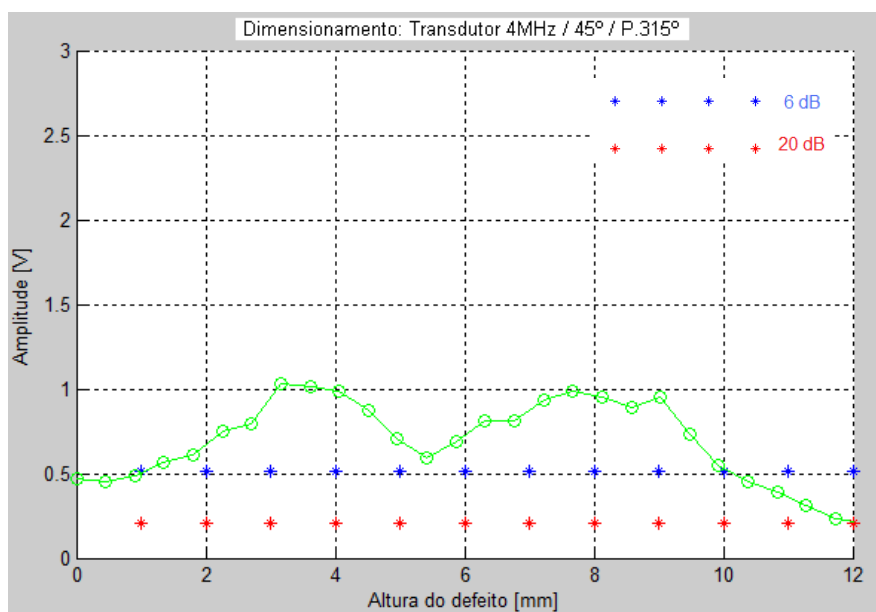


Figura 4.106 – Dimensionamento da altura do defeito.

4.6.23 POSIÇÃO 315° TRANSDUTOR 60°

Varição da amplitude, figura 4.107, ao longo da varredura feita com o transdutor de 60° com um passo manual de aproximadamente 1mm x 1mm.

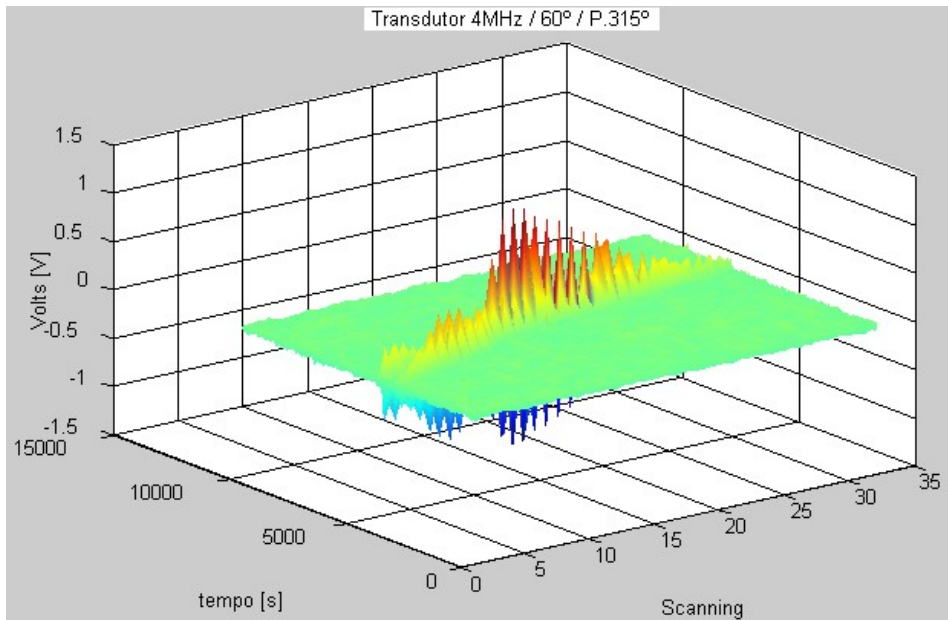


Figura 4.107 – Variação da amplitude ao longo da varredura.

Conseqüentemente ao realizar a varredura no sentido longitudinal do duto foi realizado o dimensionamento da altura do defeito, com o transdutor de 60°, como mostrado na figura 4.108 abaixo.

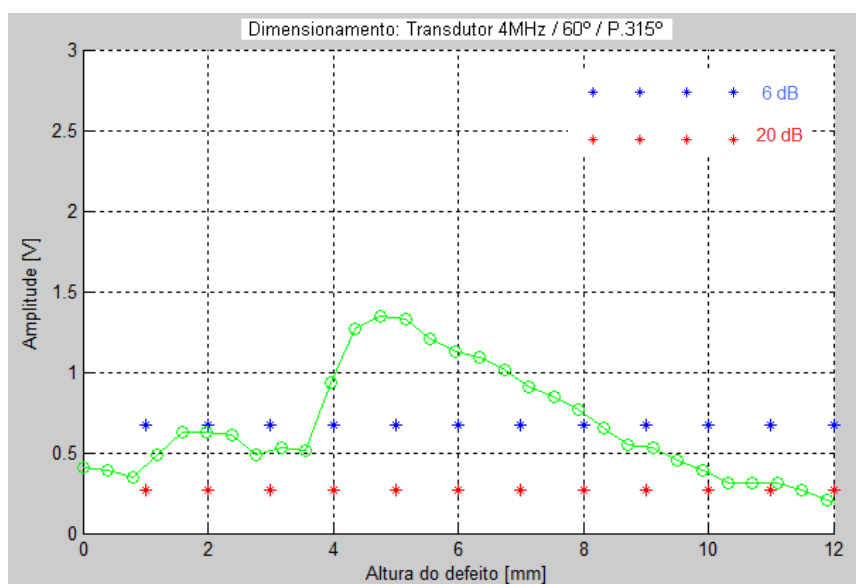


Figura 4.109 – Dimensionamento da altura do defeito.

4.6.24 POSIÇÃO 315° TRANSDUTOR 70°

Variação da amplitude, figura 4.110, ao longo da varredura feita com o transdutor de 70° com um passo manual de aproximadamente 1mm x 1mm.

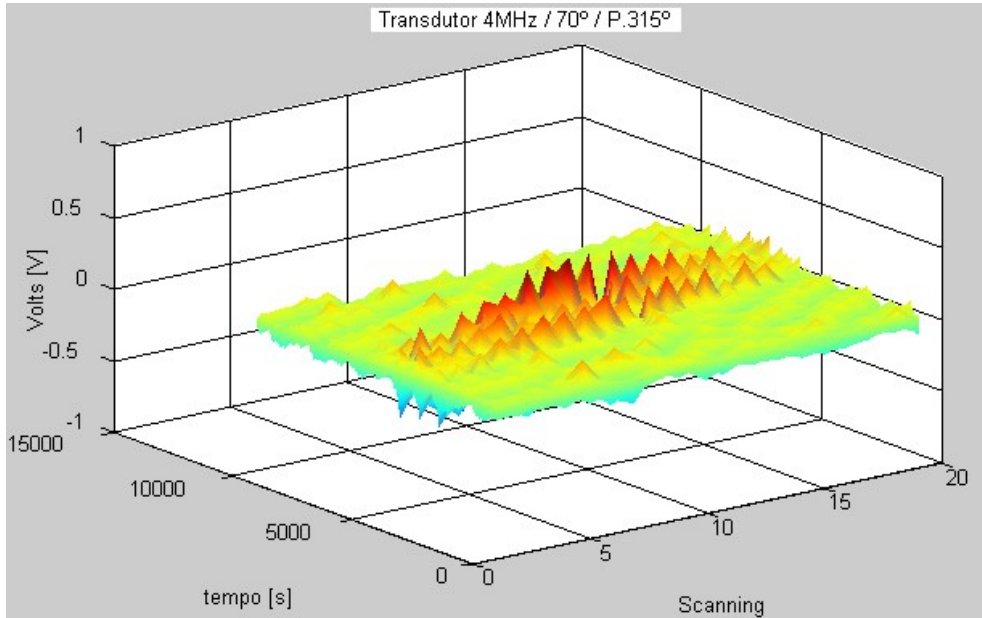


Figura 4.110 – Variação da amplitude ao longo da varredura.

Conseqüentemente ao realizar a varredura no sentido longitudinal do duto foi realizado o dimensionamento da altura do defeito, com o transdutor de 70°, como mostrado na figura 4.111 abaixo.

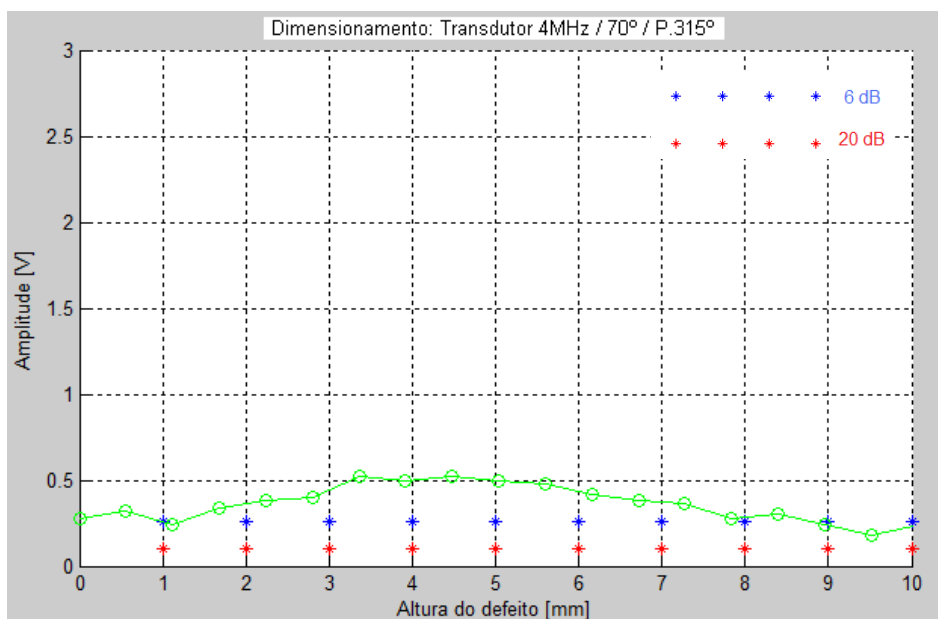


Figura 4.111 – Dimensionamento da altura do defeito.

4.7 COMPARAÇÃO DOS TRANSDUTORES DE 4MHZ DE 45, 60 E 70°

Nesse item serão apresentados os resultados da comparação das amplitudes dos transdutores de mesma frequência, de 4MHz, no entanto com os três ângulos de incidência diferentes (45, 60 e 70°).

Com a finalidade de analisar as possíveis diferenças das respostas dos sinais ultra-sônicos de cada transdutor, estes, serão apresentados em um único gráfico dos sub-itens 4.7.1 ao 4.7.8.

Todos os resultados são apresentados nas figuras 4.112 até 4.119.

Vale ressaltar que dos oito resultados obtidos na comparação das amplitudes dos transdutores de 4MHz, todos os resultados apresentaram os valores esperados, ou seja, em todos os casos a resposta da amplitude dos sinais do transdutor de 60° foi mais alta em relação aos transdutores de 45° e 70°.

Quando uma onda ultra-sônica encontra uma fronteira do meio em que está se propagando (isto é, a superfície de uma trinca, por exemplo) pode acontecer que ela se divida em duas ou mais partes ou que ocorra o fenômeno da reflexão. No entanto, só é possível detectar um sinal, se somente os feixes da onda incidirem perpendicularmente à superfície de uma trinca, gerando um eco na tela do equipamento.

Mediante ao que foi exposto no parágrafo acima, as maiores amplitudes dos ecos na tela do equipamento, felizmente, são referentes às amplitudes do transdutor de 60°.

O fato da amplitude ser mais alta no transdutor de 60° é devido à incidência, praticamente, normal à superfície do bisel que apresenta uma angulação de 35°.

O ângulo do bisel é informado no item 3.6 do presente trabalho, logo a maior amplitude seria com um transdutor de 55°, pois é o ângulo complementar de 35° formando 90°, ou seja, total incidência perpendicular à superfície.

Como no presente trabalho foram utilizados os transdutores de 45°, 60° e 70° o ângulo que mais se aproxima da incidência perpendicular à superfície (55°) é o transdutor com ângulo de 60°.

4.7.1 POSIÇÃO 0°, TRANSDUTORES DE 4MHZ DE 45, 60 E 70°

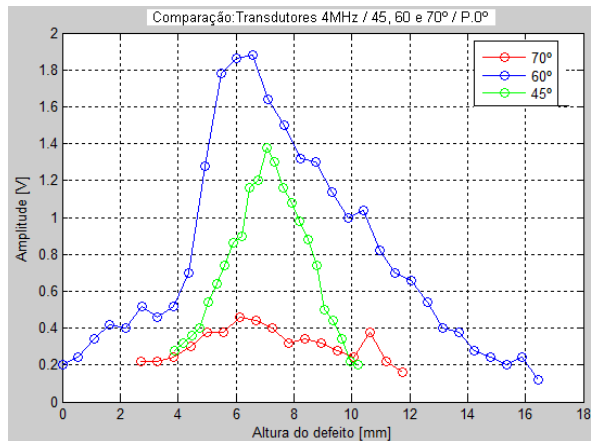


Figura 4.112 – Amplitudes do transdutor de 4MHz de 45, 60 e 70° na P.0°

4.7.2 POSIÇÃO 45°, TRANSDUTORES DE 4MHZ DE 45, 60 E 70°

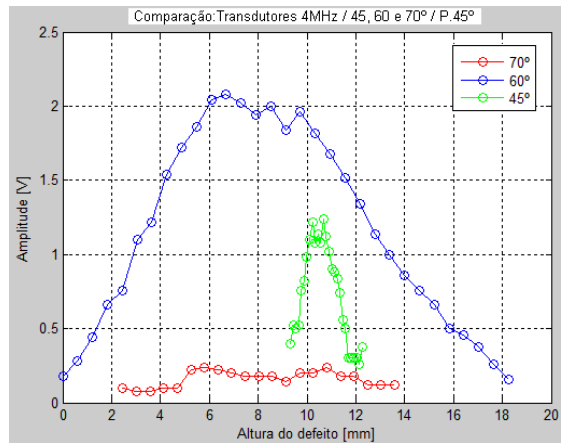


Figura 4.113 – Amplitudes do transdutor de 4MHz de 45, 60 e 70° na P.45°

4.7.3 POSIÇÃO 90°, TRANSDUTORES DE 4MHZ DE 45, 60 E 70°

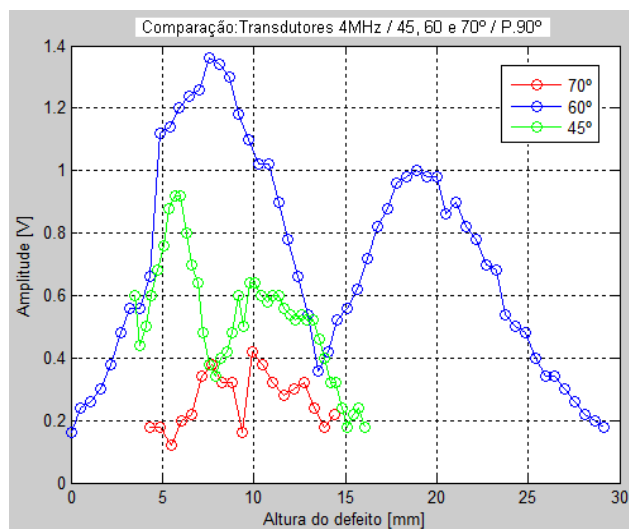


Figura 4.114 – Amplitudes do transdutor de 4MHz de 45, 60 e 70° na P.90°

4.7.4 POSIÇÃO 135°, TRANSDUTORES DE 4MHZ DE 45, 60 E 70°

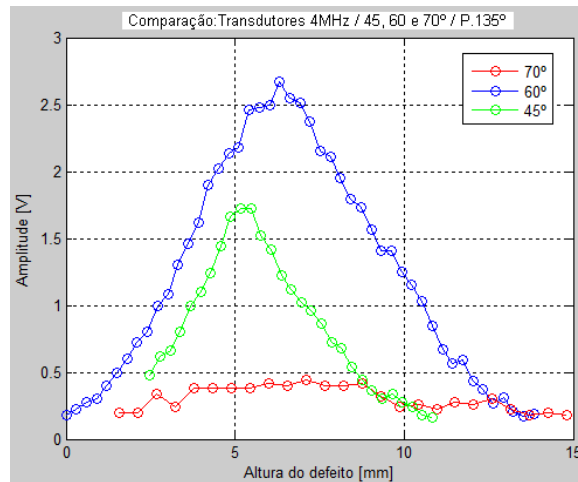


Figura 4.115 – Amplitudes do transdutor de 4MHz de 45, 60 e 70° na P.135°

4.7.5 POSIÇÃO 180°, TRANSDUTORES DE 4MHZ DE 45, 60 E 70°

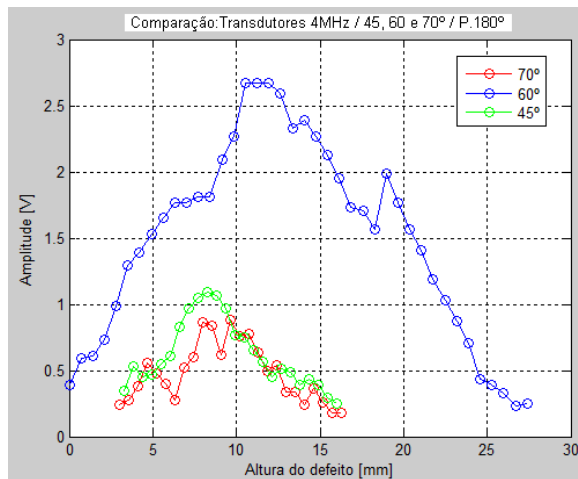


Figura 4.116 – Amplitudes do transdutor de 2MHz de 45, 60 e 70° na P.180°

4.7.6 POSIÇÃO 225°, TRANSDUTORES DE 4MHZ DE 45, 60 E 70°

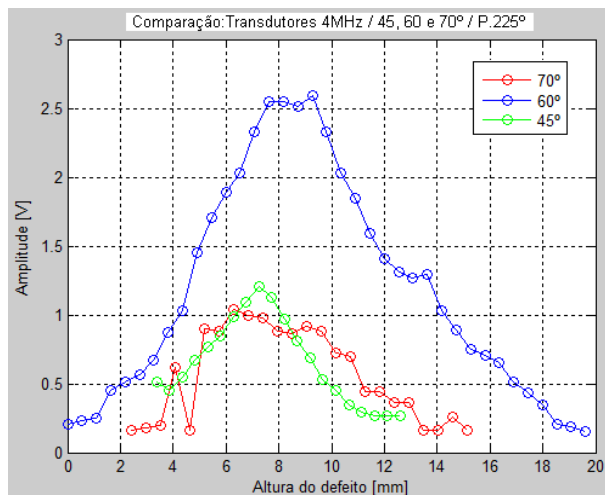


Figura 4.117 – Amplitudes do transdutor de 4MHz de 45, 60 e 70° na P.225°

4.7.7 POSIÇÃO 270°, TRANSDUTORES DE 4MHz DE 45, 60 E 70°

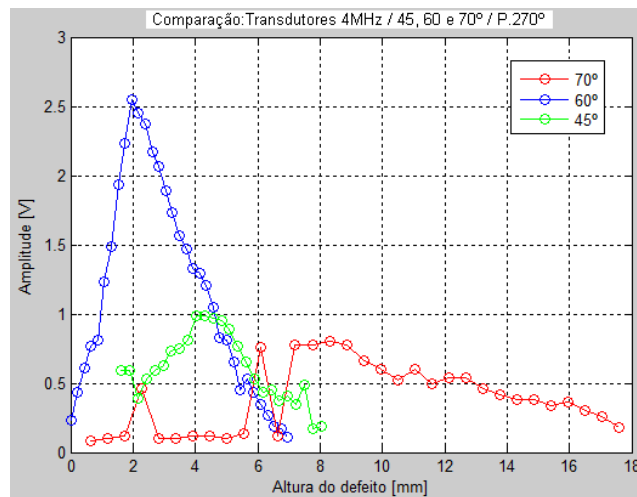


Figura 4.118 – Amplitudes do transdutor de 2MHz de 45, 60 e 70° na P.270°

4.7.8 POSIÇÃO 315°, TRANSDUTORES DE 4MHz DE 45, 60 E 70°

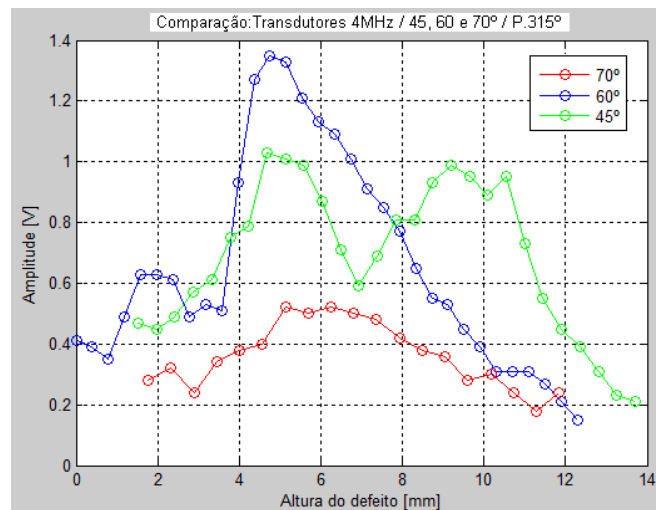


Figura 4.119 – Amplitudes do transdutor de 4MHz de 45, 60 e 70° na P.315°

4.8 DIMENSÃO DOS DEFEITOS

Nesse item será apresentada a Tabela 7 a fim de sintetizar todas as alturas dos defeitos que já foram mostrados de outra maneira pelos gráficos dos sub-itens 4.6.1 ao 4.6.24 dos transdutores de 4MHz.

Tabela 7 – Dimensionamento (mm) das alturas dos defeitos para os transdutores de 4 MHz

Posição circunferencial no Duto	Ângulo do Transdutor	Altura do Defeito (mm)
0°	45°	3,5
	60°	5,0
	70°	6,0
45°	45°	-
	60°	10,0
	70°	8,0
90°	45°	3,5 / 5,0
	60°	6,0 / 7,0
	70°	3,0 / 4,0
135°	45°	4,0
	60°	6,0
	70°	7,0
180°	45°	6,0
	60°	15,0
	70°	6,0
225°	45°	5,0
	60°	7,0
	70°	5,5
270°	45°	3,0
	60°	3,0
	70°	5,0
315°	45°	5,0
	60°	4,5
	70°	7,0

Em vista da Tabela 7 exposta acima, fica claro que os dimensionamentos entre os três ângulos dos transdutores do atual trabalho foram coerentes.

Como descrito no item 4.3 foi utilizado o MATLAB para plotar gráficos informando as alturas dos defeitos. Os valores na tabela em questão simplesmente foram retirados das figuras 4.7 até 4.54. Sendo que a leitura foi

feita tomando como referência a linha dos 6dB (em azul) mostrada em cada figura dos dimensionamentos, ver as mesmas figuras de 4.7 até 4.54.

Somente dois valores estão escritos de vermelhos, os mesmos significam que o valor marcado excede mais que o dobro das medidas dos outros transdutores na mesma posição. Como ilustrado nas Tabelas 8, 9 e 10.

Tabela 8 – Medida não registrada na posição 45°.

45°	45°	-
	60°	10,0
	70°	8,0

Tabela 9 – Medidas marcadas na cor azul na posição 90°.

90°	45°	3,5 / 5,0
	60°	6,0 / 7,0
	70°	3,0 / 4,0

Tabela 10 – Medidas marcadas na cor vermelha na posição 180°.

180°	45°	6,0
	60°	15,0
	70°	6,0

Esse fato pode ter ocorrido devido à imprecisão do executante durante o atual trabalho. Outro fato que pode ter corroborado foi a grande abertura que os transdutores de 70° apresentam, ou seja, grande dissipação de energia e conseqüentemente um mau registro.

Os resultados marcados na Tabela 7 da cor azul apresentam dois valores para cada ângulo do transdutor, conforme ilustrado na Figura 4.75 para o transdutor de 45°, na Figura 4.77 para o transdutor de 60° e na Figura 4.79 para o transdutor de 70°. Isto ocorreu devido à solda apresentar dois defeitos bem próximos, que foram mitigatoriamente detectados pelo ensaio de ultrassom.

A metodologia adotada no presente trabalho foi bastante coerente e permitiu uma detecção consistente das alturas dos defeitos, pois somente duas alturas das vinte e quatro se desviaram do esperado.

4.9 COMPARAÇÃO DOS TRANSDUTORES DE 2 E 4 MHz

Nesse item será mostrado por gráficos uma comparação dos transdutores de frequências diferentes (2 e 4 MHz) com ângulos iguais, quer seja de 45 ou 60 ou 70°. Pode-se constatar que a amplitude do sinal do transdutor de 4MHz é maior que o de 2MHz, pois quanto maior a frequência menor o comprimento de onda e conseqüentemente a resolução é maior, ou seja a amplitude do sinal é maior.

Os resultados são apresentados nas figuras de 4.220 até 4.243.

No geral, as amplitudes dos sinais dos transdutores de 4MHz são maiores que os transdutores de 2MHz.

Somente dois resultados dos dezesseis, oito de 45° e oito de 60°, como evidenciado nas figuras 4.238 e 4.241, não se enquadraram dentro do padrão esperado explicitado no primeiro parágrafo desse item.

Foram difíceis as análises comparativas dos transdutores de 70° para as diferentes frequências (2 e 4MHz), mediante ao fato de apresentarem grande área varrida do feixe, fato explicado no último parágrafo das páginas 53 e 54, mesmo assim somente em três resultados dos oito, vide figura 4.225, 4.231 e 4.234, não se enquadraram no que foi exposto no terceiro parágrafo deste item.

4.9.1 POSIÇÃO 0°, TRANSDUTORES DE 2 E 4MHz DE 45°; 60° E 70°

- ✓ Transdutores de 2 e 4MHz de 45°

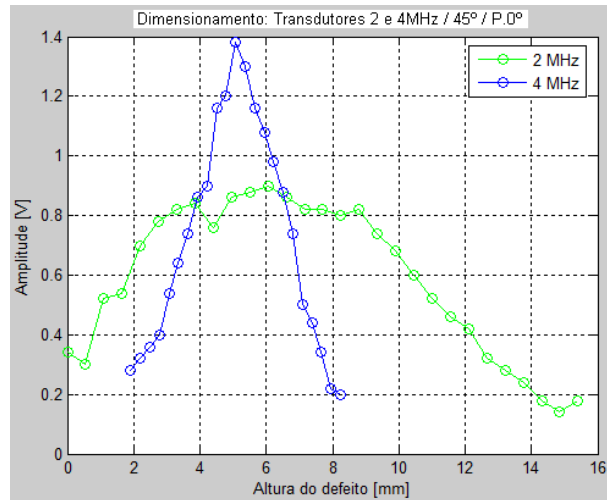


Figura 4.220 – Comparação 2 e 4MHz; 45°; P.0°

- ✓ Transdutores de 2 e 4MHz de 60°

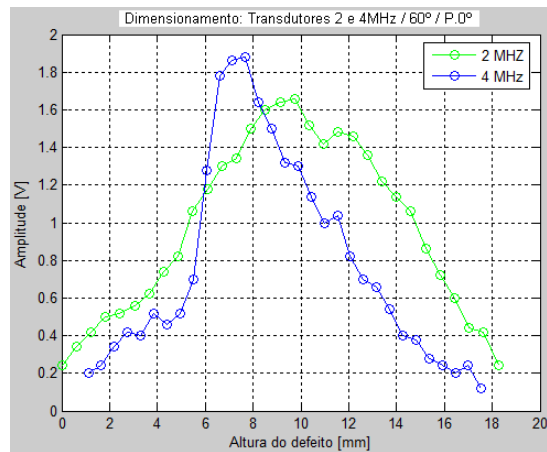


Figura 4.221 – Comparação 2 e 4MHz; 60°; P.0°

- ✓ Transdutores de 2 e 4MHz de 70°

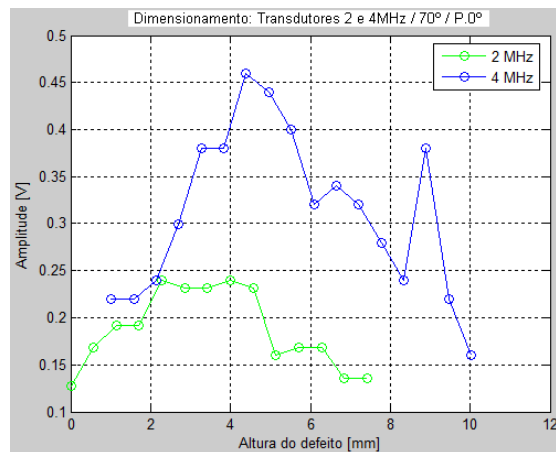


Figura 4.222 – Comparação 2 e 4MHz; 70°; P.0°

4.9.2 POSIÇÃO 45°, TRANSDUTORES DE 2 E 4MHz DE 45, 60 E 70°

- ✓ Transdutores de 2 e 4MHz de 45°

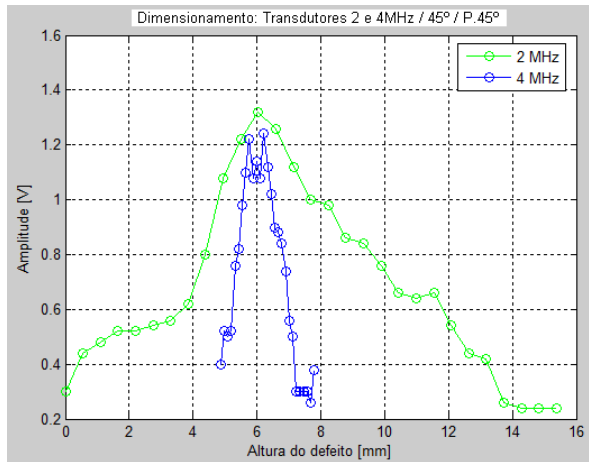


Figura 4.223 – Comparação 2 e 4MHz; 45°; P.45°

- ✓ Transdutores de 2 e 4MHz de 60°

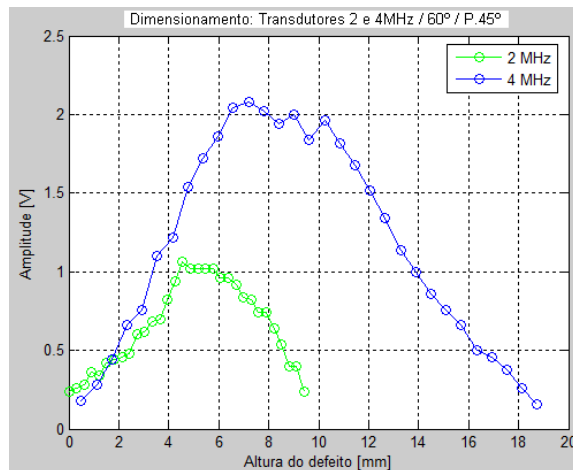


Figura 4.224 – Comparação 2 e 4MHz; 60°; P.45°

- ✓ Transdutores de 2 e 4MHz de 70°

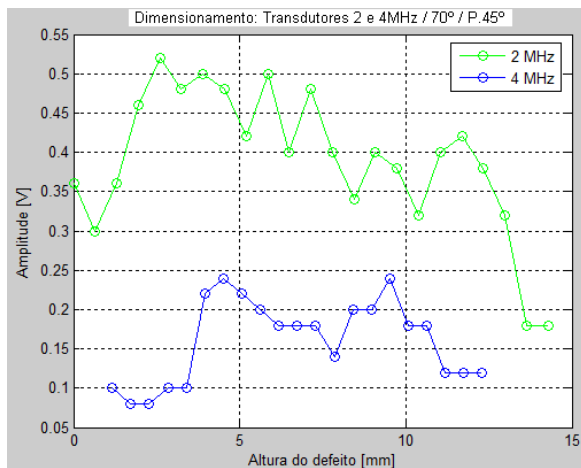


Figura 4.225 – Comparação 2 e 4MHz; 70°; P.45°

4.9.3 POSIÇÃO 90°, TRANSDUTORES DE 2 E 4MHZ DE 45, 60 E 70°

- ✓ Transdutores de 2 e 4MHz de 45°

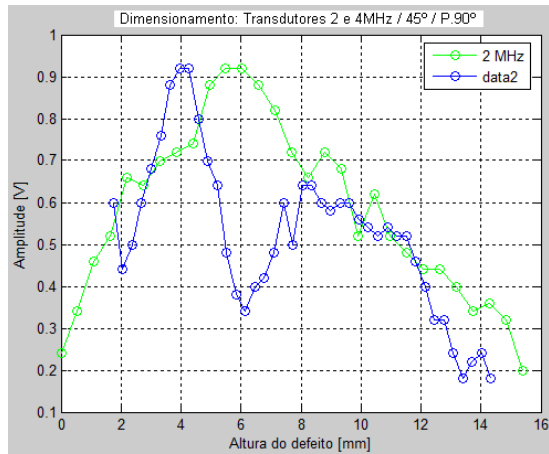


Figura 4.226 – Comparação 2 e 4MHz; 45°; P.90°

- ✓ Transdutores de 2 e 4MHz de 60°

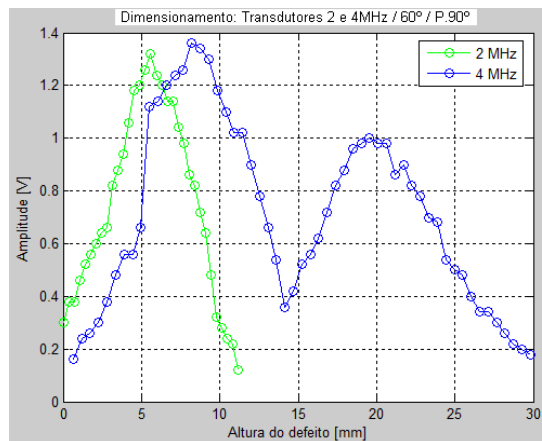


Figura 4.227 – Comparação 2 e 4MHz; 60°; P.90°

- ✓ Transdutores de 2 e 4MHz de 70°

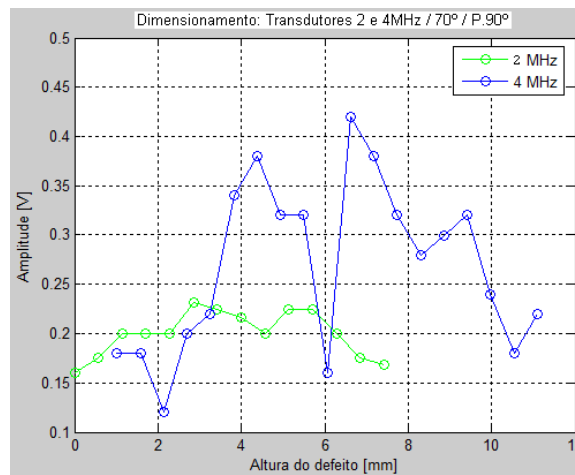


Figura 4.228 – Comparação 2 e 4MHz; 70°; P.90°

4.9.4 POSIÇÃO 135°, TRANSDUTORES DE 2 E 4MHz DE 45, 60 E 70°

- ✓ Transdutores de 2 e 4MHz de 45°

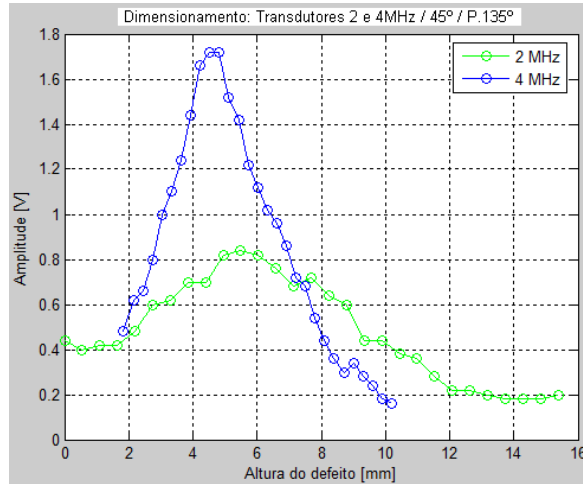


Figura 4.229 – Comparação 2 e 4MHz; 45°; P.135°

- ✓ Transdutores de 2 e 4MHz de 60°

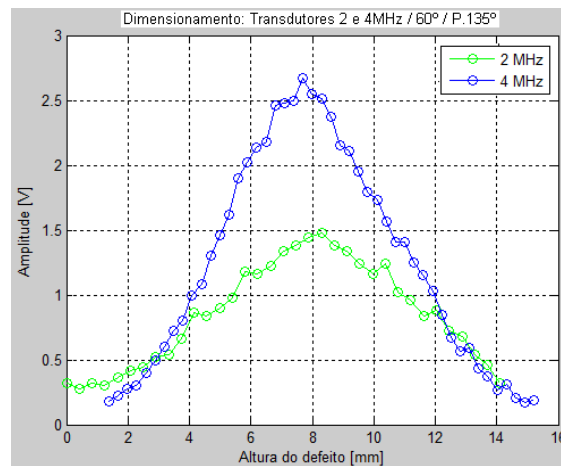


Figura 4.230 – Comparação 2 e 4MHz; 60°; P.135°

- ✓ Transdutores de 2 e 4MHz de 70°

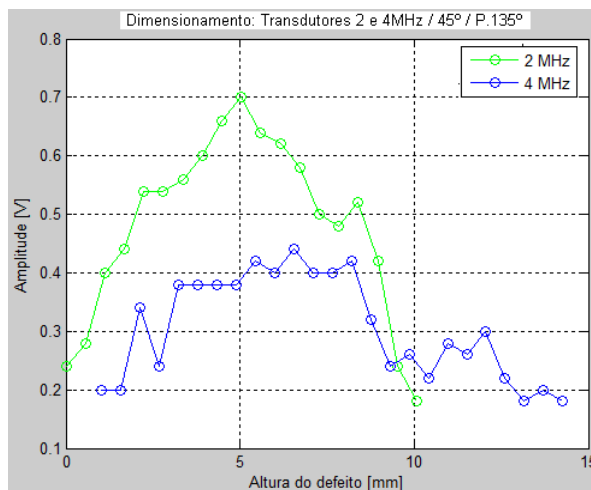


Figura 4.231 – Comparação 2 e 4MHz; 70°; P.135°

4.9.5 POSIÇÃO 180°, TRANSDUTORES DE 2 E 4MHz DE 45, 60 E 70°

- ✓ Transdutores de 2 e 4MHz de 45°

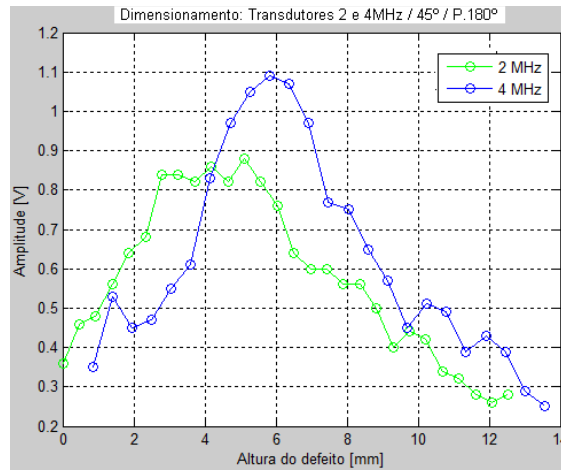


Figura 4.232 – Comparação 2 e 4MHz; 45°; P.180°

- ✓ Transdutores de 2 e 4MHz de 60°

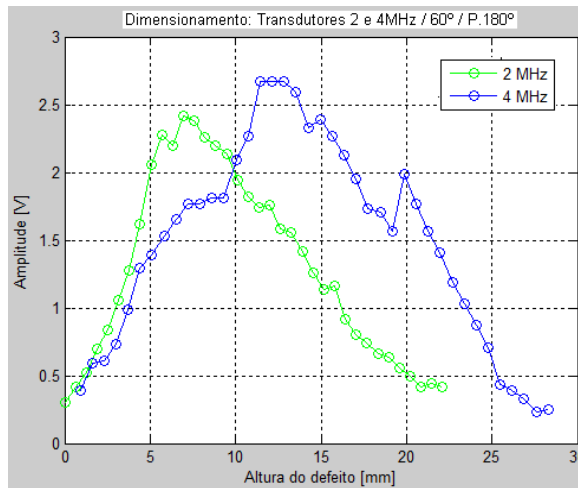


Figura 4.233 – Comparação 2 e 4MHz; 60°; P.180°

- ✓ Transdutores de 2 e 4MHz de 70°

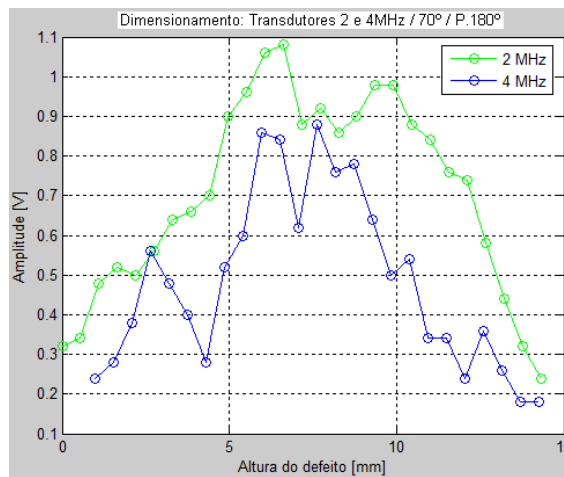


Figura 4.234 – Comparação 2 e 4MHz; 70°; P.180°

4.9.6 POSIÇÃO 225°, TRANSDUTORES DE 2 E 4MHZ DE 45, 60 E 70°

- ✓ Transdutores de 2 e 4MHz de 45°

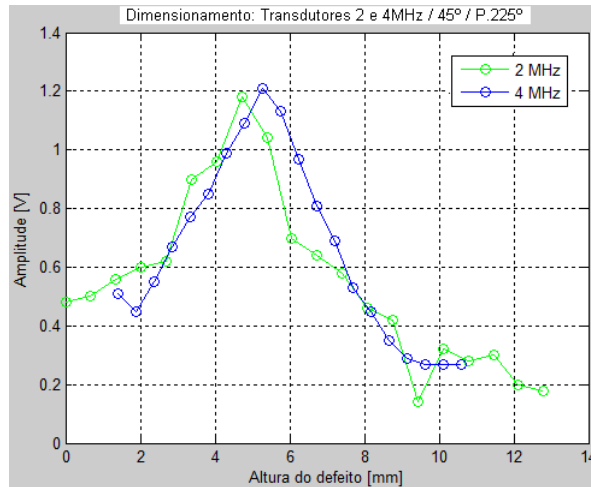


Figura 4.235 – Comparação 2 e 4MHz; 45°; P.225°

- ✓ Transdutores de 2 e 4MHz de 60°

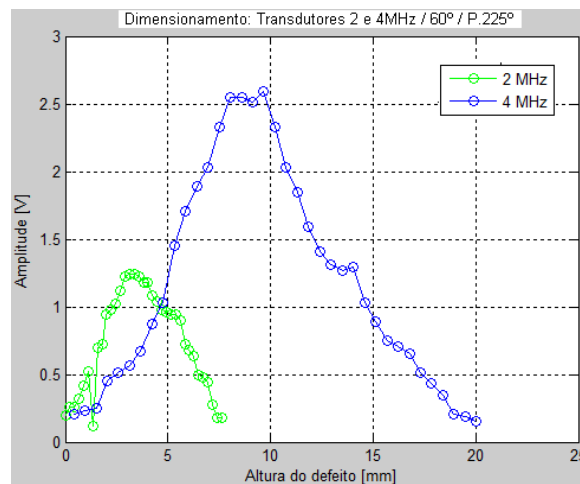


Figura 4.236 – Comparação 2 e 4MHz; 60°; P.225°

- ✓ Transdutores de 2 e 4MHz de 70°

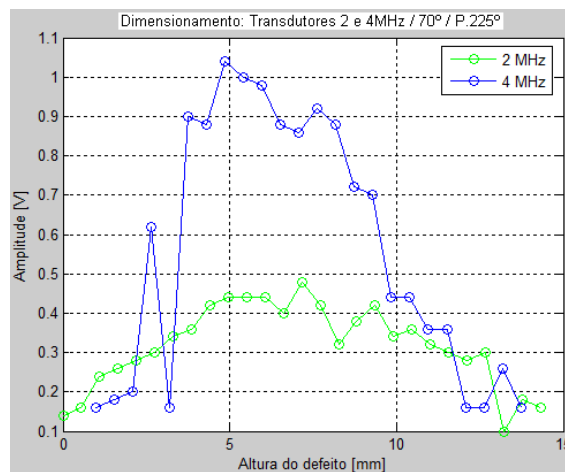


Figura 4.237 – Comparação 2 e 4MHz; 70°; P.225°

4.9.7 POSIÇÃO 270°, TRANSDUTORES DE 2 E 4MHz DE 45, 60 E 70°

- ✓ Transdutores de 2 e 4MHz de 45°

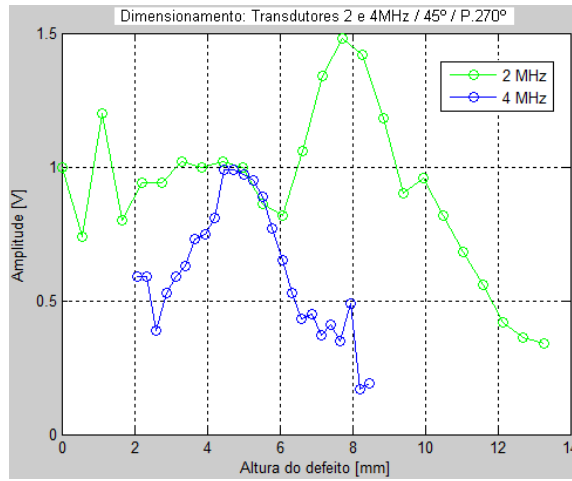


Figura 4.238 – Comparação 2 e 4MHz; 45°; P.270°

- ✓ Transdutores de 2 e 4MHz de 60°

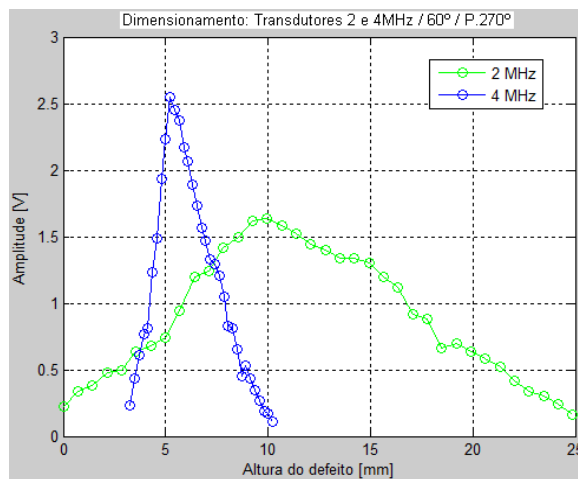


Figura 4.239 – Comparação 2 e 4MHz; 60°; P.270°

- ✓ Transdutores de 2 e 4MHz de 70°

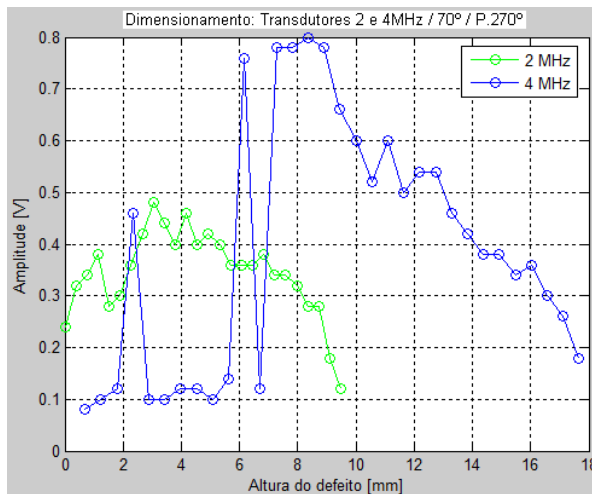


Figura 4.240 – Comparação 2 e 4MHz; 70°; P.270°

4.9.8 POSIÇÃO 315°, TRANSDUTORES DE 2 E 4MHz DE 45, 60 E 70°

- ✓ Transdutores de 2 e 4MHz de 45°

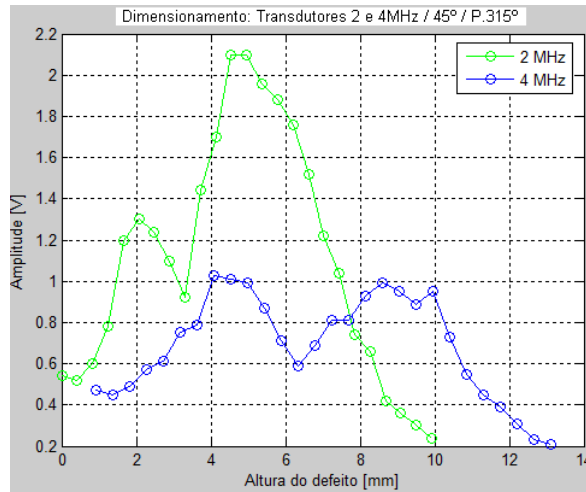


Figura 4.241 – Comparação 2 e 4MHz; 45°; P.315°

- ✓ Transdutores de 2 e 4MHz de 60°

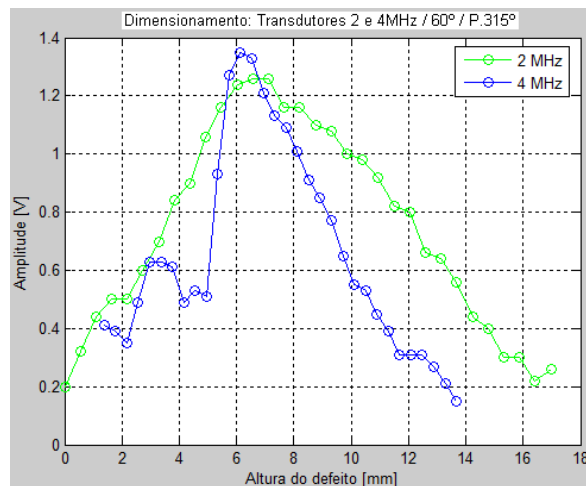


Figura 4.242 – Comparação 2 e 4MHz; 60°; P.315°

- ✓ Transdutores de 2 e 4MHz de 70°

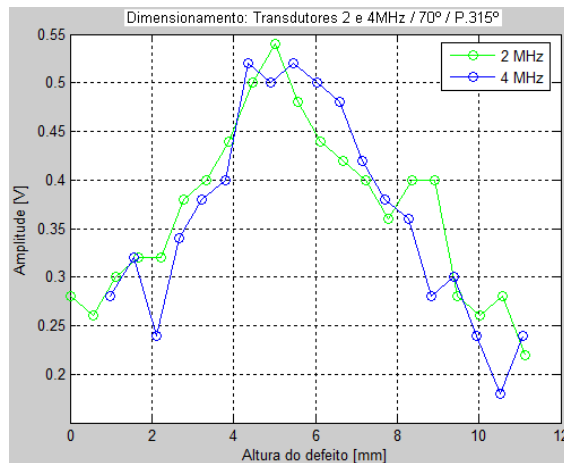


Figura 4.243 – Comparação 2 e 4MHz; 70°; P.315°

5 **CAPÍTULO 5: CONCLUSÃO**

5.1 **CONCLUSÃO**

Este trabalho teve como objetivo avaliar o comportamento do perfil sônico na detecção de um defeito de uma junta soldada de um duto especificação API 5L, em suma, quanto o defeito irá sonificar uma onda ultra-sônica.

As medidas foram realizadas com os equipamentos dispostos no antigo LABOEND atual LNDC e todos os resultados foram discutidos ao longo deste trabalho.

Foram utilizados programas de simulação como: CIVA, MATLAB visando provar e evidenciar a viabilidade da metodologia adotada.

A seguir são apresentadas as principais conclusões do presente trabalho:

- ✓ Foi possível determinar a abertura angular do feixe sônico de cada transdutor utilizado no trabalho.
- ✓ A metodologia adotada comprovou ser confiável para determinação da dimensão em uma única direção de um defeito.
- ✓ A partir dos resultados das amplitudes das ondas mostrou-se que o efeito da incidência perpendicularmente à superfície do defeito é mais relevante do que a sonificação pelo defeito da onda ultra-sônica.
- ✓ Os resultados obtidos a partir da metodologia explicitada no decorrer deste trabalho evidenciou que as amplitudes dos ecos para os transdutores de frequência 4MHz são maiores que as amplitudes dos transdutores de 2MHz.
- ✓ A tecnologia ultra-sônica é de extrema confiabilidade e um defeito pode ser minuciosamente detectado e analisado.

6 CAPÍTULO 6: SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

6.1 TRABALHOS FUTUROS

A partir dos resultados e análises do presente trabalho, são apontadas algumas sugestões e recomendações que podem ser úteis para eventuais estudos sobre o tema abordado, tais com:

- ✓ Realização de um novo ensaio ultra-sônico utilizando outro equipamento, seguindo os mesmos passos adotados do presente trabalho, para verificar a veracidade e reprodutibilidade dos resultados.

- ✓ Corte da junta soldada para verificar o dimensionamento do defeito, altura, utilizando a técnica de inspeção visual.

- ✓ Realização do mesmo ensaio com o mesmo equipamento, porém com outro tipo de solda para analisar e comparar os resultados.

7 CAPÍTULO 7: REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

[1] http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/Introduction/history.htmarticle/wcndt2004/pdf/materials_characterization/138_gur.pdf, acessado em Janeiro de 2009.

[2] Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos. “Ensaio Não Destrutivo Ultra-som”, São Paulo;

[3] ANDREUCCI, R.; Ensaio por Ultra-som – Aspectos Básicos, 3 ed., São Paulo, Abende (Associação Brasileira de Ensaios Não-Destrutivos), 2002;

[4] Nondestructive Evaluation and Quality Control, ASM Handbook, 3a. edição, Vol. 17, 1994;

[5] SANTIN, J.L., “Ultra-som Técnica e Aplicação”, 1a Edição, Rio de Janeiro, Editora Qualitymark, 1996;

[6] <http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/MasurementTech/anglebeam1.htm>;

[7] <http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/EquipmentTrans/radiatedfields.htm>;

[8] <http://www.signal-processing.com>;

[9] Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos. “Ensaio Não Destrutivo de Ultra-som”, São Paulo;

[10] <http://www.americanpiezo.com>;

[11] CARVALHO, A. A., Confiabilidade de Técnicas de Ensaio Não Destrutivos na Inspeção de dutos utilizados na Indústria de Petróleo, Tese de D. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2004;

[12] NEPOMUCENO, L. X., “Tecnologia ultra-sônica”, 1a edição, São Paulo, Editora Edgard Blücher, 1980;

[13] SOUZA, M. P V, Uma Comparação entre os Métodos Manual e Automatizado na Inspeção de Soldas Circunferenciais por Ultra-Som Utilizando a Técnica Pulso-Eco. PEMM/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2007;

[14] Associação Brasileira de Ensaio Não Destrutivos, PR-011 “Ultra-som Solda – Procedimento de END”, Revisão 11, 2004;

[15] Associação Brasileira de Ensaio Não Destrutivos, PR-042 “Ultra-som – Automático de Soldas – Procedimento de END”, Revisão 3, 2005;

[16] CARVALHO, A. A., Detecção de Descontinuidades pela Técnica Ultra-sônica Pulso-eco. Utilizando Um Sistema Multicanal. Tese de M. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2002;

[17] American Society for Nondestructive Testing, Nondestructive Testing Handbook, 2a. Edição, Vol. 7, 1991;

[18] MODENESI, Paulo Jr., “Soldagem I – Descontinuidades e inspeção em juntas soldadas”, UFMG, Novembro 2001;

[19] ESAB, “Apostila de Soldagem Mig / Mag” – Traduzido por Cleber fortes. Última revisão em Janeiro de 2005;

[20] RUMBOLD, J. G., “Multichannel Versus Multiplex Ultrasonic NDT Systems”, Materials Evaluation, Vol. 41, pp 1258-1260, October 1983;

[21] GINZEL, E., HOFF, M., "Further Developments in Ultrasonic Inspection of Pipeline Girth Welds", NDT.net, Vol. 1, No. 06, June 1996;

[22] AGTHOVEN, R. V., RAAD, J. A., "Reliability of Mechanised UT Systems to Inspect Girth Welds During Pipeline Construction", NDT.net, Vol. 3, No. 11, November 1998;

[23] GINZEL, E., BOER, P., HOFF, M., "Application of Mechanized Ultrasonic Inspection to Manually Welded Pipeline Girth Welds", NDT.net, Vol. 2, No. 05, May 1997;

[24] MILLER, M., MI, B., KITA, A., UME, I. C., Development of automated real-time data acquisition system for robotic weld quality monitoring, Mechatronics, Vol. 12, pp. 1259-1269, 2002;

[25] RAAD, J. A., DIJKSTRA, F. H., "Mechanised Ultrasonic on Girth Welds During Pipeline Construction", NDT.net, Vol. 3, No. 11, November 1998;

[26] RICHTER, M. R., QUADRADO, F. E., "END na Construção do Gasoduto Bolívia-Brasil (GASBOL)", XVII CONAEND - Congresso Nacional de Ensaio Não Destrutivos, pp 29-40, São Paulo, Agosto 1998;

[27] DUBÉ, N., MOLES, M., RUSSELL M., et al., "Mechanized Inspection of Girth Welds Using Ultrasonic Phased Array", 15th World Conference on Non-Destructive Testing, Roma, 15-21 October 2000;

[28] CARNEVAL, R. O., MARQUES, F. C. R., SMITH, M. A. O., "Inspeção de Casco de Navios do Tipo FPSO (Alternativas Possíveis)", XIX CONAEND – Congresso Nacional de Ensaio Não Destrutivos, pp 184-188, São Paulo, 21-23 Agosto;

[29] Gavira, Muriel de Oliveira, "Simulação computacional como uma ferramenta de aquisição de conhecimento", Tese de M. Sc, Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), Março, (2003).

[30] http://www-civa.cea.fr/home/liblocal/docs/INFO_LOGICIEL/CIVA9%20Description_GB.pdf;

[31] P. Calmon *, S. Mahaut, S. Chatillon, R. Raillon, "CIVA: An expertise platform for simulation and processing NDT data", Elsevier. French Atomic Energy Commission, CEA/LIST, CEA Saclay Bât. 611, 91191 Gif-sur-Yvette Cedex, France Available online 21 June 2006;

[32] Steve MAHAUT, Sébastien LONNE, Loïc de ROUMILLY, "Validation of CIVA Simulation Tools for Ultrasonic Inspection in Realistic Configuration". CEA Gérard CATTIAUX, IRSN/DSR/SAMS, Fontenay-aux-Roses, France. ECNDT 2006 – We.1.4.4.

[33] Apostila Técnicas de Dimensionamento de Descontinuidades.

[34] <http://www.del.ufms.br/tutoriais/matlab/apresentacao.htm#matlab>