

DETECÇÃO DE DESCONTINUIDADES PELA TÉCNICA ULTRA-SÔNICA PULSO-
ECO UTILIZANDO UM SISTEMA MULTICANAL

Antonio Alves de Carvalho

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS
PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM
ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS.

Aprovada por:

Prof. João Marcos Alcoforado Rebello, D. Sc.

Prof. Luís Volnei Sudati Sagrilo, D. Sc.

Prof. Hamilton Ferreira Gomes de Abreu, D. Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

JANEIRO DE 2002

CARVALHO, ANTONIO ALVES DE

Detecção de descontinuidades pela técnica
ultra-sônica pulso-eco utilizando um sistema
multicanal [Rio de Janeiro] 2002

VIII, 127p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc.,
Engenharia Metalúrgica e de Materiais, 2002)

Tese – Universidade Federal do Rio de
Janeiro, COPPE

1. Ensaio Não Destrutivo
2. Ultra-som
3. Multicanal

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

À minha mãe, pelo imenso amor que sempre dedicou
a seus filhos e à Gláucia pelo seu amor.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor João Marcos Alcoforado Rebello pelo acompanhamento, compreensão e amizade.

Ao Professor Luís Volnei Sudati Sagrilo pela valiosa contribuição dada a este trabalho.

Aos professores Salvador, Sônia e Hamilton, da Universidade Federal do Ceará, pelo apoio e incentivo.

Aos meus familiares, que nunca me deixaram desanimar.

Aos colegas do Laboend pela amizade e excelente relacionamento, principalmente ao “Ivanco”, pelo constante apoio e paciência.

Ao CENPES, na pessoa de Ricardo de Oliveira Carneval pela colaboração.

A Elizabete da DNV pela doação de corpos de prova.

Aos colegas do PEMM (Professores, alunos e técnicos) pela amizade e apoio.

À Fátima Galvão da ABENDE/RJ pela amizade e apoio.

Aos meus familiares, aos familiares da Gláucia e a todos os amigos no Rio de Janeiro pela excelente estadia e amizade.

Ao CNPq pelo apoio financeiro.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc).

DETECÇÃO DE DESCONTINUIDADES PELA TÉCNICA ULTRA-SÔNICA PULSO-ECO UTILIZANDO UM SISTEMA MULTICANAL

Antonio Alves de Carvalho

Janeiro/2002

Orientador: João Marcos Alcoforado Rebello

Programa: Engenharia Metalúrgica e de Materiais

Os sistemas ultra-sônicos utilizando vários transdutores, tais como o sistema multicanal, estão cada vez mais difundidos como ferramentas de inspeção, em substituição ao ultra-som convencional, principalmente pelo excelente resultado que apresentam e mais ainda pela otimização do processo de inspeção. No entanto, a utilização desta ferramenta requer, geralmente, o desenvolvimento de métodos especiais de inspeção e análise dos resultados.

O objetivo deste trabalho é desenvolver uma metodologia de detecção e avaliação de descontinuidades utilizando um sistema multicanal de inspeção por ultra-som. Inicialmente, realizou-se ensaios em um corpo de prova com defeitos gerados por usinagem em laboratório, com o objetivo de avaliar o sistema de inspeção e desenvolver uma metodologia de análise dos resultados. O método desenvolvido permite visualizar os defeitos por meio de um mapa de cores C-scan. Utilizando a técnica de simulação Monte Carlo, realizou-se um estudo teórico da probabilidade de detecção dos defeitos para vários diâmetros diferentes e para várias malhas de varredura (distância entre aquisições e entre transdutores). Os resultados foram mostrados em forma de gráfico de probabilidade de detecção versus diâmetro do defeito. Em seguida, com o objetivo de testar o sistema para um caso real, foram realizados ensaios em um corpo de prova com defeitos reais provocados pelo ataque devido ao hidrogênio. O que comprovou a coerência do sistema desenvolvido para defeitos reais.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M. Sc.).

DETECTION OF DISCONTINUITIES BY ULTRASONIC PULSE-ECHO METHOD
USING MULTICHANNEL SYSTEM

Antonio Alves de Carvalho

January/2002

Advisors: João Marcos Alcoforado Rebello

Department: Metallurgy and Materials Engineering

The ultrasonic systems using several transducers, like multichannel system, have been widely used as an inspection tool in order to replace the conventional ultrasonic technique, mainly, due to the good results, and inspection optimization facilities. However, the use of this tool, usually, requires the development of special methods of inspection and more sophisticated result analysis tools.

The present work aims to develop a methodology of discontinuities detection using a multichannel ultrasonic inspection system. Firstly, tests were done in a specimen with artificial defects, aiming to evaluate the inspection system and to develop a methodology of result analysis. The method developed enable the visualization of defects in a C-scan image. By the means of Monte Carlo simulation technique, it was developed a theoretical method of defect detection probability for several different diameters and distances of acquisition and between transducers. The results were showed in graphics of detection probability versus defects' diameter. Finally, having for objective to evaluate the system for a real case, tests were done in a specimen with real defects caused by hydrogen attack. In fact, those results showed the efficiency of this system developed for real defects.

ÍNDICE

CAPÍTULO I	INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO II	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
	II.1 – Introdução	3
	II.2 – Princípios físicos do ultra-som	3
	II.3 – Características e geometria do campo sônico	4
	II.3.1 – Campo próximo	5
	II.3.2 – Campo distante	7
	II.3.3 – Divergência do feixe	7
	II.3.4 – Resolução lateral	9
	II.3.5 – Focalização	10
	II.4 – Reconstrução de Imagens	15
	II.5 – Transdutores múltiplos	18
	II.5.1 – Técnica da transmissão direta	18
	II.5.2 – Técnica tandem	20
	II.5.3 – Técnica delta	22
	II.5.4 – Transdutor duplo cristal	23
	II.5.5 – TOFD – Tempo de percurso da onda difratada	26
	II.5.5.1 – Difração da onda ultra-sônica	26
	II.5.5.2 – Técnica do tempo de percurso da onda difratada	27
	II.5.5.3 – Resolução da técnica TOFD	29
	II.5.6 – Técnica de matriz de transdutores com defasagem	30
	II.5.6.1 – Matriz anular de transdutores	32
	II.5.6.2 – Matriz linear de transdutores	35
	II.5.6.3 – Direcionamento do feixe ultra-sônico	38
	II.5.7 – Sistema ultra-sônico multicanal e multiplexer	40
	II.5.7.1 – Técnica utilizando sistema multiplexer com gerador de pulsos e preamplificador independente	44
	II.5.7.2 – Sistema automatizado para inspeção de soldas	46
	II.6 – Simulação Monte Carlo	49

II.6.1 – Fundamentos matemáticos da simulação Monte Carlo	54
II.6.2 – Amostragem direta (“crude” Monte Carlo)	57
CAPÍTULO III MATERIAIS E MÉTODOS	60
III.1 – Introdução	60
III.2 – Material inspecionado	60
III.2.1 – Corpo de prova 1	60
III.2.2 – Corpo de prova 2	61
III.3 – Equipamento	63
III.4 – Sistema de aquisição de sinais	66
III.4.1 – Sistema automático de inspeção utilizando mesa de coordenadas XY	66
III.4.2 – Sistema automático de inspeção utilizando equipamento multicanal	67
III.5 – Procedimento de inspeção, análise e tratamento dos sinais	69
III.5.1 – Utilizando o programa Neoend	69
III.5.2 – Utilizando o Matlab	71
III.6 – Determinação da malha de varredura	77
III.6.1 – Estudo teórico da malha de varredura	77
CAPÍTULO IV RESULTADOS E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	81
IV.1 – Introdução	81
IV.2 – Inspeção do corpo de prova 1 utilizando o programa Neoend (etapa 1)	82
IV.3 – Inspeção do corpo de prova 1 utilizando multicanal (etapa 2)	90
IV.4 – Inspeção do corpo de prova 2 utilizando o sistema multicanal (etapa 3)	97
IV.5 – Considerações finais e sugestões para trabalhos futuros	107
CAPÍTULO V CONCLUSÕES	108
CAPÍTULO VI REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	110
ANEXO A	115
ANEXO B	122

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

Os ensaios não destrutivos vêm sendo empregados cada vez mais como método de inspeção para garantir a qualidade e a confiabilidade de produtos e equipamentos. Entre as técnicas de ensaios não destrutivos, o ultra-som é uma das mais difundidas na indústria para a detecção e dimensionamento de descontinuidades em materiais, avaliação de suas propriedades, medição de espessuras, etc.

Face aos demais ensaios não destrutivos, o ultra-som apresenta:

- Superior capacidade de penetração, que permite a detecção das profundidades de defeitos em materiais. Sendo a inspeção ultra-sônica feita rotineiramente em materiais de várias espessuras;
- Alta sensibilidade, permitindo a detecção de pequenas descontinuidades;
- Maior precisão em determinar a posição de falhas internas, estimar o seu tamanho, caracterizar sua orientação e natureza, mais que outras técnicas de ensaios não destrutivos.

Outras de suas características são:

- Somente uma superfície da peça precisa estar acessível;
- A operação é eletrônica, o que produz uma imediata indicação da falha, tornando o método adequado para interpretação rápida, utilização de sistemas de varredura automática, monitoramento “on-line” da produção e controle de processo;
- Varredura volumétrica, permitindo a inspeção de um volume de metal dos dois lados da superfície do material;
- Não apresenta perigo para o operador e nem para a integridade do equipamento;

- Portabilidade;
- Produz uma saída que pode ser processada por um computador para caracterizar defeitos e para determinar as propriedades do material.

Paulatinamente, vários desenvolvimentos foram realizados, no sentido de melhorar a técnica de inspeção e torná-la mais abrangente, principalmente no que diz respeito a automação do processo, como citado em vários trabalhos [1, 2, 3, 4, 5, 6]. Esses novos desenvolvimentos estão sempre relacionados a utilização de múltiplos transdutores, o que torna o processo mais eficiente, rápido, barato e menos tedioso para o operador. Entre os processos de múltiplos transdutores, podemos citar os sistemas “phased array” e multicanal entre outros, os quais serão abordados adiante.

Dentre as técnicas que utilizam múltiplos transdutores, os sistemas multicanais vêm ganhando grande espaço, principalmente, devido ao grande campo de aplicação desses sistemas, pois se destinam aos mais variados tipos de serviços, como também, podem ser aplicados as mais diversas técnicas ultra-sônicas, por exemplo, tem sido grande sua aplicação com a técnica “TOFD”, assim como também, com a técnica pulso-eco. Outra de suas vantagens, é a relativamente fácil operação desses sistemas, se comparado, por exemplo, com a técnica “phased array” que necessita de uma eletrônica de precisão para produzir resultados satisfatórios.

Este trabalho tem por objetivo avaliar um sistema multicanal ultra-sônico na detecção de descontinuidades planares em chapas de aço carbono, desenvolver um método de análise dos resultados das inspeções e avaliar a influência das variáveis envolvidas no processo.

Os resultados obtidos neste trabalho serão utilizados como parâmetros para a análise de inspeções em casco de navio utilizando sistema multicanal. Para esta finalidade está sendo desenvolvido pelo Laboratório de Ensaio Não Destrutivos da EE/COPPE/UFRJ (LABOEND), um veículo automatizado para inspeção, por ultra-som, de perda de espessura por corrosão em navios de processamento e estocagem temporária de petróleo (FPSO), do inglês “floating process storage oil”. O veículo utiliza rodas magnéticas para se fixar ao casco do navio, o controle do movimento é feito por cabo via protocolo TCP/IP e emprega um sistema multicanal de ultra-som para fazer a inspeção.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

II.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo é realizada uma revisão bibliográfica sobre os principais assuntos que envolvem o tema deste trabalho. Inicialmente, faz-se um resumo sobre os princípios físicos do ultra-som (seção II.2). Em seguida, realiza-se um estudo sobre as principais características do campo sônico (seção II.3). Posteriormente, comenta-se sobre a técnica de reconstrução de imagens ultra-sônicas (seção II.4). Já na seção II.5, realiza-se um estudo mais detalhado sobre as diversas técnicas que utilizam mais de um transdutor para a inspeção, terminando esta seção com o estudo do sistema multicanal, que é o ponto central desse trabalho de tese. Finalmente, na seção II.6 estuda-se a simulação Monte Carlo, visto que, uma das variáveis envolvidas em um sistema multicanal é a distância entre os vários sensores ultra-sônicos, o que está diretamente relacionado com a probabilidade de detecção de defeitos. Portanto, através de simulação Monte Carlo pode-se definir uma distância para uma probabilidade de detecção desejada.

II.2. PRINCÍPIOS FÍSICOS DO ULTRA-SOM

O ensaio ultra-sônico de materiais é feito com o emprego de ondas mecânicas ou acústicas, que propagam no meio em inspeção. 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. Se assumirmos que o meio em estudo é elástico, ou seja, que as partículas não estão rigidamente ligadas, mas que podem oscilar em qualquer direção, então podemos classificar as ondas acústicas em três categorias:

- Ondas longitudinais – As partículas do meio vibram na mesma direção da propagação da onda;
- Ondas transversais – 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 característica de se propagar na superfície dos sólidos ou líquidos [7].

A maneira mais usual de geração de ondas ultra-sônicas é através do efeito piezoelétrico, que é baseado no fato de que certos cristais geram corrente elétrica quando deformados mecanicamente, e vice-versa.

Inversamente, ocorre a deformação do cristal quando uma diferença de potencial elétrico é aplicada entre as duas faces opostas do cristal (efeito piezoelétrico reverso). 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 [8].

II.3. CARACTERÍSTICAS E GEOMETRIA DO CAMPO SÔNICO

Para entendimento do campo sônico, imaginemos que o cristal piezoelétrico, gerador de ondas ultra-sônicas, seja composto não de uma única peça, mas de infinitos pontos oscilantes. Cada ponto do cristal produz, ondas que se propagam no meio, conforme figura II.1.

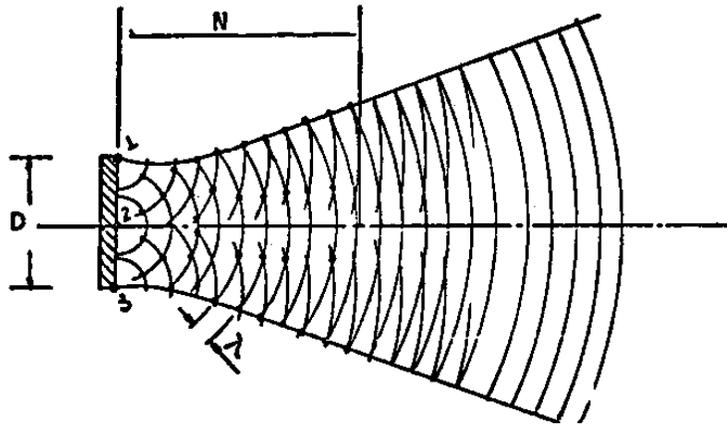


Figura II.1. Sistema de ondas circulares, de comprimento de onda “ λ ”, provenientes dos pontos 1, 2 e 3 [7].

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

II.3.1. 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, conforme descrito anteriormente.

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 II.2).

Todas as fontes sonoras têm campo próximo com dimensões que dependem da sua forma, das características do meio onde a onda se propaga e da frequência sônica. As expressões a seguir são usadas para calcular o comprimento do campo próximo [8].

Cristal circular

$$N = \frac{D_{ef}^2 \cdot f}{4V} \quad (\text{II.1})$$

Cristal quadrado ou cristal retangular (com diferença entre lados de até 12%)

$$N = 1,3 \frac{M_{ef}^2 \cdot f}{V} \quad (\text{II.2})$$

Onde:

N = Campo próximo

V = Velocidade da onda

f = Frequência

D_{ef} = Diâmetro efetivo do cristal ($D_{ef} = 0,97 \times$ O Diâmetro real)

M_{ef} = Metade do comprimento efetivo do lado maior do cristal retangular
(comprimento efetivo = $0,97 \times$ comprimento real).

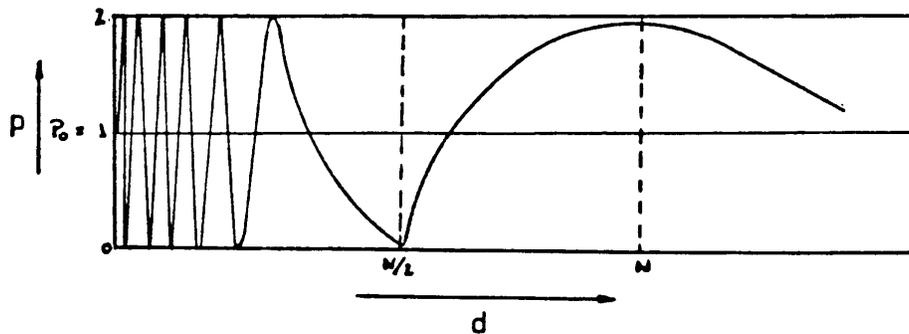


Figura II.2. Variação da intensidade da pressão sônica no campo próximo [7].

II.3.2. 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 [8]. 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 II.3).

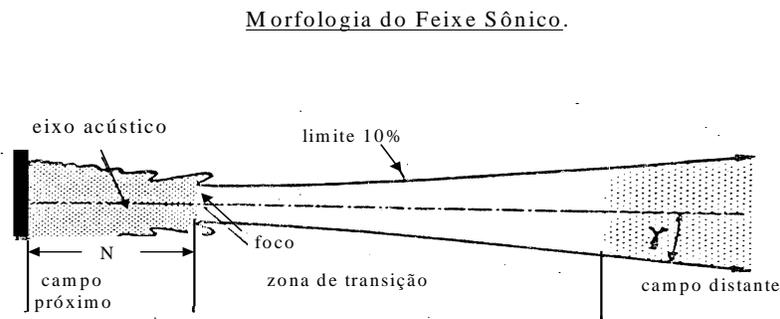


Figura II.3. Regiões do feixe sônico: Campo próximo, zona de transição e campo distante [8].

II.3.3. DIVERGÊNCIA DO FEIXE

O campo gerado por um transdutor é composto de vários lóbulos, como pode-se ver na figura II.4. Na região central do feixe sônico, a sensibilidade, assim como a intensidade sônica, é maior e a medida que nos afastamos do eixo central, num mesmo plano, diminui a sensibilidade (figura II.5). Este efeito é consequência da divergência do feixe sônico, após 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 II.6).

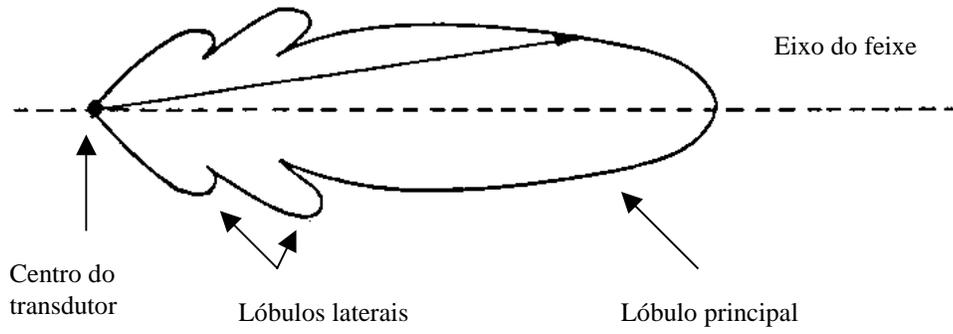


Figura II.4. A intensidade do feixe traçado em coordenadas polares [9].

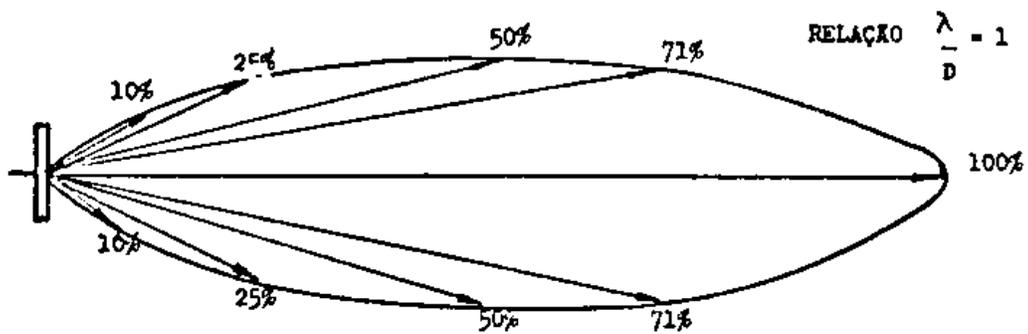


Figura II.5. Coordenadas polares [7].

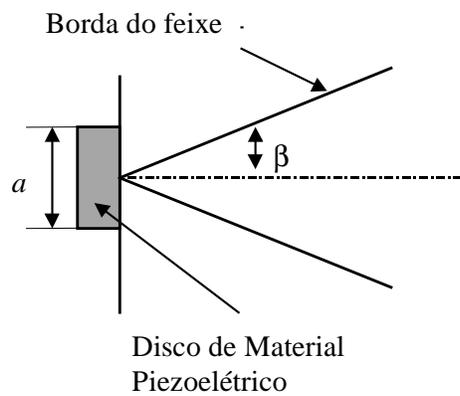


Figura II.6. Divergência do feixe sônico [10].

A expressão para a divergência (β) é dada por [11]:

$$\beta = \text{sen}^{-1}\left(\frac{0,61\lambda}{a}\right) \quad (\text{II.3})$$

Onde:

a é o raio ativo do transdutor;

λ é o comprimento de onda.

Quando o transdutor não é circular, o ângulo de divergência não pode ser calculado com precisão aplicando a equação II.3. Para transdutores não circulares, o ângulo de divergência é mais precisamente encontrado experimentalmente [12].

A abertura do ângulo do feixe ultra-sônico apresenta importância marcante na análise sônica, uma vez que a abertura do ângulo pode alterar de maneira decisiva o resultado do exame. É importante saber com alguma precisão a abertura do feixe ultra-sônico para a realização prática de transdutores para fins específicos, uma vez que o campo que se deseja produzir é uma função da abertura do feixe [13].

II.3.4. RESOLUÇÃO LATERAL

Devido a variação de intensidade e diâmetro do feixe ao longo de seu eixo, teremos diferentes indicações da amplitude de um refletor se este estiver nas bordas ou no centro do transdutor. A resolução lateral é a capacidade do transdutor em distinguir dois refletores próximos contidos num mesmo plano. Do conceito de divergência pode-se inferir que a resolução lateral aumenta com a diminuição da divergência, o que pode ser obtido utilizando-se transdutores de altas frequências (equação II.3), transdutores focalizados ou utilizando a técnica conhecida como SAFT (do inglês “Synthetic Aperture Focusing Technic”) [10].

II.3.5. FOCALIZAÇÃO

Como visto anteriormente, a maior parte da potência ultra-sônica (intensidade do feixe sônico) está contida dentro da superfície do lóbulo principal. No entanto existem pequenos lóbulos laterais, presentes fora desta superfície, os quais poderão produzir “artefatos de imagem” (imagem falsa).

Para obter um feixe de largura estreita, mais que aquele obtido com um transdutor plano, pode-se fazer uso da focalização, que consiste em formar uma frente de onda dentro de uma forma côncava convergindo para um foco, como mostrado na figura II.7. A frente de onda converge entre o transdutor e a zona focal, aproximadamente plana dentro da zona focal, e é divergente distante do foco. Um dos métodos de se obter focalização é construir transdutores como uma parte da superfície de uma esfera. O grau de focalização depende do raio de curvatura do transdutor (figura II.8) e da posição do último pico de pressão máxima de um transdutor plano equivalente. A faixa de razão da distância do último pico de pressão máxima e o raio de curvatura para uma focalização fraca, média e forte é mostrado na figura II.9. O grau de focalização é determinado pela razão entre o comprimento do campo próximo (N) e o raio de curvatura (R) :

Focalização fraca: $2 \geq N / R > 0$

Focalização média: $2\pi \geq N / R > 2$

Focalização forte: $N / R > 2\pi$

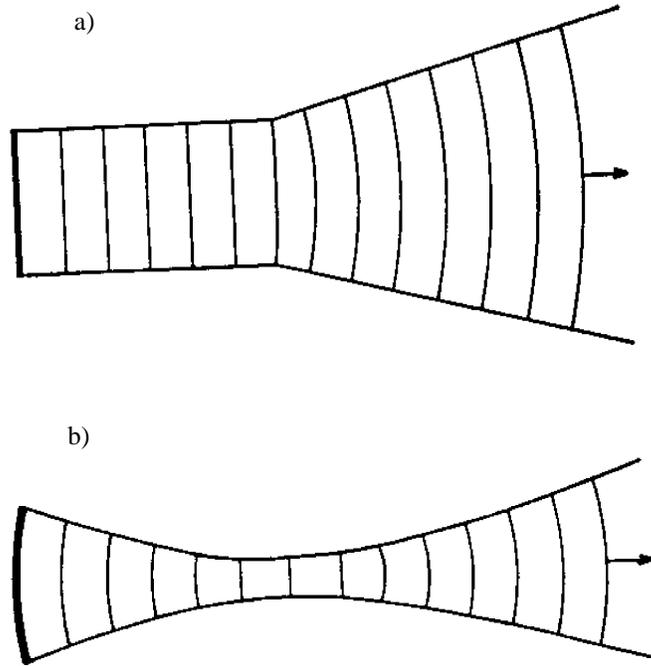


Figura II.7. a) A frente de onda e a forma do feixe de um transdutor de disco plano
 b) transdutor focalizado em forma de esfera [9].

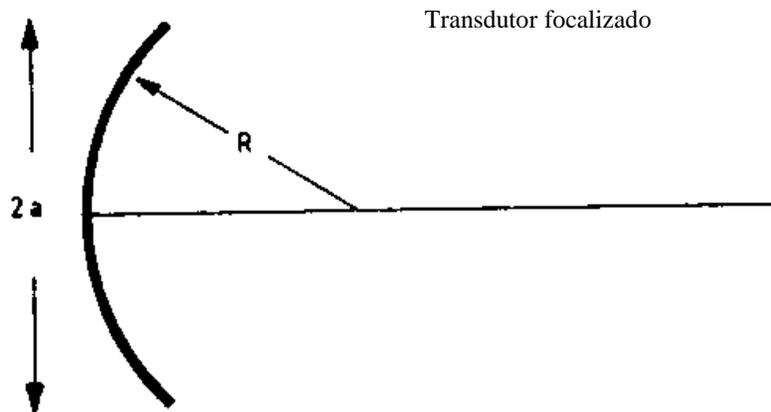


Figura II.8. A corda “a” e o raio de curvatura “R” usado para calcular o grau de focalização usando um transdutor em forma de esfera [9].

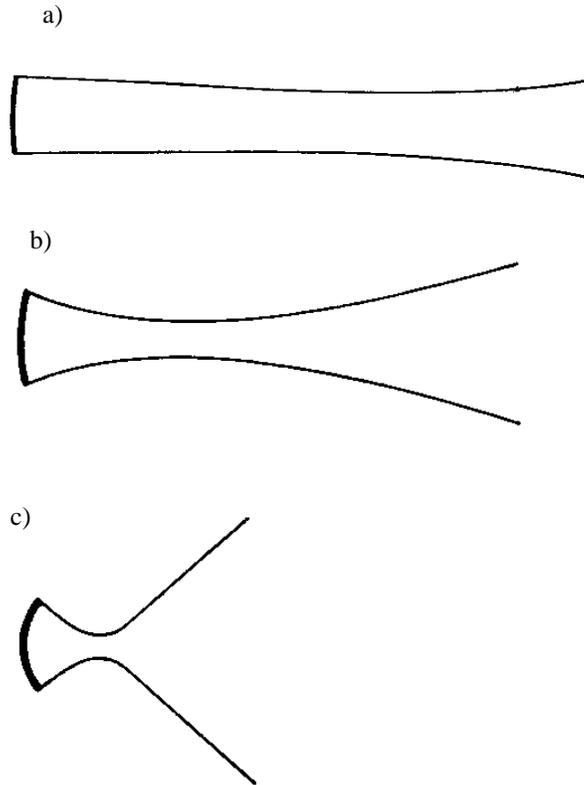


Figura II.9. a) Focalização fraca b) focalização média c) focalização forte. O grau de focalização é determinado pela razão entre o comprimento da zona próxima e o raio de curvatura [9].

Pode-se notar que só é possível obter uma focalização do feixe ultra sônico na região do campo próximo, no limite com o campo distante, e teremos uma divergência do feixe ultra sônico dentro do campo distante, qualquer que seja o grau de focalização. Também podemos aumentar o grau de focalização pela redução do raio de curvatura. A largura e o comprimento da zona focal são ilustrados na figura II.10. Existe uma expressão simples para a largura desta zona, que é mostrada na figura II.10 [9].

A focalização não só diminui a largura do feixe ultra sônico, mas também aumenta a intensidade do feixe no foco, como resultado da concentração de energia do feixe dentro de uma área menor. Gráficos da intensidade axial contra a distância do transdutor, são mostrados na figura II.11. Podemos perceber que a máxima intensidade não é no raio de curvatura, mas entre este ponto e o transdutor.

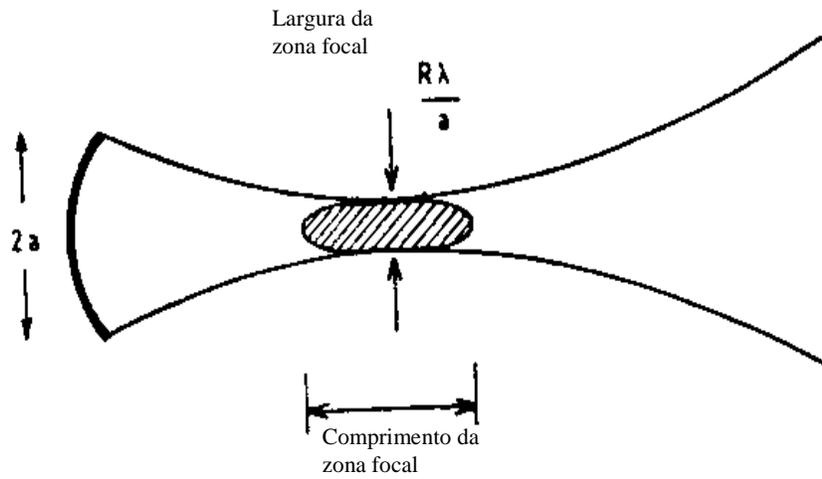


Figura II.10. A zona focal [9].

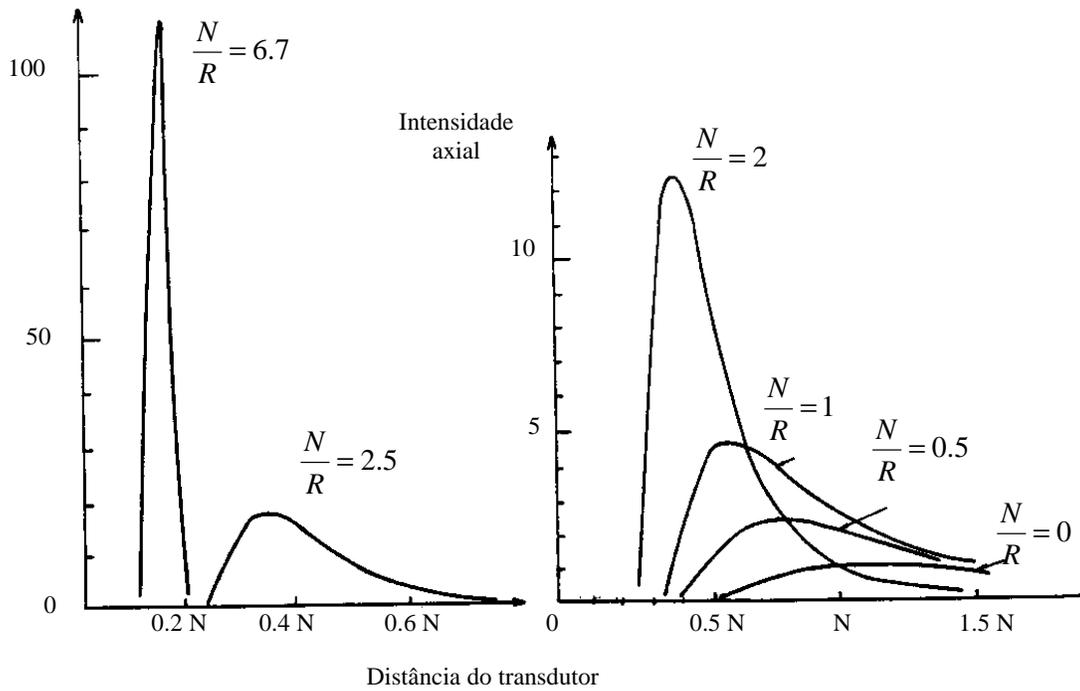


Figura II.11. A variação de intensidade ao longo do feixe de transdutores focalizados para vários graus de focalização [9].

Construir transdutores no formato esférico é apenas uma maneira de obter uma focalização. Alternativamente, outros métodos são usados, como o uso de lentes e espelhos como mostrado na figura II.12.

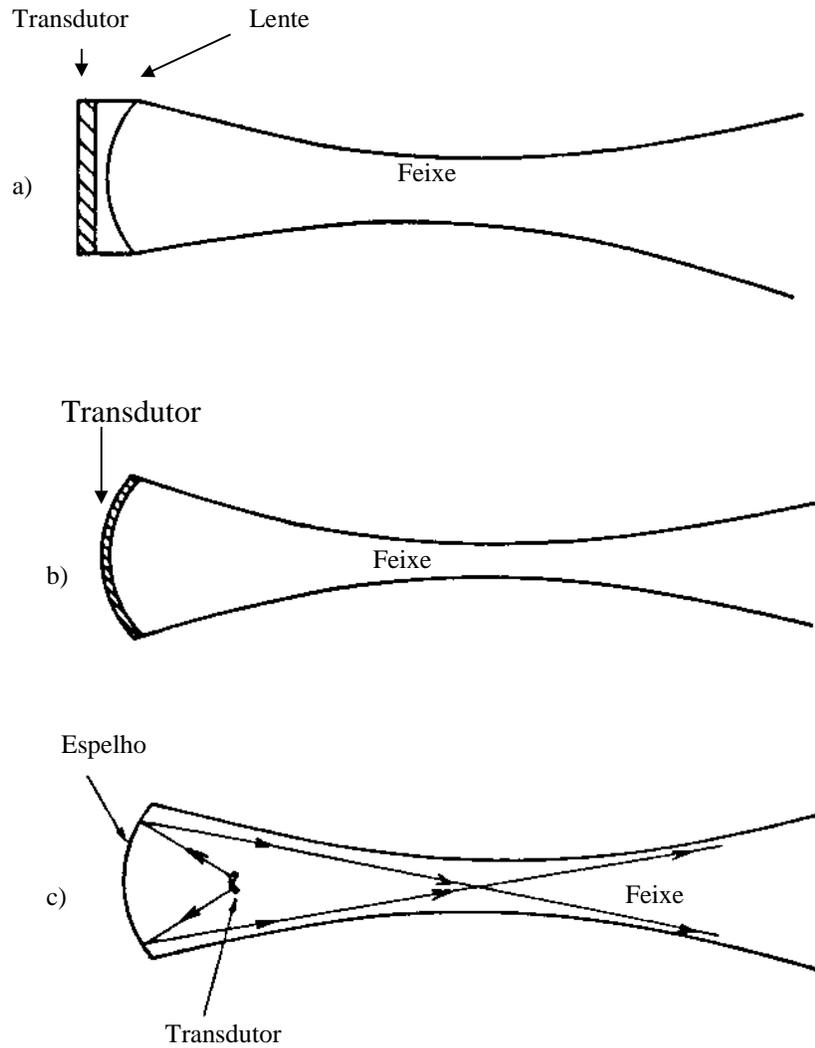


Figura II.12. Focalização por a) lentes, b) geometria do transdutor c) espelho côncavo [9].

II.4. RECONSTRUÇÃO DE IMAGENS

A digitalização do sinal aliada ao posicionamento automático do transdutor permite a aplicação de várias técnicas de reconstrução de imagens aplicada aos ensaios não destrutivos. Quando uma técnica ultra-sônica é usada para detectar um defeito, a informação é convencionalmente coletada e mostrada basicamente de três modos: A, B ou C-scan [14].

O modo A-scan é a forma mais comum de apresentação do sinal ultra-sônico. É basicamente um gráfico amplitude versus tempo, no qual a linha horizontal em um osciloscópio representa o tempo decorrido; e as deflexões verticais, a amplitude dos ecos, figura II.13. O tamanho das discontinuidades pode ser estimado por comparação da altura do eco da discontinuidade com um outro refletor de tamanho conhecido. A localização da discontinuidade (profundidade) é determinada através de uma escala graduada no osciloscópio do aparelho. Para esta leitura é necessária a calibração da linha base, que é feita através de blocos com dimensões conhecidas [8]. O uso do mostrador tipo 'A' não é limitado à detecção e caracterização de discontinuidades. Ele pode ser utilizado também para medição de espessuras, velocidade sônica, atenuação e geometria do feixe sônico.

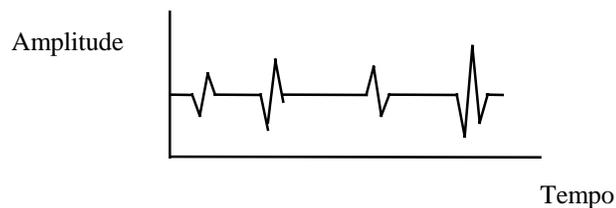


Figura II.13. Modo A-scan .

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 a sua posição no início da inspeção. A intensidade do eco não é medida diretamente como no modo A-scan [8]. O modo B-scan pode ser entendido como uma seção transversal do material, produzida ao longo da linha de varredura (X), pela composição de diversos A-scans (figura II.14). Indicações oriundas de interfaces internas (descontinuidades) também são mostradas em perfil, onde podem ser determinadas as dimensões e orientações destas.

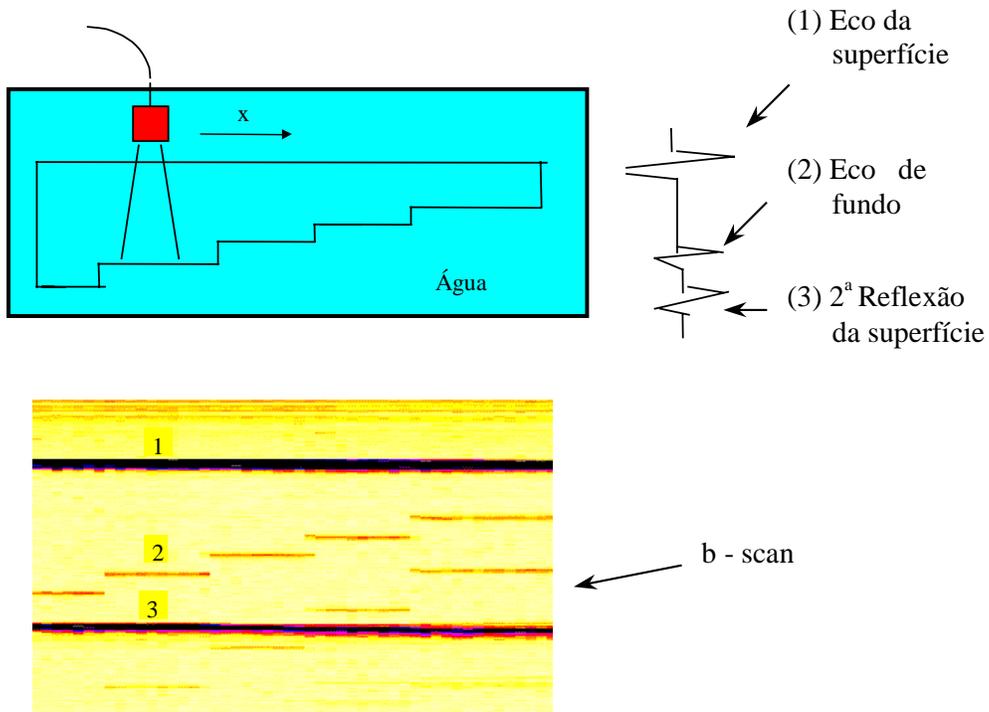


Figura II.14. B-scan de um bloco escalonado num ensaio por imersão. No modo A-scan (1) reflexão da superfície da peça, (2) eco do fundo e (3) segunda reflexão da superfície da peça [10].

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, figura II.15. Os resultados são plotados em um sistema gráfico que mostra uma vista em planta da peça, com a dimensão e posição das possíveis discontinuidades.

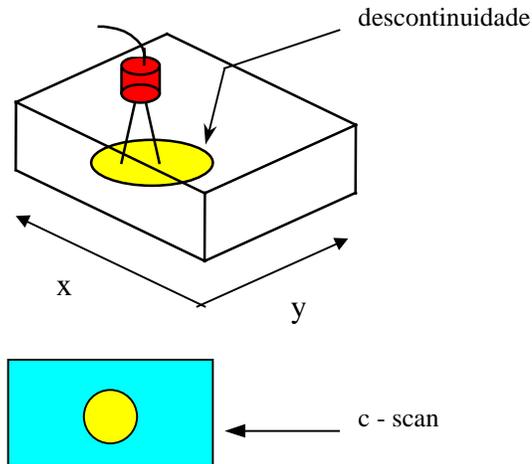


Figura II.15. Exemplo do modo C-scan. A varredura do transdutor é bidirecional e a descontinuidade é representada numa escala de cores [10].

Dois outros modos de apresentação de imagens também podem ser encontrados, a vista em perspectiva ou 3D e o D-scan. Este último é particularmente quando se trata de imagens de defeitos longitudinais em cordões de solda, pois permite não só o dimensionamento longitudinal do defeito, bem como a sua altura na direção da espessura do material. 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.

II.5. TRANSDUTORES MÚLTIPLOS

Um único transdutor ultra-sônico pode ser utilizado para um ensaio do tipo pulso eco, mas essa técnica tem diversas limitações:

- baixa relação sinal/ruído em materiais altamente atenuantes;
- indicação limitada de descontinuidades e baixa capacidade de identificação;
- incapacidade de detectar todas as descontinuidades, devido a geometria dos componentes;
- geralmente um lento procedimento de teste.

O uso de transdutores múltiplos pode produzir melhorias nas deficiências citadas acima. No entanto, eles são mais susceptíveis a fraco acoplamento ou rugosidade da superfície do que um sistema de transdutor único, devido aos vários pontos de entrada do feixe [11].

Podemos entender como transdutor múltiplo qualquer sistema que empregue mais de um transdutor. Muitos destes usam somente dois transdutores, como a transmissão direta e várias configurações de transmissão/recepção. Contudo, transdutores podem ser arranjados em um conjunto de pequenos elementos próximos um ao outro, com um sistema eletrônico controlando o tempo de transmissão e recepção de cada elemento (matriz de transdutores com defasagem), produzindo um feixe ultra-sônico direcionado e focalizado. Podemos ter também um sistema multicanal para trabalhar com vários transdutores, sendo que o objetivo deste é otimizar o processo de inspeção.

A seguir descreveremos as mais importantes técnicas.

II.5.1. TÉCNICA DA TRANSMISSÃO DIRETA

A técnica da transmissão direta utiliza dois transdutores ultra-sônicos localizados em lados opostos do objeto a ser inspecionado. Um transdutor atua como transmissor de ultra-som e o outro, alinhado com o primeiro, atua como receptor. Os transdutores podem estar em contato com o material de teste, ou o objeto de teste pode ser imerso em um

tanque de líquido acoplante. Quando a peça não apresenta descontinuidades, todo o sinal emitido é recebido pelo segundo transdutor. Na presença de descontinuidades, parte ou toda energia sônica é refletida e, conseqüentemente, menor ou nulo será o sinal recebido pelo transdutor receptor (figura II.16) [8].

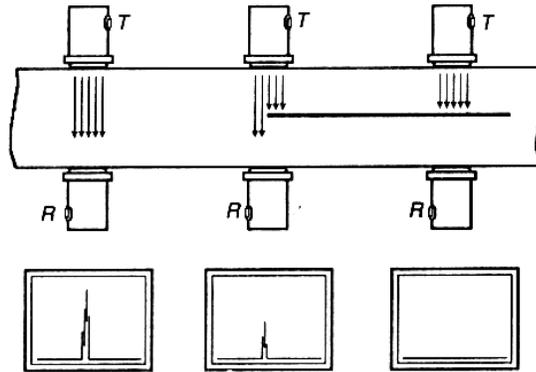


Figura II.16. Técnica da transmissão direta [8].

A transmissão direta pode ser utilizada para detecção de descontinuidades ou para caracterização de materiais, além de se destinar a medidas de espessura, especialmente para peças muito espessas e altamente atenuantes ou peças muito finas. Um exemplo, é a inspeção de chapas para detecção de descontinuidades planares, tipo dupla laminação, que têm dimensões relativamente grandes em comparação com o feixe sônico (grandes refletores). O procedimento usual é alinhar os dois transdutores e movê-los simultaneamente sobre o objeto de teste. Quando uma descontinuidade ou uma mudança na composição do material é encontrada, a amplitude do sinal muda, porque o feixe ultrassônico é refletido ou espalhado pela descontinuidade.

Devido as características do processo, o método possui limitações intrínsecas, tais como:

- não se pode localizar as descontinuidades;
- não se pode relacionar amplitude do sinal com o tamanho do defeito;
- os dois transdutores devem estar alinhados, e acoplados, o que dificulta o processo;
- não se pode determinar a quantidade de defeitos existentes;
- há necessidade de acesso dos dois lados da região a ser examinada.

II.5.2. TÉCNICA TANDEM

A técnica tandem (figura II.17) é um ensaio comum de emissor/receptor, que utiliza dois transdutores angulares, um como transdutor emissor e o outro receptor, fixos a um gabarito com distância também fixa entre eles. Esse método é utilizado para detecção de defeitos perpendiculares à superfície da peça. Permite o ensaio em uma certa zona de profundidade pré-estabelecida. O transdutor receptor só apresenta um sinal quando existe uma descontinuidade [7].

O caminho do ultra-som têm três segmentos distintos causado pelas duas reflexões do feixe ultra-sônico. A interpretação dos dados da amplitude do sinal e do tempo de percurso são baseados no conhecimento dessa geometria. Sinais recebidos, que caem fora de um certo limite de confiança pré estabelecido indica a presença de defeitos.

Alguns fatores, como rugosidade da superfície de reflexão e defeitos não perpendiculares à superfície de inspeção, afetam a habilidade dessa técnica em detectar e dimensionar as descontinuidades.

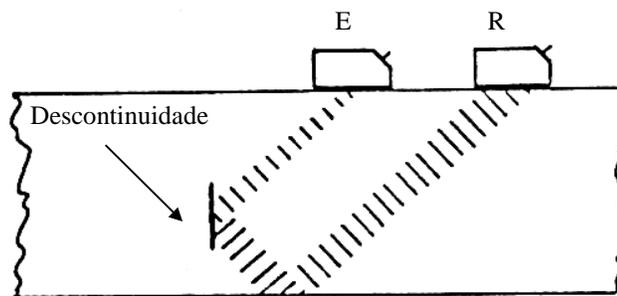


Figura II.17. Técnica tandem. Utilizada normalmente em grandes espessuras, para detecção de defeitos perpendiculares à superfície da peça [7].

Diversos transdutores podem ser alinhados para receber o sinal transmitido, auxiliando a determinação da profundidade ideal para a detecção da descontinuidade. A técnica tandem tem sido usada em teste de discos abrasivos composto de carbonetos de silício, para detecção de trincas radiais, com um acoplante seco. A energia ultra-sônica propaga-se através dos carbonetos de silício e é refletida pela superfície do furo central do

disco. O sistema é calibrado com um padrão de referência para obter a máxima amplitude do sinal refletido. Trincas radiais reduzem apreciavelmente a amplitude do sinal, e a variação de amplitude pode ser utilizada para dimensionar a trinca (figura II.18) [11].

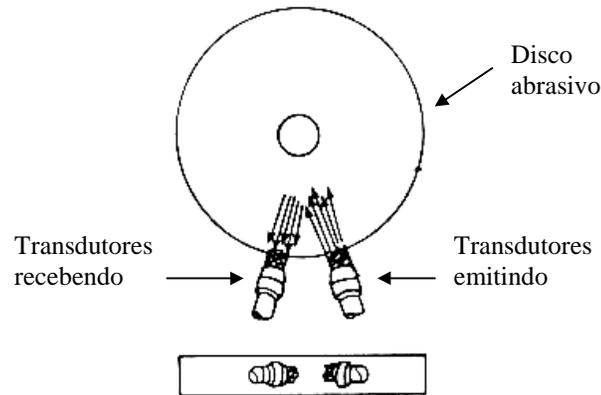


Figura II.18. Técnica tandem para teste de disco abrasivo [11].

A técnica tandem pode ser usada para caracterizar descontinuidades, diferenciando entre vazios e trincas quando o transdutor transmitindo também recebe o sinal refletido. Se a descontinuidade é um vazio, então ela provavelmente tem uma forma esférica (figura II.19 a), o transdutor emissor recebe um sinal de amplitude A_1 e o transdutor receptor recebe um sinal de amplitude A_2 . Em virtude da reflexão e atenuação:

$$\frac{A_1}{A_2} \gg 1$$

Se a descontinuidade é planar (figura II.19 b), então o transdutor transmissor recebe reflexões tais que:

$$\frac{A_1}{A_2} \ll 1$$

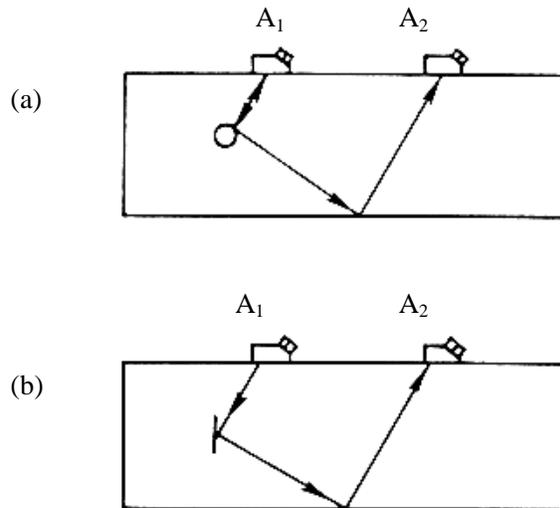


Figura II.19. Teste ultra-sônico por técnica tandem para caracterização: a) de descontinuidades esféricas b) de descontinuidades planares [11].

A técnica tandem apresenta como desvantagem a dificuldade do operador em manter os dois transdutores angulares alinhados e à distância determinada, principalmente em superfícies curvas ou irregulares [7].

II.5.3. TÉCNICA DELTA

A técnica delta foi desenvolvida para inspeção de descontinuidade em soldas e opera com um transdutor angular como emissor e outro normal ou reto como receptor. O transdutor receptor posicionado normal à superfície do objeto de teste, detecta ondas espalhadas, conforme figura II.20.

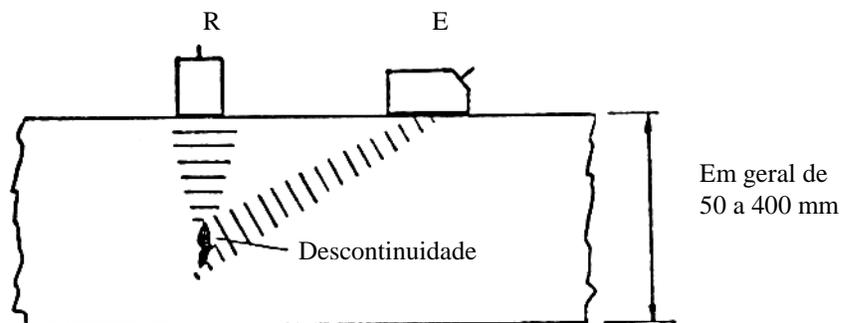


Figura II.20. Técnica delta. Utilizada normalmente em grandes espessuras [7].

A técnica delta tem duas vantagens sobre a técnica pulso eco: o transdutor receptor detecta um sinal só quando existe uma descontinuidade e a largura do re-direcionamento do feixe ultra-sônico aumenta a probabilidade de detectar descontinuidades orientadas aleatoriamente. A técnica delta tem a melhor relação sinal/ruído e a melhor resolução da parede de fundo. Se a descontinuidade é localizada próxima a parede de fundo, não existe eco de fundo para interferir com o sinal da descontinuidade.

Contudo, existe uma pequena correlação entre tamanho das descontinuidades, ou sua profundidade, e a amplitude do sinal recebido. Portanto, a técnica delta é excelente para detectar descontinuidades mas é limitada na capacidade para localizar a profundidade e o tamanho da descontinuidade. Descontinuidades tem sido dimensionadas pela monitorização do sinal da descontinuidade, quando o transdutor transmissor faz uma varredura sobre a peça.

II.5.4. TRANSDUTOR DUPLO CRISTAL

O transdutor duplo cristal (figura II.21) consiste de dois cristais (um transmissor de ondas longitudinais e um receptor) montados lado a lado com uma linha de atraso e separados por uma barreira acústica [11]. A eletrônica para cada um dos transdutores é separada, para que o receptor possa iniciar detectando ecos antes que o transmissor termine a emissão. O posicionamento dos cristais, geralmente de forma inclinada, é feito

com o objetivo de focalizar o feixe sônico e aumentar a relação sinal/ruído, obtendo-se assim uma sensibilidade máxima no ponto focal, possibilitando a detecção de descontinuidades muito pequenas. Por esse motivo ele é empregado para a detecção de descontinuidades em materiais altamente atenuantes, como concreto e metal de solda em aços inoxidáveis.

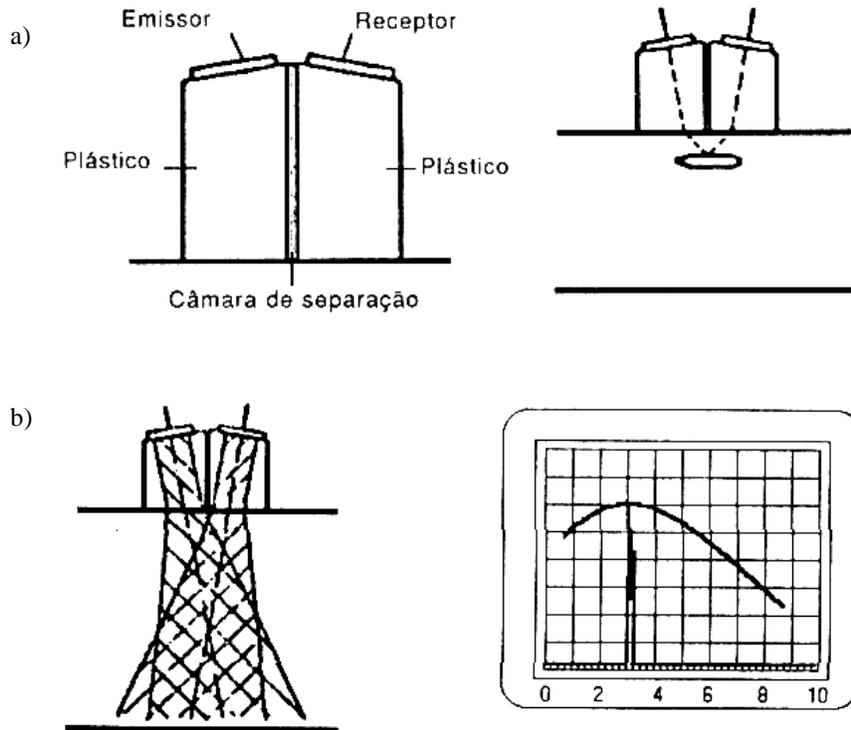


Figura II.21. (a) Esquema básico do cabeçote duplo cristal
(b) campo sônico no cabeçote duplo cristal [8].

O transdutor duplo cristal foi projetado para superar problemas encontrados no transdutor simples para a inspeção de materiais muito finos ou quando se necessita detectar descontinuidades próximas a superfície. Quando o cristal piezoelétrico é excitado, este vibra e gera uma onda elástica. A vibração do cristal tem uma duração finita. Durante este tempo, que no fundo corresponde a uma certa distância à frente do cristal, este não pode atuar como receptor para o eco refletido. Esta distância é chamada de zona morta e pode estender-se por diversos milímetros dentro do objeto de teste para transdutores de baixa frequência.

Em aplicações onde as discontinuidades estão localizadas em uma grande distância, a zona morta não é um problema. Para localizações e caracterizações de anomalias próximo a superfície, o tempo de vibração é um problema crítico. O uso de transdutores duplo cristal supera essa desvantagem, porque o cristal receptor pode receber o sinal refletido mesmo antes que o cristal emissor tenha parado de vibrar.

A maior aplicação do transdutor duplo cristal é na medição de espessuras de paredes de tubulações e de vasos de pressão. Em muitas dessas aplicações, o material do objeto de teste possui granulação grosseira, altamente atenuante e tem sofrido corrosão na forma de falha de micro porosidade. É desejável que o feixe ultra-sônico seja focalizado e de diâmetro mínimo, devido a geometria da discontinuidade.

Um simples transdutor usando a técnica pulso eco é inadequado, devido às condições acima, principalmente devido a sua baixa relação sinal/ruído e sua incapacidade de focalização. O transdutor duplo cristal produz um bom perfil de feixe para essas aplicações (figura II.22) e tem a vantagem adicional de detectar corrosão de micro porosidade próximo a superfície. O ângulo do feixe é normal à superfície do material de teste e dependente da espessura.

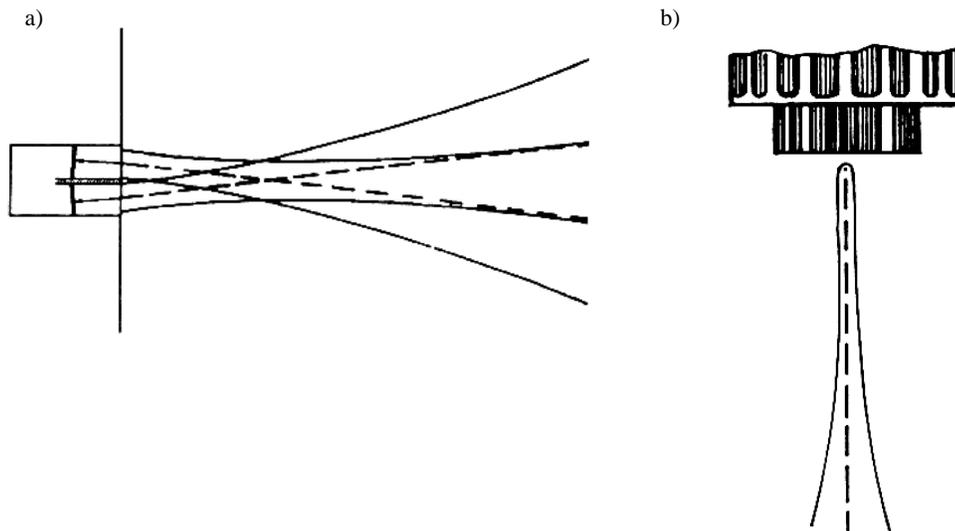


Figura II.22. a) Focalização do feixe sônico no cabeçote duplo cristal [8]
b) perfil do feixe sônico no transdutor duplo cristal [11].

Outra grande aplicação do transdutor duplo cristal é na detecção de descontinuidade em regiões revestidas e soldas austeníticas. O uso de curtos pulsos, transdutores fortemente amortecidos, e um sistema de receptor de banda larga, realça a resolução e pode aumentar a relação sinal/ruído. Dependendo da orientação e do tipo de descontinuidade, o ângulo do feixe pode ser oblíquo ou normal a superfície do material.

II.5.5. TOFD – TEMPO DE PERCURSO DA ONDA DIFRATADA (“TIME OF FLIGHT DIFFRACTION”)

II.5.5.1. DIFRAÇÃO DA ONDA ULTRA-SÔNICA

Quando uma onda ultra-sônica ao propagar-se encontra um obstáculo de diâmetro D , pode ocorrer reflexão, espalhamento ou difração. Quando o diâmetro do obstáculo for muito maior que o comprimento de onda λ ocorrerá o fenômeno da reflexão (figura II.23 a). Quando o diâmetro for menor ou da mesma ordem de grandeza e os obstáculos forem muitos haverá o espalhamento da onda. Se o diâmetro do obstáculo for da mesma ordem de grandeza que λ ocorrerá a difração da onda [10], figura II.23 (b).

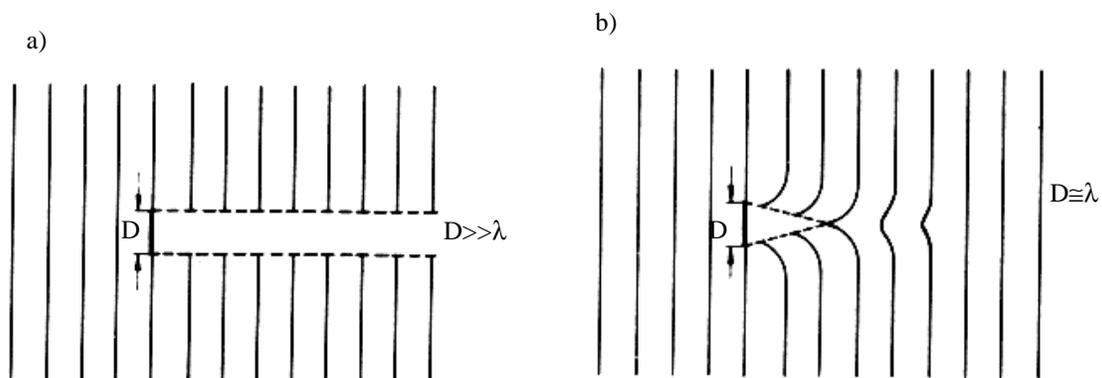


Figura II.23 a) Reflexão da onda para $D \gg \lambda$ b) difração da onda para $D \approx \lambda$ [13].

II.5.5.2. TÉCNICA DO TEMPO DE PERCURSO DA ONDA DIFRATADA

Esta técnica baseia-se na medida precisa do tempo de chegada dos pequenos sinais difratados pelas pontas dos defeitos. As difrações são separadas no espaço, logo suas recepções são separadas no tempo (figura II.24), esta diferença em tempo pode ser usada para localizar e dimensionar a trinca [11].

A figura II.24, ilustra um arranjo típico para TOFD. Dois transdutores, um emissor e outro receptor, são posicionados alinhados um de cada lado do defeito, de tal modo que este esteja totalmente dentro da área sonificada pelo emissor. Quatro sinais serão detectados pelo receptor: (1) onda lateral que se propaga pela superfície e tem o menor tempo de percurso. Esta onda não é verdadeiramente do tipo superficial já que a sua amplitude não decai exponencialmente com a distância entre transdutores [15]; (2) onda difratada pela ponta superior do defeito; (3) onda difratada pela ponta inferior do defeito, e (4) onda refletida pela superfície de fundo do material (“backwall echo”).

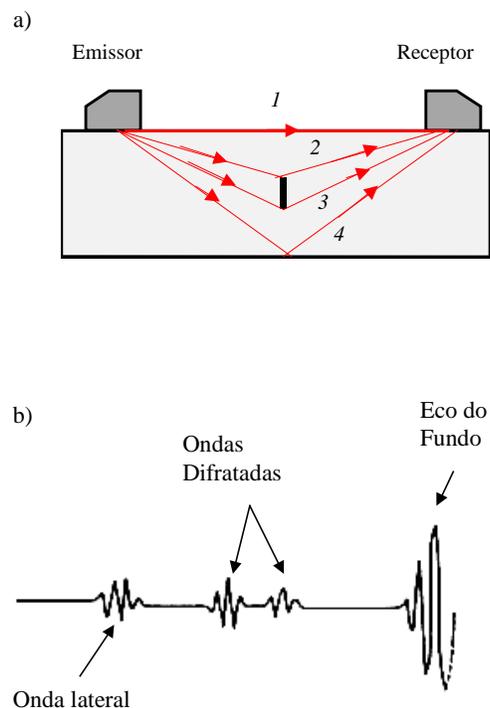


Figura II.24. a) Arranjo típico para TOFD [10]. b) modelo típico de pulsos de uma descontinuidade gerados pela técnica TOFD [11].

A figura II.25, é uma representação simplificada para a geometria do método TOFD, onde os transdutores são separados por uma distância $2S$, e as equações II.4 e II.5 fornecem o percurso da onda difratada pela ponta inferior do difrator.

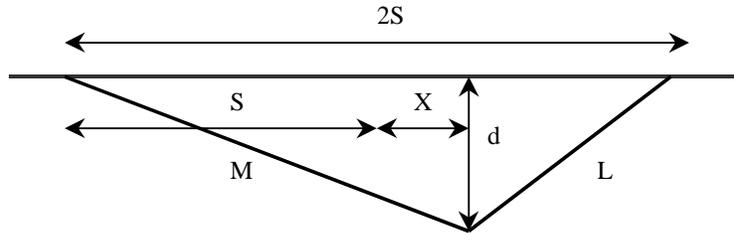


Figura II.25. Geometria generalizada para o método do tempo de percurso da onda difratada.

Onde:

d é a profundidade do difrator abaixo da superfície do objeto;

X é o deslocamento do difrator a partir do centro do plano entre os transdutores;

S é a distância do transdutor ao centro entre os dois transdutores.

$$L^2 = d^2 + (S - X)^2 \quad (\text{II.4})$$

$$M^2 = d^2 + (S + X)^2 \quad (\text{II.5})$$

O tempo T necessário para a energia ultra-sônica ser difratada pela ponta da trinca e recebida pelo transdutor receptor é dado por:

$$cT = \sqrt{d^2 + (S - X)^2} + \sqrt{d^2 + (S + X)^2} \quad (\text{II.6})$$

Onde:

c = a velocidade ultra-sônica;

d = a profundidade, abaixo da superfície, da descontinuidade responsável pela difração;

X = o deslocamento da descontinuidade do plano central entre os dois transdutores.

Se esta expressão é diferenciada com relação a X , pode ser mostrado que o tempo mínimo de percurso ocorre quando a ponta da trinca está exatamente a meio caminho entre os dois transdutores. Portanto, a localização lateral e a profundidade da ponta da trinca podem ser determinadas.

O tempo de percurso da onda difratada é usado para testes não destrutivos em tubulações e vasos de pressão devido as vantagens sobre a técnica pulso eco: velocidade, objetividade, reprodutibilidade, e insensibilidade às condições da superfície de solda. A técnica do tempo de percurso da onda difratada é freqüentemente usada para dimensionar as discontinuidades após elas terem sido detectadas por outro método ultra-sônico. O método da difração determina com precisão o comprimento e profundidade de trincas superficiais e internas. Contudo, a aplicabilidade da técnica pode ser limitada porque a ponta inferior da trinca pode não difratar energia suficiente para ser detectada [11].

II.5.5.3. RESOLUÇÃO DA TÉCNICA TOFD

O sinal recebido de uma trinca na técnica TOFD varia com vários parâmetros tais como o ângulo de incidência dos transdutores e a profundidade do defeito [15]. A resolução na direção da espessura é relacionada com o ângulo θ entre o transdutor, na posição de maior amplitude fornecida pelo feixe do transmissor, e a normal à superfície como mostrado na figura II.26. Supondo que a trinca a ser inspecionada seja perpendicular a superfície de inspeção e situada exatamente a meia distância entre os dois transdutores, o problema fica reduzido a uma única variável θ .

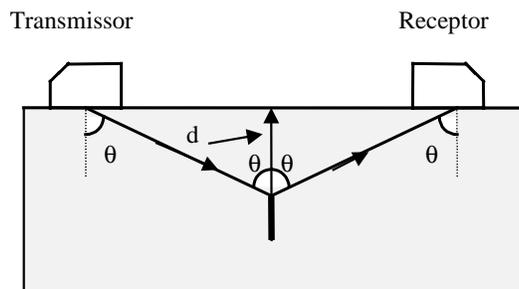


Figura II.26. Posição da trinca em relação a superfície e simétrica aos transdutores [10].

Os sinais difratados são de pequena amplitude e apresentando em geral uma relação sinal/ruído muito baixa. Neste caso, técnicas de processamento de sinais devem ser aplicados, tais como: média de sinais ou SAFT [10].

A posição angular do defeito em relação a superfície de inspeção influirá na amplitude do sinal difratado e no dimensionamento do defeito. Uma forte difração da ponta de um defeito plano é esperada quando este estiver perpendicular ao plano de incidência [16].

II.5.6. TÉCNICA DE MATRIZ DE TRANSDUTORES COM DEFASAGEM (“PHASED ARRAY”)

Essa técnica consiste em um arranjo de transdutores que oferece uma capacidade maior do que um transdutor simples, ou do que as técnicas estudadas anteriormente, para a determinação da forma, tamanho e orientação das discontinuidades. Existem três principais tipos de arranjos: linear, planar e anular. Nessa técnica, uma determinada mudança de fase é controlada eletronicamente para cada transdutor para a transmissão ultra-sônica. Esse arranjo produz significativo controle sobre a forma e direção do feixe ultra-sônico transmitido, satisfazendo, desse modo, a dois requisitos em aplicações

avançadas de ensaios não destrutivos: focalização dinâmica e varredura em tempo real [11].

Em um sistema de matriz de transdutores, o tempo de excitação do transdutor pode ser controlado. O ultra-som transmitido por cada elemento da matriz combina-se para formar uma frente de onda completa, produzindo focalização dinâmica. Esta frente de onda pode ser controlada excitando primeiro o elemento mais externo e depois excitando os demais elementos em direção ao transdutor mais interno, produzindo uma focalização do feixe [17, 18].

Uma segunda vantagem desse arranjo é o direcionamento do feixe ultra-sônico, aspecto crucial para a realização de imagem ultra-sônica em tempo real. Na imagem em tempo real, estruturas em movimentos rápidos podem ser detectadas, avaliadas e o procedimento pode ser automatizado, eliminando variabilidade de diagnósticos originados por diferentes técnicos.

Matriz de transdutores é uma técnica largamente utilizada para a formação de imagem ultra-sônica em medicina, mas em engenharia tinha seu uso limitado, principalmente devido a complexidade e custo do sistema [11]. Entretanto, novos estudos têm permitido seu emprego com vantagens sobre as outras técnicas para uma variedade de aplicações, incluindo inspeção de solda, detecção e mapeamento de trincas, detecção e mapeamento de corrosão em estruturas off-shore, entre outras [19]. O aumento constante na utilização desta técnica nestas novas áreas está também relacionado a redução do custo destes sistemas [20].

O emprego de matriz de transdutores neste tipo de inspeção pode trazer alguns benefícios, tais como alta velocidade de inspeção, equipamento de tamanho reduzido, melhor detecção de soldas em materiais austeníticos ou similares e reduzido tempo de exposição a radiação [20]. Essa técnica possui uma alta probabilidade de detecção de descontinuidades em juntas soldadas e é capaz de determinar a precisa localização da descontinuidade [18,21].

II.5.6.1. MATRIZ ANULAR DE TRANSDUTORES

Os transdutores empregados são separados dentro de um número de anéis concêntricos, como mostrado na figura II.27. A ação de sua focalização é ilustrada na figura II.28, onde os elementos da matriz anular são mostrados em seção ao longo do diâmetro do transdutor [9].

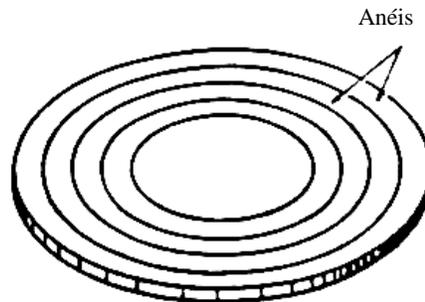


Figura II.27. Matriz anular de transdutores [9].

Para obter focalização durante a transmissão (figura II.28 a), atrasos são introduzidos na excitação do pulso para cada elemento da matriz. Se os atrasos são arranjados como ilustrado na figura, de tal modo que exista um maior atraso na transmissão do pulso do elemento do centro, então parte da frente de onda do anel externo terá percorrido uma distância maior, em qualquer instante, que os do centro. Dessa forma a frente de onda terá a forma côncava como mostrado e a onda convergirá para o foco.

A posição do foco pode ser mudada por alteração nos atrasos, mudando, dessa maneira, a curvatura da frente de onda emitida. Em um foco fechado, é maior a curvatura da frente de onda e maior a diferença em atrasos entre o centro e o anel externo [9].

Para obter focalização na recepção (figura II.28 b) o sinal recebido de cada anel é atrasado antes de ser adicionado, gerando um foco em um ponto específico da mesma forma que na transmissão. Isto requer um maior atraso para os transdutores do centro que para os externos, e o foco pode ser aproximado aos transdutores pelo aumento da diferença entre os atrasos.

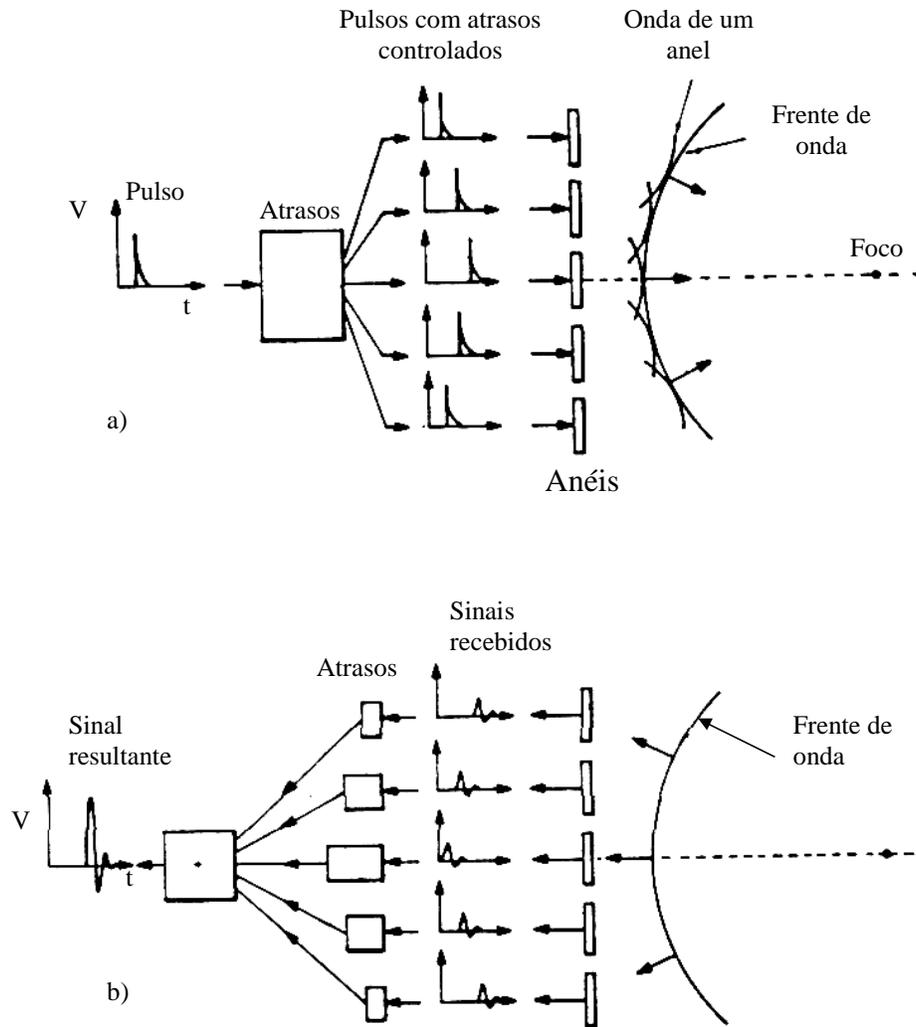


Figura II.28. a) Focalização eletrônica em transmissão,
b) focalização eletrônica em recepção [9].

Pode-se notar que os transdutores são simétricos em relação ao eixo central e o mesmo grau de focalização é obtido através de algum diâmetro do feixe para uma particular distância do transdutor.

Como foi dito, o feixe transmitido pode ser focalizado em diferentes profundidades pela alteração do comando dos atrasos, por exemplo, para os feixes numerados de um a quatro na figura II.29. Todas essas formas de feixe podem ser usadas juntas em um modo de operação chamada múltipla zona focal. Neste modo, o

instrumento utiliza o foco 1, mostrando os ecos que retornam da zona focal desse feixe. Ele então alterna para o segundo foco, mostrando os ecos da zona focal desse feixe, e assim sucessivamente. A forma do feixe equivalente é mostrada com uma linha tracejada [9].

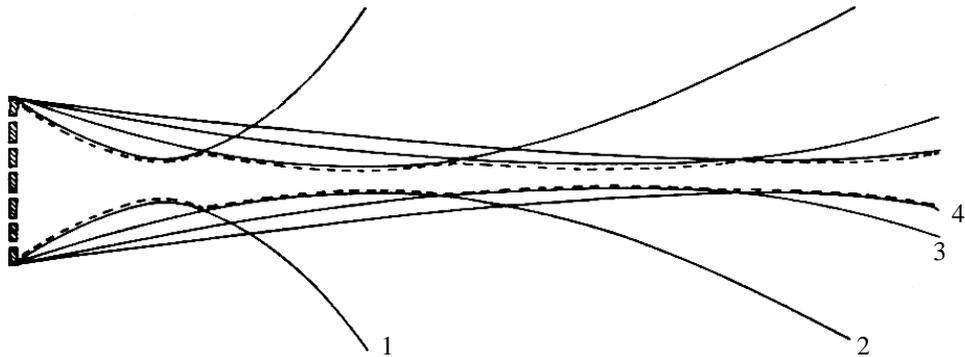


Figura II.29. Zona focal múltipla [9].

O foco pode também ser alterado durante a varredura em recepção. Neste caso o foco pode ser alterado durante a recepção dos ecos de cada pulso transmitido e isto é chamado de “focalização dinâmica” [22].

Como já visto anteriormente, a maior parte da energia ultra-sônica se concentra dentro de um lóbulo principal, no entanto pode haver alguma energia do feixe dentro de lóbulos laterais, e isso pode conduzir a falsos registros de ecos. A intensidade desses lóbulos laterais pode ser minimizada por apodização, ou seja, pela redução da amplitude de vibração do transdutor em direção a extremidade, no modo de transmissão, e pela redução da sensibilidade em direção a extremidade no modo de recepção. Isto é facilmente obtido com um transdutor anular por simples alteração no controle da amplitude de pulso transmitido para o anel e no ganho do sinal amplificado.

A forma do feixe ainda pode ser melhorada pelo controle da abertura dinâmica, desligando os anéis externos quando o comprimento da zona focal é pequeno, de forma a se obter uma zona focal mais longa (figura II.30).

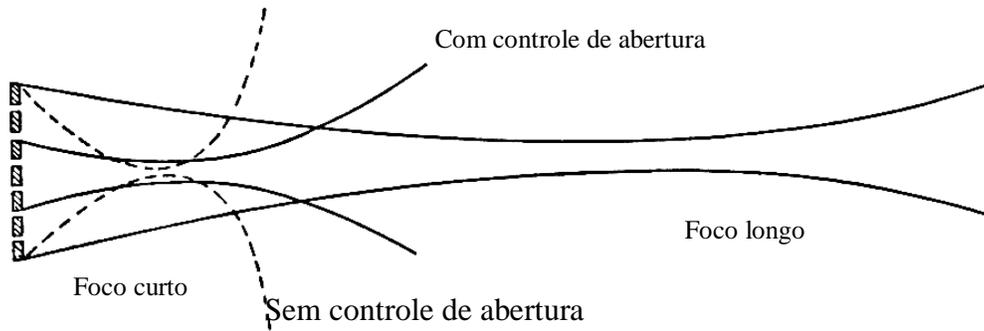


Figura II.30. Controle de abertura dinâmica [9].

II.5.6.2. MATRIZ LINEAR DE TRANSDUTORES

Esse arranjo é adequado para a implementação de um sistema ultra-sônico de imagem em tempo real. Ele permite o direcionamento e a focalização do feixe, além de possibilitar um processamento de sinais durante a formação da imagem. O equipamento consiste de um conjunto linear de pequenos elementos transdutores (figura II.31). Um grupo de elementos adjacentes é utilizado concomitantemente, de forma a projetar um feixe como ilustrado. O feixe faz a varredura pela alternância dos transdutores que compõem o grupo ativo de transmissão (figura II.32).

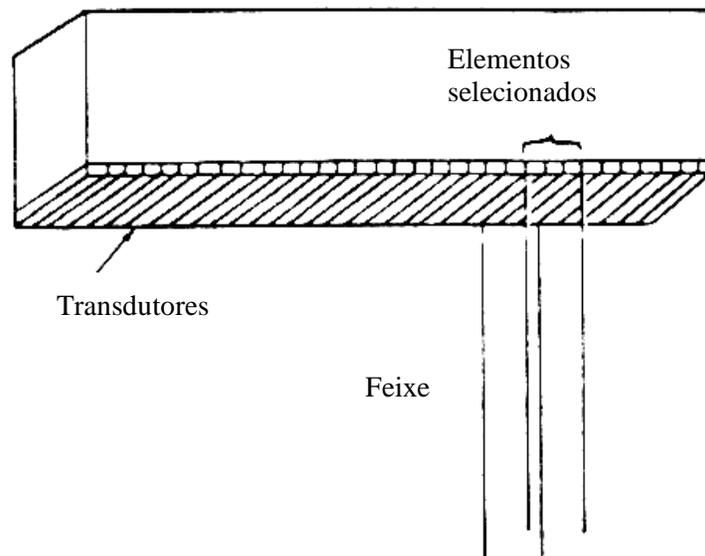


Figura II.31. Formação do feixe em uma matriz linear de transdutores [9].

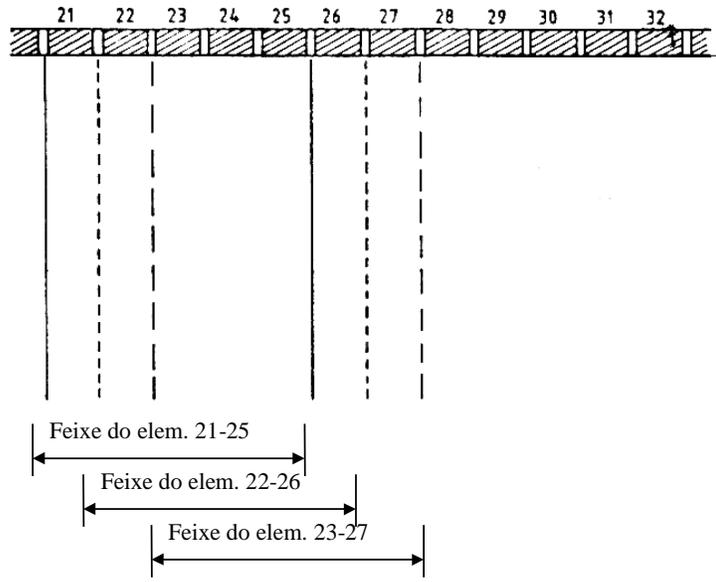


Figura II.32. Feixe em movimento de uma matriz linear [9].

O feixe pode ser focalizado em transmissão e recepção da mesma forma como mostrado no arranjo anular. A focalização eletrônica, contudo, atua somente no plano de varredura. Ao contrário da matriz anular de transdutores, não existe ação de focalização para reduzir a largura do plano de varredura. Pode ser utilizada uma focalização fixa, através da utilização de elementos de forma côncava ou de lentes cilíndricas, para reduzir a largura do plano de varredura (figura II.33). Também podem ser utilizados um controle de abertura dinâmico, de forma a melhorar o comprimento da zona focal próximo ao transdutor, e apodização, para reduzir o nível de lóbulos laterais [9].

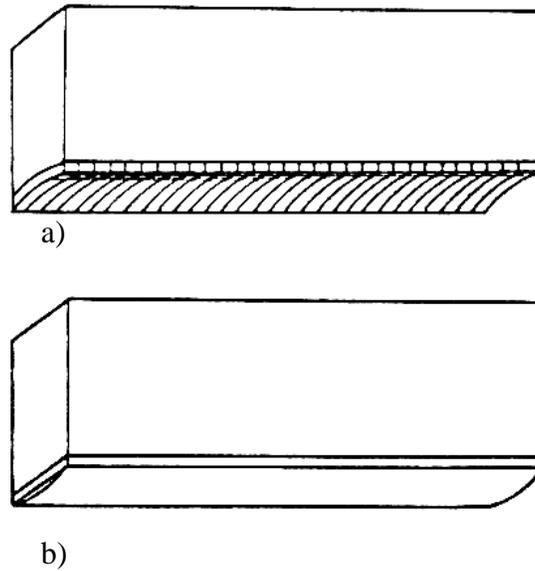


Figura II.33. Focalização usando a) transdutores côncavos, b) lentes [9].

Uma matriz linear tem algumas limitações. Por exemplo, a resposta da matriz de transdutores não é ideal. Isto ocorre devido ao acoplamento no modo de espessura e ao modo de vibração radial, que leva a um decréscimo no modo da frequência ressonante [11]. Também existem limitações para uma resposta angular uniforme dos elementos da matriz devido, em parte, à interferência de energia dos elementos adjacentes. Outro problema é causado pelos tempos de atrasos que controlam a seqüência de transmissão e recepção, que são discretos. Isso resulta em uma aproximação quantizada da suavização de curvas contínuas requeridas para a focalização e direcionamento ideais.

Em adição aos lóbulos laterais (reduzidos por apodização), a varredura por matriz de transdutores com defasagem também gera lóbulos no feixe, como resultado da interferência do ultra-som nos elementos regularmente espaçados. Esses lóbulos são chamados de lóbulos de espaçamento, são qualitativamente similares aos lóbulos laterais, e seu efeito é a formação de artefatos na imagem. Esse problema pode ser reduzido pelo aumento do número de elementos, mantendo o comprimento da matriz o mesmo, isto é, reduzindo o tamanho dos elementos [9, 23].

II.5.6.3. DIRECIONAMENTO DO FEIXE ULTRA-SÔNICO

Uma varredura setorial pode ser produzida sem movimento das partes usando um sistema de varredura eletrônico por defasagem dos transdutores, como mostrado na figura II.34. O direcionamento do feixe é obtido por meio dos atrasos na excitação dos diversos elementos, como utilizado na focalização da matriz anular. O mecanismo de direcionamento eletrônico do feixe é ilustrado na figura II.35 a. O princípio é muito similar ao já discutido para focalização eletrônica. Se o controlador de pulso transmitido para cada elemento aumenta o atraso com o aumento da distância através da matriz, então o pulso transmitido é emitido primeiro pelo elemento com menor atraso e por último pelo elemento com maior atraso. A frente de onda gerada é, então, inclinada em relação à face dos transdutores, e o feixe é emitido com um ângulo em relação à perpendicular à face do transdutor. Mudando a faixa de atrasos através da matriz altera-se a orientação do feixe[9].

A focalização pode ser obtida incorporando um grau de curvatura através do aumento dos atrasos com o número de elementos da matriz (figura II.35 b) [9]. Como na varredura da matriz linear, a focalização eletrônica acontece apenas dentro do plano de varredura. A redução na largura do feixe requer mudanças dos elementos transdutores ou o uso de lentes. Atrasos similares podem ser utilizados para direcionar o feixe e para focalizá-lo durante a recepção. Múltiplas zonas focais, focalização dinâmica, apodização e controle de abertura podem ser utilizados, da mesma forma que nas matrizes anular e linear.

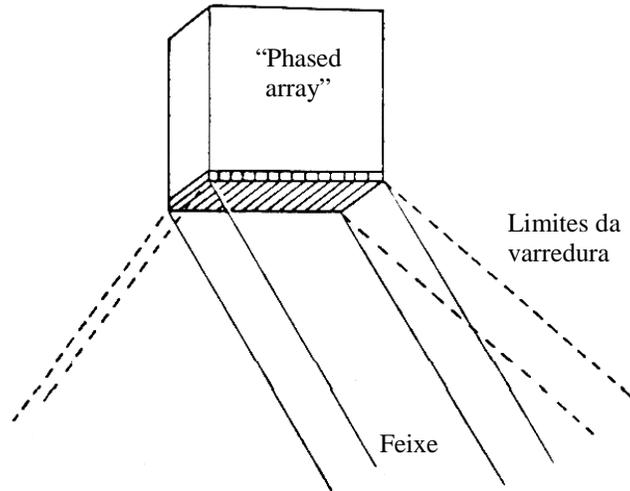


Figura II.34. O cabeçote de uma matriz de transdutores [9].

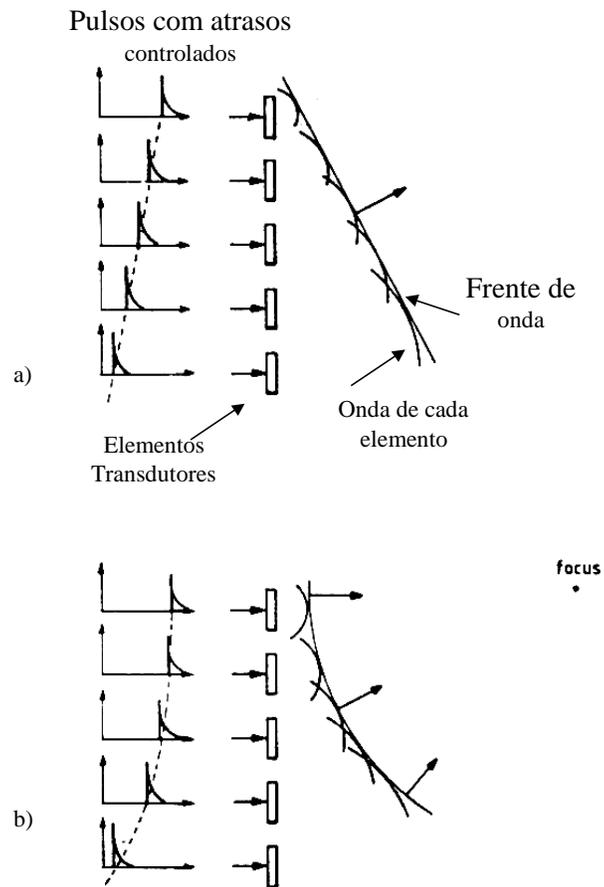


Figura II.35. a) Direcionamento do feixe eletrônico. b) feixe direcionado combinado com focalização [9].

II.5.7. SISTEMA ULTRA-SÔNICO MULTICANAL E MULTIPLEXER

Os sistemas multicanal e multiplexer são técnicas nas quais pode-se 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 multiplexer o objetivo é otimizar o processo, tornando-o mais rápido (reduzido tempo de inspeção), mais barato e menos tedioso para o operador, sendo que o processo pode ser totalmente automatizado.

As palavras “multicanal” e “multiplexer”, quando aplicadas para sistemas não destrutivos de testes ultra-sônicos, são freqüentemente usadas indiscriminadamente e intercambiavelmente, embora desiglem sistemas semelhantes mas distintos. Uma breve descrição ajudará a esclarecer alguns fatos associados a esses conceitos.

Primeiro, uma breve definição geral dos dois termos. 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, freqüência e tempo) simultaneamente ou individualmente [24].

Em geral, o termo “multiplexer” aplica-se para canais de rádio ou comunicação de voz, onde o ganho, freqüência 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 II.36).

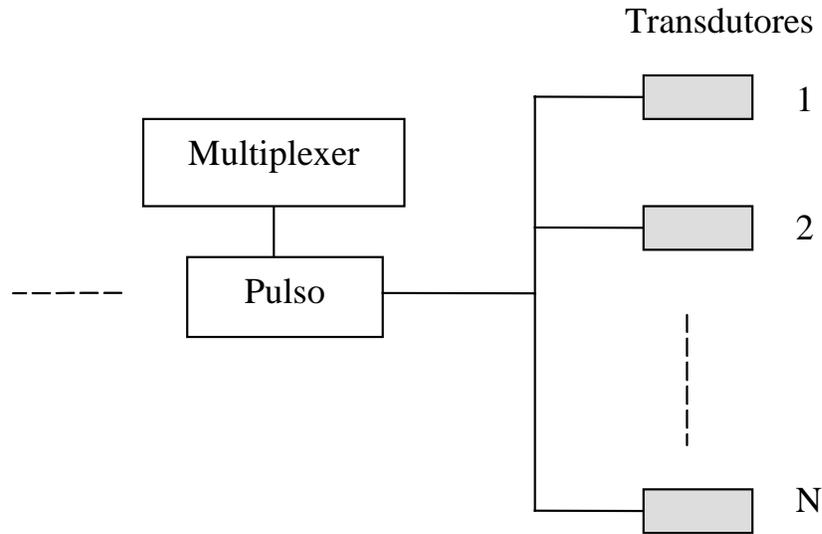


Figura II.36. Sistema multiplexer.

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. Não existe equipamento eletrônico disponível que possa ligar 1200V, 10 ns, com taxa de repetição de pulso na faixa de kHz. Portanto muitos sistemas multiplexer de ultra-som utilizam pulsos separados para cada transdutor. 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 multiplexer de ultra-som incorporam um preamplificador separado ajustável para cada transdutor (figura II.37) [24]. O sistema multiplexer possui agora um multicanal de pulsos e um multicanal de preamplificadores. O próximo passo agora é processar o sinal para obtermos a resposta desejada.

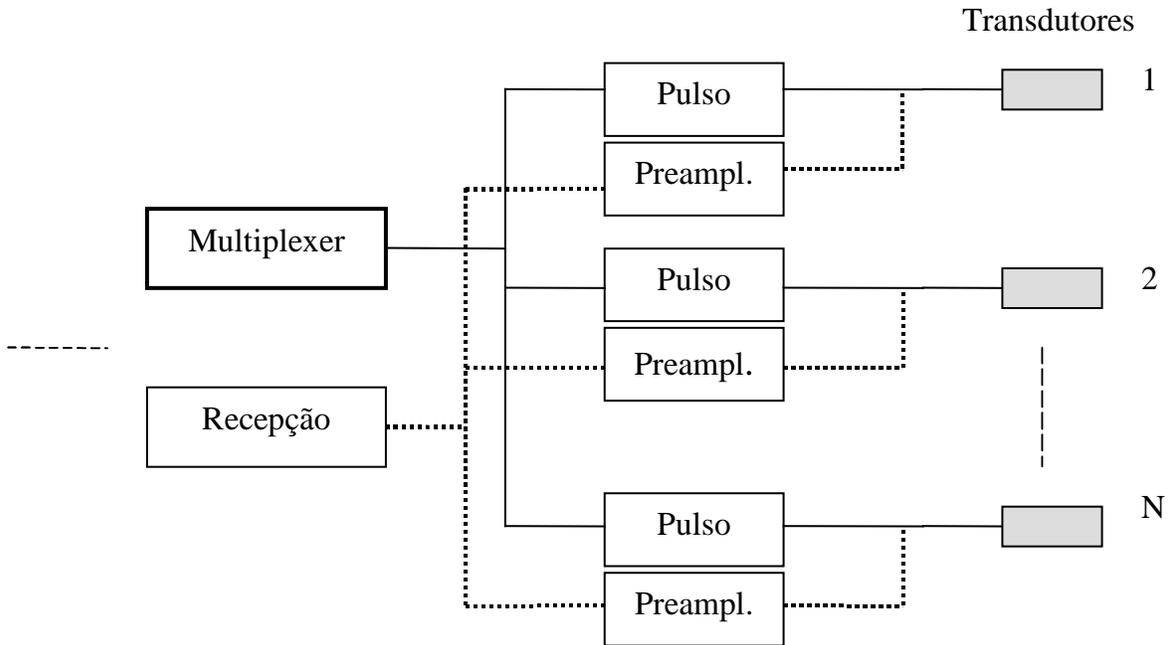


Figura II.37. Sistema multiplexer com gerador de pulsos independente e preamplificador.

Deve ser considerado também a vulnerabilidade do sistema multiplexer no que diz respeito a falhas nos componentes. Obviamente, que quando um dos caminhos do multiplexer 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 II.38) [24].

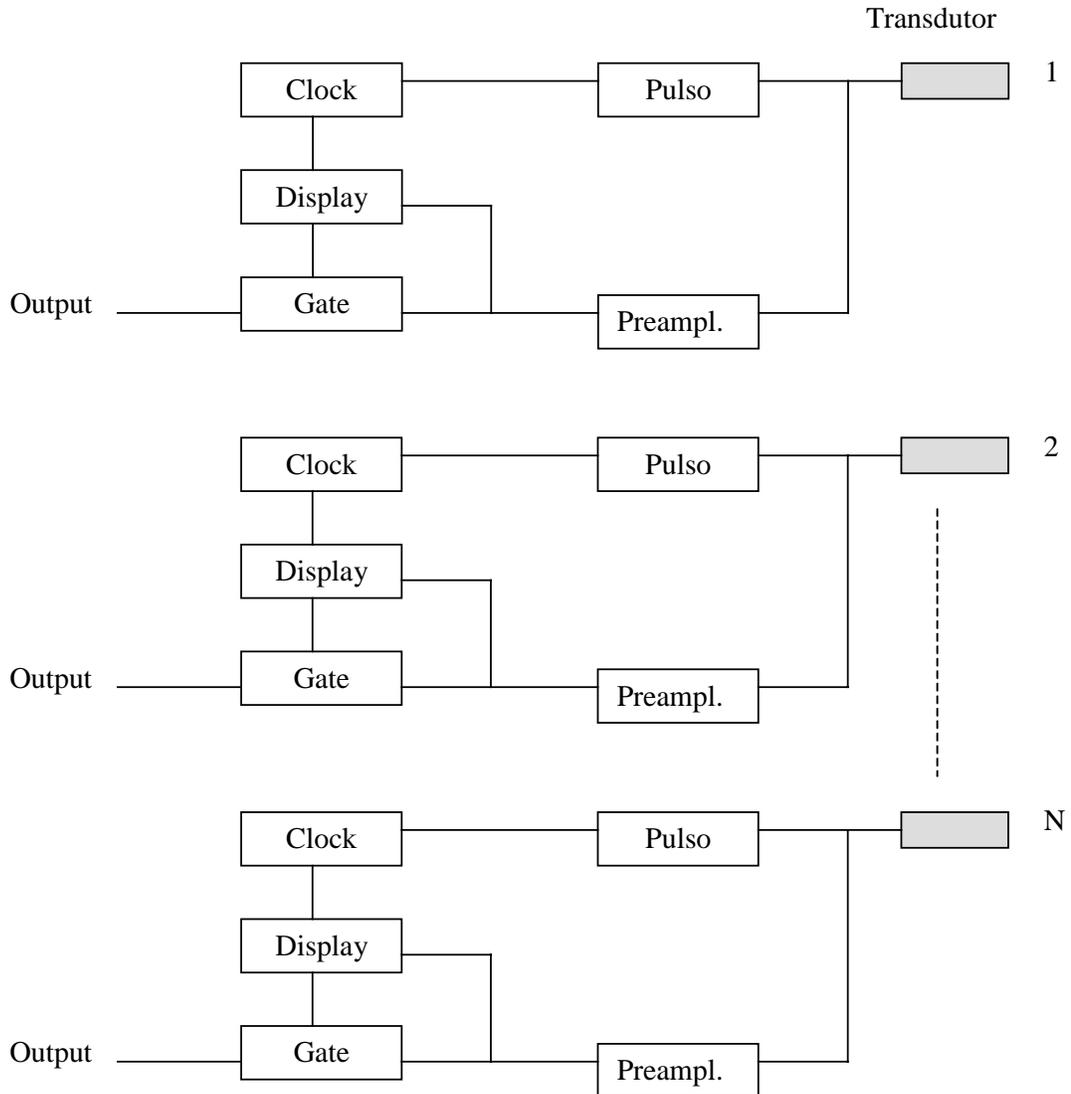


Figura II.38. Sistema multicanal [24].

Outro aspecto limitante do sistema multiplexer 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.

Uma conclusão que se pode chegar com essas definições é que um sistema ultra-sônico não conduz a um sistema multiplexer. Em muitos casos, “multiplexer” significa um híbrido entre um circuito multicanal e multiplexer, como é o caso que será estudado no item seguinte.

II.5.7.1. TÉCNICA UTILIZANDO SISTEMA MULTIPLEXER COM GERADOR DE PULSOS E PREAMPLIFICADOR INDEPENDENTE

No sistema multiplexer para medição de defeitos planares, como mostrado na figura II.39, 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.

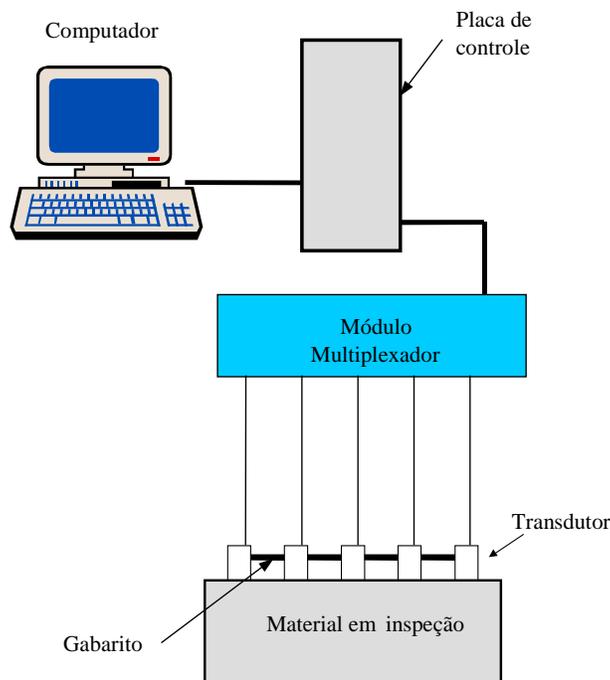


Figura II.39. Sistema multiplexer com gerador de pulsos e preamplificador independente.

O princípio de funcionamento deste sistema é descrito a seguir:

Uma placa gera periodicamente pulsos com determinado período. O pulso emitido é direcionado através de um dos canais. Neste instante, a placa recebe e digitaliza o sinal ultra-sônico vindo deste canal. Então, antes da próxima emissão ocorrer no canal seguinte, a placa gera uma interrupção do sinal para processá-lo, e armazena esses dados na memória do computador. O mesmo processo é executado na próxima emissão que estimulará o transdutor seguinte, e assim sucessivamente para todos os canais (figura II.40).

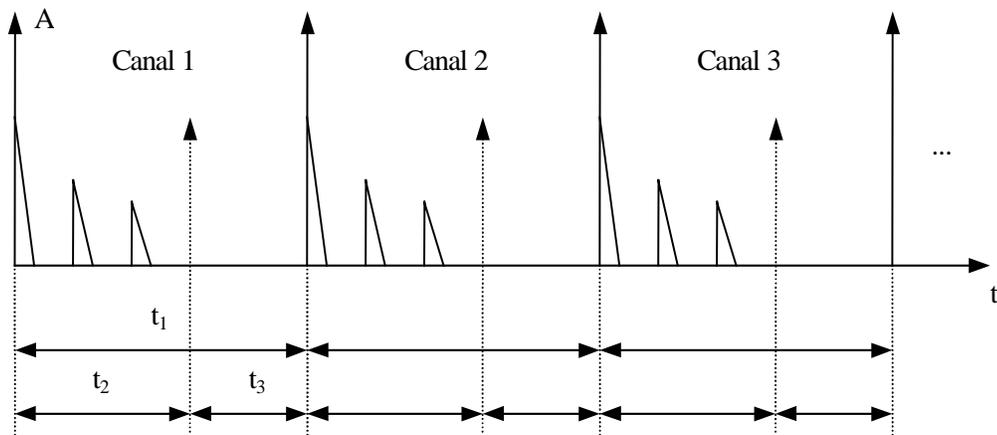


Figura II.40. Princípio de funcionamento de um sistema multiplexer com gerador de pulsos e preamplificador independente. t_1 é a duração total no canal, t_2 é a duração do sinal e t_3 é o período de processamento.

Como podemos observar, o transdutor trabalha obedecendo o modo pulso-eco, isto é, só emite um pulso após o eco da excitação anterior ter sido recebido por um transdutor, ou seja, não haverá interferência dos pulsos dos transdutores formando uma frente de onda completa, como no caso da matriz de transdutores com defasagem.

Neste sistema, diversas variáveis influenciam no processo de inspeção, como por exemplo, frequência, diâmetro e distância entre os transdutores, entre outros, os quais estão diretamente relacionados com o tamanho dos defeitos detectados e o grau de confiabilidade desejado. A figura II.41 é um esquema da interação de feixes ultra-sônicos com uma peça contendo descontinuidades planares. Mostrando que, dependendo da disposição dos transdutores, alguns defeitos podem não ser detectados.

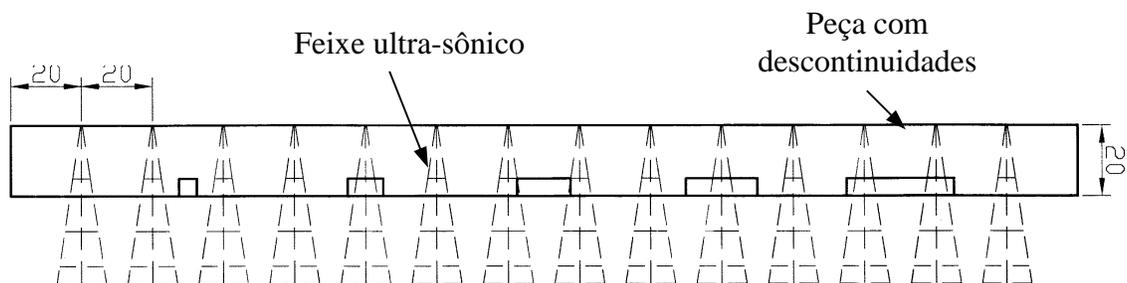


Figura II.41. Interação do feixe ultra-sônico com as descontinuidades.

II.5.7.2. SISTEMA AUTOMATIZADO PARA INSPEÇÃO DE SOLDAS

Este sistema ultra-sônico tem sido largamente utilizado no Canadá desde o início da década de 80 para inspeção mecanizada de solda circunferencial. 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 projeto de construção de dutos [25].

O real avanço do ultra-som mecanizado em solda circunferencial 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” [26]. Este sistema tem sido desenvolvido para a inspeção de solda circunferencial 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 [26].

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 [27]. 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 [28].

Nos sistemas mecanizados que operam com pulso-eco em juntas soldadas, a cobertura completa da solda é realizada em uma única varredura circunferencial, 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. A velocidade de varredura pode chegar a 100 mm/s, mas normalmente são empregadas velocidades de 60/70 mm/s. Para juntas de 32 polegadas de diâmetro, o tempo de varredura e aquisição de dados é aproximadamente 45/50 segundos, tendo-se, aproximadamente, a cada 1,5 minutos uma junta inspecionada e laudada. Normalmente os sistemas operam com frequências entre 4 e 5 Mhz [29]. A figura II.42 apresenta o esquema básico deste sistema.

Mais recentemente, tem sido utilizado a inspeção mecanizada de solda circunferencial 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 [30].

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 [31].

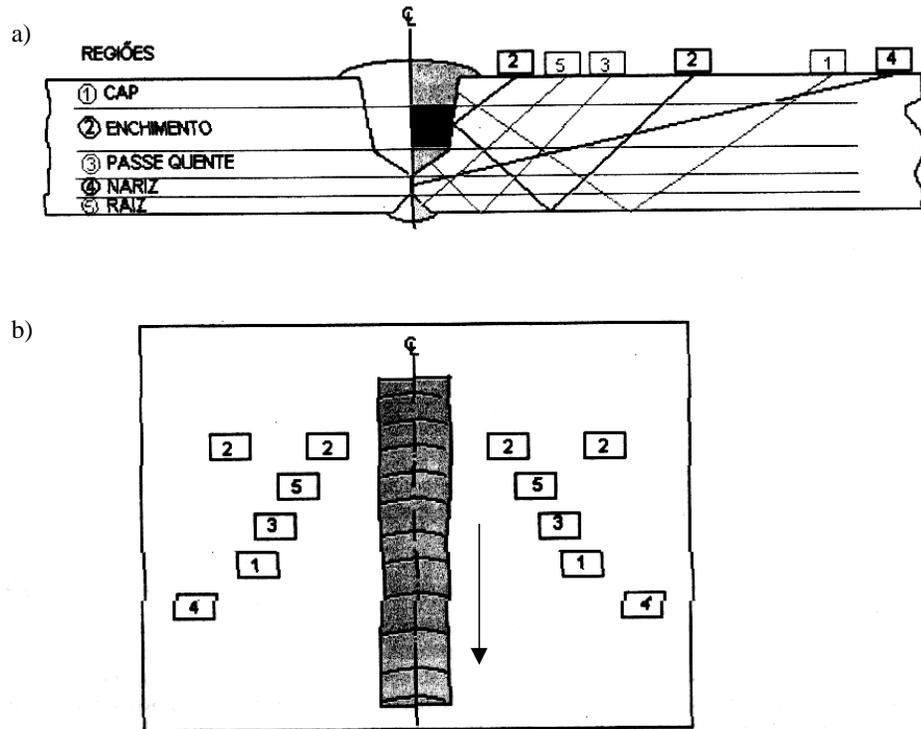


Figura II.42. Sistema multiplexado para inspeção de juntas soldadas. a) Regiões inspecionadas por cada par de transdutor em cada lado da junta. b) Arranjo dos transdutores na varredura [29].

II.6. SIMULAÇÃO MONTE CARLO

Simulação é o processo de replicar um modelo físico baseado num grupo de hipóteses e modelos concebidos da realidade. Simulação pode ser realizada teoricamente ou experimentalmente. Na prática, simulação teórica é usualmente realizada numericamente; isto tem se tornado uma ferramenta viável depois do advento dos computadores.

Para propósito de engenharia, simulação pode ser aplicada para prever ou estudar o desempenho e/ou resposta de um sistema. Para um grupo selecionado de valores para os parâmetros do sistema (variáveis do projeto), o processo de simulação produz uma medida específica do desempenho ou resposta deste sistema. Através de simulações repetidas, o desempenho do sistema para variações nos parâmetros pode ser examinado ou avaliado. Baseado neste procedimento, a simulação pode ser usada para avaliar projetos alternativos ou determinar projetos otimizados.

Simulação baseada no método Monte Carlo é utilizada para problemas envolvendo variáveis aleatórias, com distribuição de probabilidade conhecida. Isto envolve um grande número de simulações, usando para cada uma delas um grupo particular de valores das variáveis aleatórias, geradas de acordo com a distribuição de probabilidade correspondente. Para cada diferente grupo de valores das variáveis aleatórias gerado, uma solução (amostra) é obtida. Uma amostra de uma simulação Monte Carlo é similar a uma amostra de uma observação experimental. Portanto, o resultado de uma simulação Monte Carlo pode ser tratada estatisticamente, e os resultados podem ser mostrados na forma de um histograma, e podem ser aplicados métodos de inferência estatística. Por estas razões, Simulação Monte Carlo é também uma técnica amostral, sendo, portanto, seus resultados sujeitos a erros amostrais. Geralmente, soluções de Monte Carlo para uma amostra finita não são exatas [32].

Uma das tarefas principais de uma simulação Monte Carlo é a geração de números aleatórios de acordo com uma distribuição de probabilidade conhecida. Para um dado grupo de números aleatórios, a simulação constitui-se num processo determinístico.

Um exemplo de uma simulação Monte Carlo

A essência da simulação Monte Carlo pode ser descrita com um exemplo específico. Para esse propósito, considere o diagrama de atividades para a construção de um projeto como mostrado na figura II.43; na qual as setas representam atividades, enquanto que os nós representam a conclusão de uma ou mais atividades e o início da atividade subsequente.

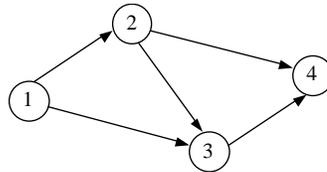


Figura II.43. Diagrama de atividades [32].

A duração das várias atividades são aleatoriamente distribuídas e estatisticamente independentes. A possível duração e probabilidades associadas são dadas na tabela II.1; essas representam a respectiva distribuição de probabilidades de duração das atividades. Suponha que seis dias tenham sido programados para a conclusão do projeto. Procura-se então determinar a probabilidade do projeto ser completado no tempo programado.

Tabela II.1. Duração das atividades [32].

Atividade	Duração (dias)	Probabilidade (f.d.p.)*
1-2	2	1/3
	3	1/3
	4	1/3
1-3	4	1/2
	5	1/2
2-3	1	2/3
	2	1/3
2-4	2	1/2
	3	1/2
3-4	2	1

* função densidade de probabilidade discreta

Conceitualmente, a conclusão do projeto dentro de seis dias requer o término de todos os possíveis (três) conjuntos de atividades entre os nós 1 e 4, isto é, os caminhos 1-2-4, 1-2-3-4, e 1-3-4. Denotando a duração da atividade i-j como T_{ij} , a probabilidade de completar o trabalho dentro de seis dias é dado por:

$$P(T \leq 6) = P[(T_{12} + T_{24} \leq 6) \cap (T_{12} + T_{23} + T_{34} \leq 6) \cap (T_{13} + T_{34} \leq 6)] \quad (\text{II.7})$$

Se a atividade 2-3 não existisse, apenas dois conjuntos de atividades, 1-2-4 e 1-3-4, seriam considerados. Assim, a duração desses dois conjuntos seriam estatisticamente independentes. A presença da atividade 2-3 cria não só um caminho adicional, mas também uma correlação entre os vários conjuntos de atividades. Portanto, o cálculo da probabilidade da equação II.7 é consideravelmente complicado. Como uma alternativa, simulações podem ser utilizadas para esse propósito, gerando-se possíveis conjuntos de duração de atividades. Por exemplo, desde que a duração da atividade 1-3 é igualmente provável ser 4 ou 5 dias, uma moeda pode ser lançada, e dependendo do resultado (cara ou coroa), 4 ou 5 dias podem ser assumidos como a duração desta atividade. Similarmente, para a atividade 1-2, duas das seis faces de um dado podem ser arbitrariamente assumidas para cada duração: 2, 3 ou 4 dias. Dependendo do resultado do lançamento do dado, a específica duração da atividade 1-2 pode ser gerada. Suponha que a duração das atividades 1-2, 1-3, 2-3 e 2-4, tenham sido geradas como 2, 5, 1 e 3 dias, respectivamente, como mostra a amostra 1 da tabela II.2. Para o caminho de atividades 1-2-4, será portanto, requerido cinco dias, enquanto que para o caminho 1-2-3-4 e 1-3-4 serão requeridos 5 e 7 dias, respectivamente. Desta maneira, o projeto não será completado dentro de seis dias para este conjunto de duração de atividades. Um outro conjunto de duração de atividades é igualmente gerado, como mostra a amostra 2 da tabela II.2. Neste caso, o projeto requer apenas 6 dias para ser completado. A tabela II.2, resume os resultados de 15 simulações, constituindo uma amostra de tamanho 15.

Tabela II.2. Simulação da duração do projeto.

<i>Amostra</i>	<i>Duração</i>								
	1-2	1-3	2-3	2-4	3-4	1-2-4	1-3-4	1-2-3-4	> 6 dias
<i>1</i>	2	5	1	3	2	5	7	5	<i>Sim</i>
<i>2</i>	2	4	1	3	2	5	6	5	<i>Não</i>
<i>3</i>	4	4	2	2	2	6	6	8	<i>Sim</i>
<i>4</i>	4	5	1	2	2	6	7	7	<i>Sim</i>
<i>5</i>	3	5	1	3	2	6	7	6	<i>Sim</i>
<i>6</i>	2	5	2	2	2	4	7	6	<i>Sim</i>
<i>7</i>	3	5	1	3	2	6	7	6	<i>Sim</i>
<i>8</i>	3	5	2	2	2	5	7	7	<i>Sim</i>
<i>9</i>	3	4	1	2	2	5	6	6	<i>Não</i>
<i>10</i>	3	5	1	2	2	5	7	6	<i>Sim</i>
<i>11</i>	4	5	2	2	2	6	7	8	<i>Sim</i>
<i>12</i>	4	5	1	3	2	7	7	7	<i>Sim</i>
<i>13</i>	3	5	2	2	2	5	7	7	<i>Sim</i>
<i>14</i>	3	5	1	3	2	6	7	6	<i>Sim</i>
<i>15</i>	2	5	1	2	2	4	7	5	<i>Sim</i>

Baseado nas observações, apenas em 2 casos entre os 15, o projeto será concluído dentro de 6 dias, logo a probabilidade do projeto ser finalizado dentro de 6 dias é estimado ser $2/15$ ou 0,13. Se outras 15 simulações são realizadas, o resultado da probabilidade poderá ser completamente diferente. De fato, 18 repetições foram realizadas independentemente para amostras de tamanho 15 e 30, ou seja, 15 ou 30 simulações para cada amostra, a probabilidade de conclusão do projeto baseado neste dois tamanhos amostrais está resumida na tabela II.3. Contudo, a probabilidade estimada da conclusão do projeto varia de uma simulação para outra. Pode ser observado que a faixa de variação e o desvio padrão da probabilidade estimada diminui com o aumento do tamanho da amostra. Para um dado intervalo de confiança, o valor da probabilidade estimada pode ser calculado baseado no tamanho da amostra [33]. Por exemplo, baseado

na amostra de tamanho 30 e na probabilidade estimada de 0,23, para um intervalo de confiança de 95% a atual probabilidade da conclusão do projeto é dada por [32]:

$$\langle P \rangle_{0,95} = 0,23 \pm 1,96 \sqrt{\frac{0,23 \times 0,77}{30}} = \{0,08; 0,38\}$$

Tabela II.3. Probabilidade estimada de conclusão do projeto [32].

Simulação	Probabilidade estimada de conclusão em 6 dias	
	<i>Amostra de tamanho 15</i>	<i>Amostra de tamanho 30</i>
1	0,13	0,23
2	0,33	0,30
3	0,40	0,30
4	0,27	0,30
5	0,20	0,27
6	0,33	0,33
7	0,33	0,30
8	0,27	0,34
9	0,13	0,20
10	0,44	0,35
11	0,33	0,30
12	0,27	0,17
13	0,20	0,27
14	0,07	0,10
15	0,20	0,33
16	0,20	0,23
17	0,33	0,37
18	0,27	0,23
Média	0,26	0,27
Desvio padrão	0,10	0,07
Faixa de variação	0,07 – 0,44	0,10 – 0,37

Por outro lado, se todas as 18 simulações da amostra de tamanho 30 são combinadas (resultando em uma amostra de tamanho 540), para um intervalo de confiança de 95% a probabilidade do trabalho ser concluído em 6 dias será:

$$\langle P \rangle_{0,95} = 0,27 \pm 1,96 \sqrt{\frac{0,27 \times 0,73}{540}} = \{0,23; 0,31\}$$

Portanto, quanto maior o número de simulações, maior é a confiança no estimador.

II.6.1. FUNDAMENTOS MATEMÁTICOS DA SIMULAÇÃO MONTE CARLO

Qualquer função $f_X(x)$ não negativa, e tal que:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f_X(x) dx = 1 \quad (\text{II.8})$$

pode definir uma função densidade de probabilidades (f.d.p.) de uma variável aleatória contínua X . A área compreendida entre dois valores, 'a' e 'b', da abscissa x e da curva $f_X(x)$, fornece a probabilidade (proporção teórica esperada) da variável pertencer ao intervalo limitado pelos dois pontos. Através do conceito de integral, isto pode ser escrito como [33]:

$$P(a \leq X < b) = \int_a^b f_X(x) dx \quad (\text{II.9})$$

pois a integral de uma função entre dois pontos determina a área sob a curva compreendida entre estes.

Considere, agora, a variável aleatória X com função densidade $f_X(x)$ e dois pontos, 'a' e 'b', bem próximos (figura II.44), isto é, $h = b - a$ é pequeno, e considere x_0 o ponto médio do intervalo $[a, b]$. Observando a figura II.44 é fácil verificar que [33]:

$$P(a \leq X < b) \cong h \cdot f_X(x_0) \quad (\text{II.10})$$

o que significa aproximar a área da figura entre os pontos 'a' e 'b' pelo retângulo de base 'h' e altura $f(x_0)$. É fácil verificar que a aproximação melhora com 'h' tendendo a zero.

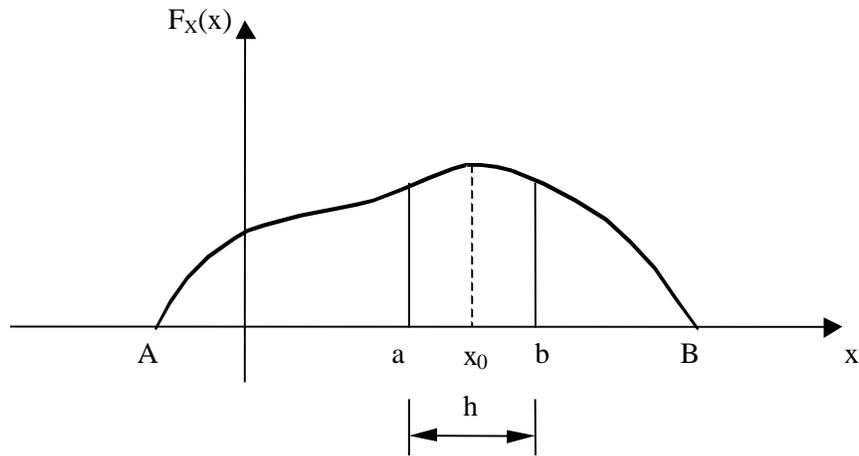


Figura II.44. Função densidade de probabilidade.

Dividindo agora o intervalo $[A, B]$, onde $f(x) > 0$, em n partes de amplitudes iguais a $h = (B-A)/n$ (figura II.45); definindo os pontos médios das classes como x_1, x_2, \dots, x_n e considerando também a variável discreta Y_n para representar os valores x_1, x_2, \dots, x_n , a probabilidade associada a cada sub-intervalo é dado por:

$$p_i = P(Y_n = x_i) \cong f_X(x_i) \cdot h \quad (\text{II.11})$$

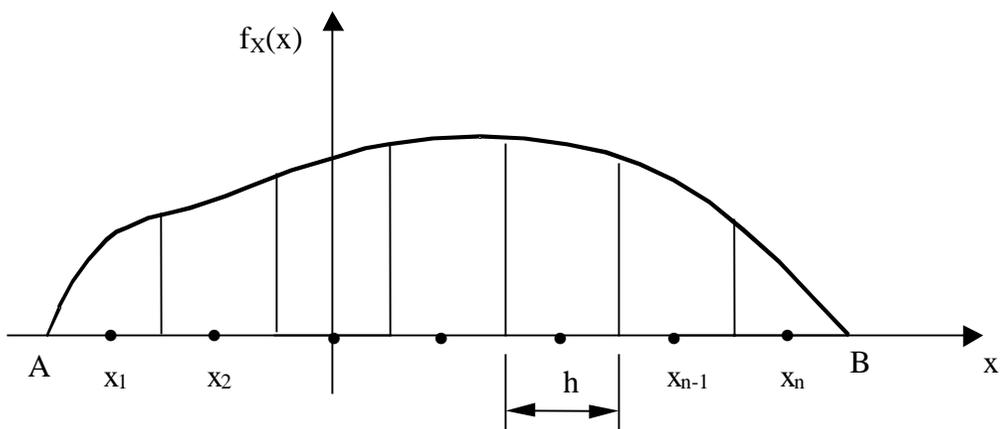


Figura II.45. Intervalo $[A, B]$ dividido em 'n' partes de amplitude iguais.

O centro de gravidade da figura plana definida por $f_X(x)$ pode ser obtido por:

$$X_{CG} \cong \sum_{i=1}^n x_i . p_i \cong \sum_{i=1}^n x_i . f_X(x_i) . h \quad (\text{II.12})$$

uma vez que $f_X(x)$ tem área unitária, conforme equação II.8.

Em estatística esta grandeza é definida como o valor médio ou valor esperado da variável aleatória X , isto é:

$$X_{CG} = E(X) \cong \sum_{i=1}^n x_i . f_X(x_i) . h \quad (\text{II.13})$$

Para determinar $E(X)$ com mais precisão, pode-se aumentar o número de intervalos, diminuindo a amplitude 'h' dos mesmos. No limite, quando h tende a zero, tem-se o valor de $E(X)$. Assim, define-se [33]:

$$E(X) = \lim_{n \rightarrow \infty} E(Y_n) = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n x_i p_i \quad (\text{II.14})$$

mas da definição de integral, tem-se que, se o limite da equação II.14 existe, ele define a integral de $xf(x)$ entre A e B, isto é,

$$E(X) = \int_A^B x . f_X(x) dx = \int_{-\infty}^{+\infty} x . f_X(x) dx \quad (\text{II.15})$$

De maneira análoga, pode-se obter o valor esperado de qualquer função $g(x)$ dependente da variável aleatória [33]. Neste caso,

$$E[g(X)] = \int_{-\infty}^{+\infty} g(x) . f_X(x) dx \quad (\text{II.16})$$

Os mesmos conceitos apresentados anteriormente, podem ser expandidos para um conjunto de várias variáveis aleatórias. Suponha um conjunto de variáveis aleatórias, $\mathbf{X} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, neste caso qualquer interação probabilística a respeito das variáveis

aleatórias, pode ser obtida a partir da função densidade de probabilidades conjunta das mesmas, definida por $f_{\mathbf{X}}(\mathbf{x})$. Neste caso, o valor esperado de uma função $g(\mathbf{x})$ de x_n variáveis aleatórias é dado por:

$$E[g(\mathbf{X})] = \int_{-\infty}^{+\infty} g(\mathbf{X}) \cdot f_{\mathbf{X}}(\mathbf{X}) d\mathbf{x} \quad (\text{II.17})$$

II.6.2. AMOSTRAGEM DIRETA (“crude” Monte Carlo)

De acordo com o exemplo que foi apresentado na seção II.6, a probabilidade do projeto ser finalizado em seis dias pode ser calculada como:

$$P_S = \frac{\text{número de vezes que } T \leq 6}{\text{número total de simulações}} = \frac{\sum_{i=1}^N I(T_{12}, T_{13}, T_{23}, T_{24}, T_{34})}{N} \quad (\text{II.18})$$

onde ‘I’ é uma função indicadora que significa:

$$\begin{aligned} I(T_{12}, T_{13}, T_{23}, T_{24}, T_{34}) &= 1, \text{ se } T \leq 6 \\ &= 0, \text{ se } T > 6 \end{aligned}$$

Observe que ‘Ps’ nada mais é do que o valor esperado da função indicadora $I(T_{12}, T_{13}, T_{23}, T_{24}, T_{34})$, portanto, a equação II.18 pode ser escrita como:

$$P_S = \int_{-\infty}^{+\infty} I(\mathbf{t}) \cdot f_{\mathbf{T}}(\mathbf{t}) d\mathbf{t} \quad (\text{II.19})$$

onde, $f_{\mathbf{T}}$ é a função densidade de probabilidades conjunta dos tempos $T_{12}, T_{13}, T_{23}, T_{24}, T_{34}$. Como no exemplo estes tempos são estatisticamente independentes, e da definição de função densidade de probabilidades conjunta [34], tem-se:

$$f_{\mathbf{T}}(\mathbf{t}) = f_{T_{12}}(t_{12}) \cdot f_{T_{13}}(t_{13}) \cdot f_{T_{23}}(t_{23}) \cdot f_{T_{24}}(t_{24}) \cdot f_{T_{34}}(t_{34}) \quad (\text{II.20})$$

onde as funções $f_{T_{ij}}$ são apresentadas na tabela II.1.

Num caso genérico, a probabilidade de ocorrência de um evento pode ser então tratada pela seguinte expressão [35]:

$$P_s = \int_{-\infty}^{+\infty} I(\mathbf{x}) \cdot f_{\mathbf{x}}(\mathbf{x}) d\mathbf{x} \quad (\text{II.21})$$

onde

$I(\mathbf{x}) = 1$, se ocorre o evento

$I(\mathbf{x}) = 0$, se não ocorre o evento e

$f_{\mathbf{x}}(\mathbf{x})$ é a função densidade de probabilidades conjunta das variáveis aleatórias que definem o resultado do evento.

A técnica de simulação Monte Carlo, resolve a equação II.21 numericamente. Esta técnica envolve a geração artificial e aleatória de amostras das variáveis aleatórias \mathbf{X} , isto é, $\mathbf{X}_i = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, sendo ‘n’ o número de variáveis aleatórias consideradas. Para cada amostra x_i , avalia-se $I(x_i)$ e a probabilidade ‘Ps’ pode então ser expressa por [35]:

$$P_s = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I(\mathbf{X}_i) \quad (\text{II.22})$$

sendo N o número de simulações.

A geração dos valores de cada amostra \mathbf{X}_i deve ser baseada na função densidade de probabilidades $f_{\mathbf{x}}(\mathbf{x})$. Técnicas para esta finalidade são apresentadas na ref. [32].

Como esta metodologia envolve simulações, o número de realizações (amostras) deve ser controlado para que exista uma dada confiança no valor estimado de ‘Ps’ através da equação II.22. De acordo com a ref. [32], uma maneira de estimar o erro associado em função do número de simulações (N) é dado por:

$$\%erro = 200 \sqrt{\frac{1 - P_s}{NP_s}} \quad (\text{II.23})$$

onde P_s é a probabilidade estimada para o evento considerado e N é o tamanho da amostra. Existe 95% de chance que o erro percentual da probabilidade estimada seja menor que o dado pela equação II.23 [32]. Como exemplo, se 10.000 simulações são executadas, obtendo uma probabilidade estimada de 0,01, a equação II.23 produzirá um erro de 20%. Desta maneira, é 95% provável que a probabilidade esteja dentro de $0,01 \pm 0,002$. Por outro lado, se uma precisão de $0,01 \pm 0,001$ é requerida a equação II.23 pode ser usada para obter o número requerido de simulações, que será $N = 39.600$.

No entanto, apesar do erro envolvido no processo de simulação, que pode ser monitorado, a simulação Monte Carlo, pode ser aplicada para cálculo de probabilidade de processos envolvendo variáveis aleatórias, fornecendo uma medida do desempenho do sistema.

CAPÍTULO III

MATERIAIS E MÉTODOS

III. 1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo são descritas as metodologias e procedimentos experimentais utilizados no desenvolvimento desta tese. Inicialmente, são apresentadas as características dos materiais inspecionados (seção III.2), identificando os corpos de prova, as características dos equipamentos (seção III.3), os métodos de aquisição de sinais (seção III.4) e por último o método empregado de processamento e análise desses sinais (seção III.5).

III.2. MATERIAL INSPECIONADO

III.2.1. CORPO DE PROVA 1

Um corpo de prova foi confeccionado a partir de uma chapa de aço carbono de especificação AISI 1020 de 20mm de espessura com 200mm de largura por 300mm de comprimento. Nele foram usinados furos planos em três diferentes profundidades (5, 10 e 15mm) e diâmetros de 5, 10, 15, 20 e 30mm, conforme figura III.1.

A geometria do corpo de prova procura simular defeitos planares em relação à superfície de inspeção, de profundidades e diâmetros diferentes, de modo que se possa avaliar a detectabilidade de diferentes defeitos para diversas distâncias entre aquisição de sinais.

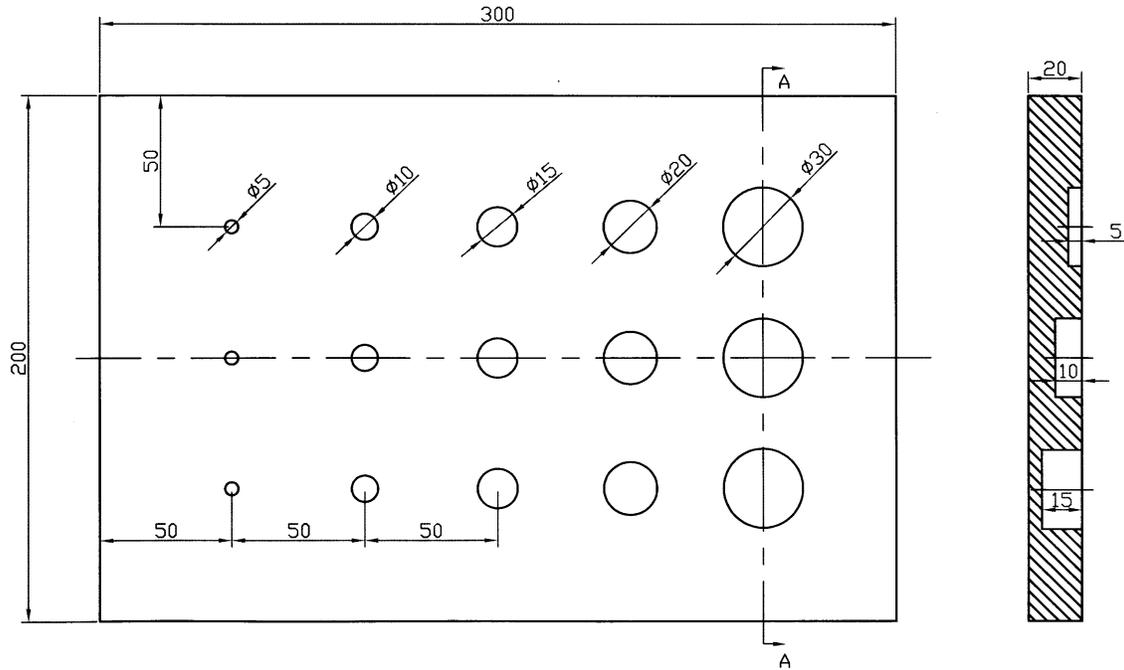


Figura III.1. Geometria do corpo-de-prova 1. Dimensões em milímetros.

III.2.2. CORPO DE PROVA 2

O material utilizado como segundo corpo de prova, tal como descrito por De Padua [36], foi retirado de um vaso de pressão acumulador de torre estabilizadora de uma unidade de refino primário de uma planta petroquímica da PETROBRAS. Este material constitui-se de uma porção cortada de uma chapa de aço de especificação ASTM A516-70, que esteve em serviço por 200.000 horas à temperatura de 56 °C e pressão 12,2 kgf/cm² (figura III.2).

Este vaso de pressão foi retirado de funcionamento por apresentar danos causados pelo H₂S (sulfeto de hidrogênio), como corrosão generalizada, perda de espessura, fissuração e trincamento nas regiões próximas às conexões por solda e nos bocais e elevado grau de empolamento [37]. A região estudada neste trabalho corresponde à calota do tanque que inicialmente foi mapeada e dimensionada parcialmente por De Padua, utilizando um método de ultra-som automatizado [36].

Características do material:

- Material fornecido pelo CENPES/PETROBRAS
- Aço carbono-manganês
- Geometria: Porção cilíndrica
- Espessura: 40 mm
- Comprimento: 1000 mm
- Largura: 300 mm

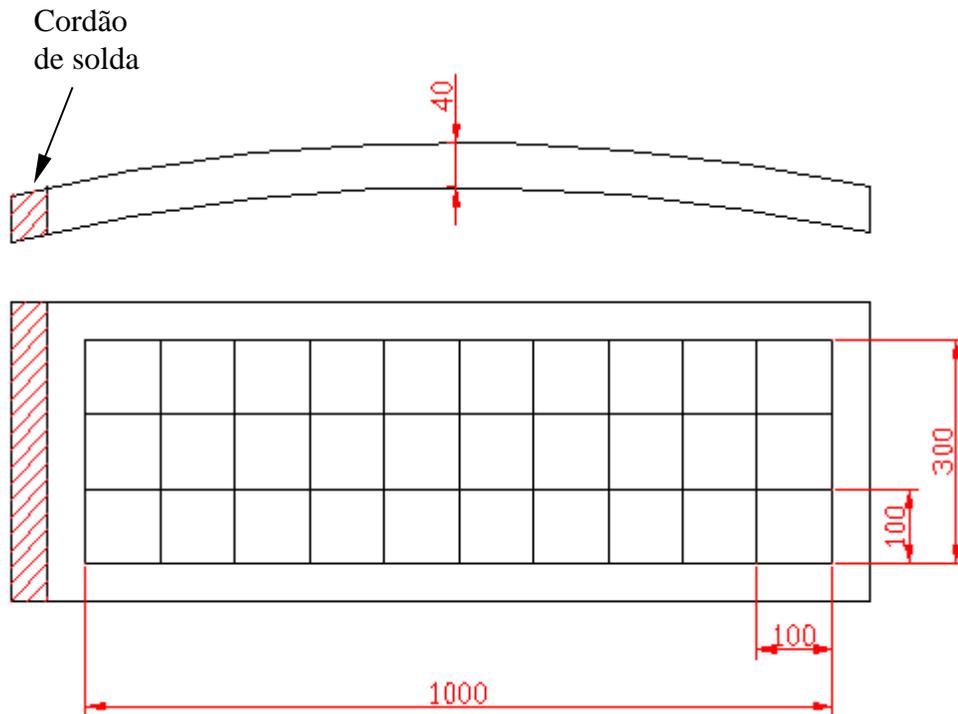


Figura III.2. Esquema da geometria do corpo de prova 2.
Dimensões em milímetros [36].

De Padua [36] especificou a área de inspeção conforme procedimento N-1594 da PETROBRAS [38], o qual determinou a padronização das malhas de varredura em quadrantes com 100mm de lado e numerados como mostra a figura III.3.

Neste trabalho o corpo de prova foi inspecionado integralmente e comparado com os resultados obtidos por De Padua [36]. Os quadrantes escuros (ver figura III.3) foram

inspecionados, enquanto que os brancos não foram inspecionados, porque possuíam uma superfície bastante irregular ou pela ausência de defeitos.

As regiões nas proximidades das bordas do corpo de prova não foram levadas em consideração na marcação, por terem sido afetadas termicamente pelo corte com chama oxi-acetilênica.

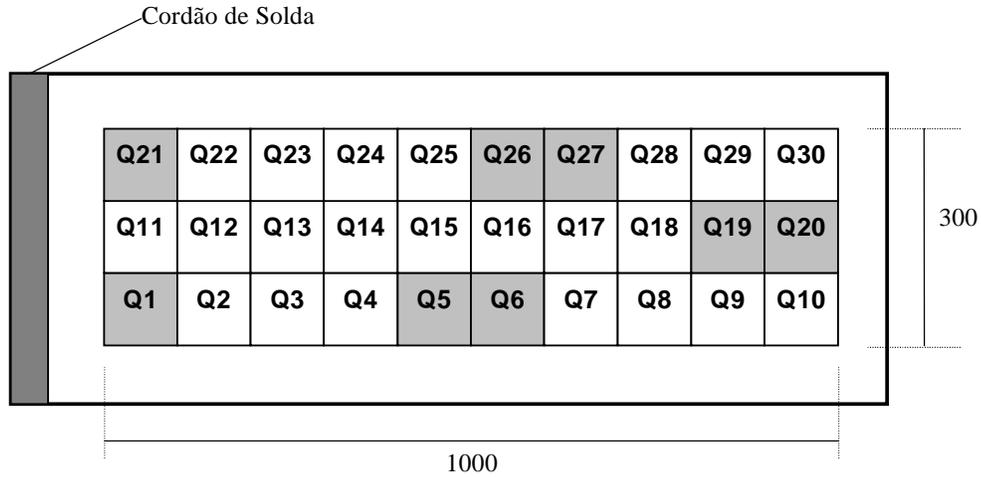


Figura III.3. Marcação da área de inspeção estabelecida.
Dimensões em milímetros [36].

III.3. EQUIPAMENTO

Foram utilizados dois equipamentos de ultra-som. O primeiro de fabricação Karl Deutsch, modelo Echograph 1080, tipo analógico, pulso-eco - A-Scan (figura III.4). Este equipamento permite a transferência do sinal analógico para o computador para ser digitalizado.



Figura III.4. Aparelho de ultra-som Echograph 1080.

Em uma outra etapa do trabalho foi utilizado um equipamento multicanal para inspeção por ultra-som, fabricado pela Lecoeur Electronique, composto de oito canais, como descrito a seguir (figura III.5):

- Um microcomputador equipado com placa de ultra-som, “Visual Saphir”, responsável pelo controle de digitalização e processamento do sinal;
- Um módulo multiplexador sobre o qual pode-se acoplar até oito transdutores funcionando simultaneamente em modo pulso eco ou no modo transmissão/recepção. O dispositivo é constituído de oito emissores/pré-amplificadores;
- Um programa de controle e processamento dos sinais.



Módulo multiplexador

Transdutor
ultra-sônico

Figura III.5. Sistema de inspeção Lecoecur.

Estão descritas a seguir as características dos transdutores empregados para a realização do trabalho, em ambos os equipamentos de ultra-som.

- Transdutor Krautkrämer, frequência 2MHz, diâmetro 10mm, código do fabricante H2K, para trabalho por imersão;
- Transdutor Krautkrämer, frequência 5MHz, diâmetro 5mm, código do fabricante H5M, para trabalho por imersão;
- Transdutor Krautkrämer, frequência 4MHz, diâmetro 10mm, código do fabricante MB4S, para trabalho por contato direto.

III.4. SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE SINAIS

III.4.1. SISTEMA AUTOMÁTICO DE INSPEÇÃO UTILIZANDO MESA DE COORDENADAS XY

Inicialmente, para fazer a inspeção do corpo de prova 1, utilizou-se um mecanismo de posicionamento automático do transdutor. Este sistema permite a inspeção em um plano XY, escolhendo a distância entre aquisições nas coordenadas X e Y. O sistema consta de um tanque de imersão provido de um sistema de varredura automático, um aparelho de ultra-som convencional (Echograph 1080), uma placa digitalizadora marca Gage (conversor A/D – frequência de digitalização: 40MHz) acoplada ao microcomputador e um sistema de posicionamento dos transdutores, baseado em motor de passo.

O programa Neoend, desenvolvido no LABOEND/COPPE/EE/UFRJ, controla o posicionamento e reconstrói a imagem nos formatos B-scan, C-scan e D-scan. A figura III.6 mostra esquematicamente um sistema de inspeção automático, desde o tanque contendo o material sob inspeção, o transdutor, o sistema automático de varredura, passando pelo aparelho que adquire o sinal até o computador que armazena os sinais e exibe os diferentes tipos de varreduras realizadas.

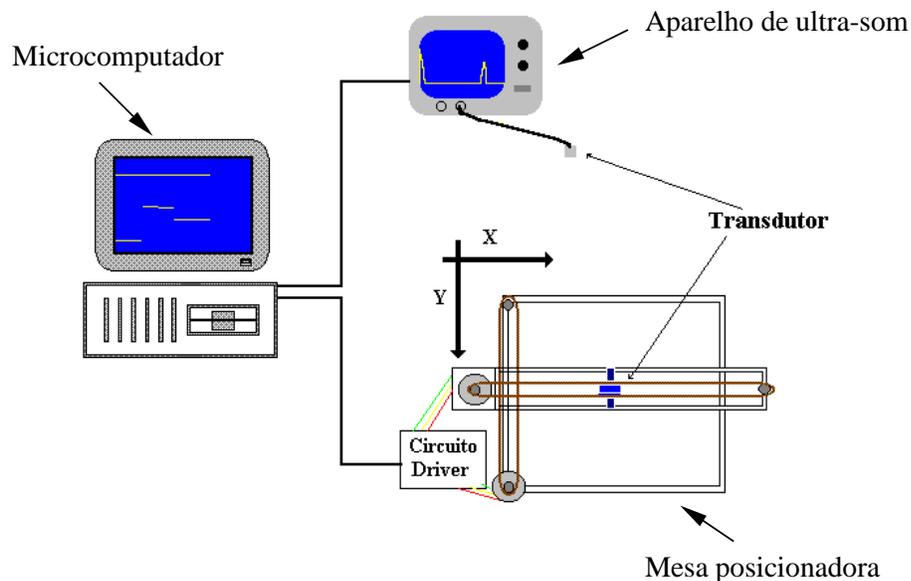


Figura III.6. Esquema do sistema automático de inspeção.

O sistema automático de inspeção emprega o método pulso-eco por imersão, enquanto que o sistema convencional emprega o método pulso-eco por contato direto, sendo que o método automático garante uma maior eficiência na transmissão do feixe [8].

III.4.2. SISTEMA AUTOMÁTICO DE INSPEÇÃO UTILIZANDO EQUIPAMENTO MULTICANAL

Em outra etapa do trabalho, para realizar a inspeção dos corpos de prova, foi utilizado um sistema multicanal automatizado especialmente projetado para inspeção em casco de navio do tipo FPSO (navio para a produção e estocagem temporária de petróleo). O sistema trabalha com oito canais ultra-sônicos simultaneamente, no entanto, trabalhou-se nesta tese apenas com três canais, pois só existiam disponíveis três transdutores iguais.

O sistema (figura III.7) se destina ao monitoramento de perda de espessura em casco de navios, sendo composto de um veículo de inspeção onde será acoplado um módulo multiplexador composto de oito canais ultra-sônicos, podendo trabalhar tanto no modo pulso-eco quanto no modo transmissão-recepção. Um programa desenvolvido no LABOEND/COPPE/EE/UFRJ, controla a geração/aquisição de sinais, os quais são armazenados em um computador, de modo a obter um registro permanente de todo ensaio. O veículo é responsável pelo deslocamento dos transdutores ao longo do casco. O sistema de acionamento deste veículo é composto por motores de passo, drivers e um controlador inteligente que permite a programação da velocidade, aceleração, desaceleração entre outros (figura III.8). O controle do veículo está interligado ao sistema multicanal, nele podemos executar tanto varredura manual quanto automática, estabelecendo entre outros parâmetros a distância entre os transdutores e entre aquisições. O controle automático permite programar o veículo para executar vários movimentos seqüenciais, possibilitando, dessa maneira, fazer uma varredura total de uma área de interesse. Os resultados são mostrados em mapas de cores C-scan.

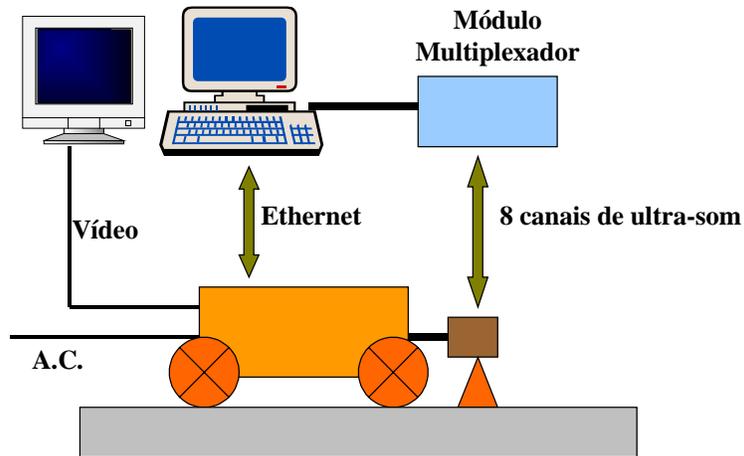


Figura III.7. Esquema do sistema multicanal de inspeção.

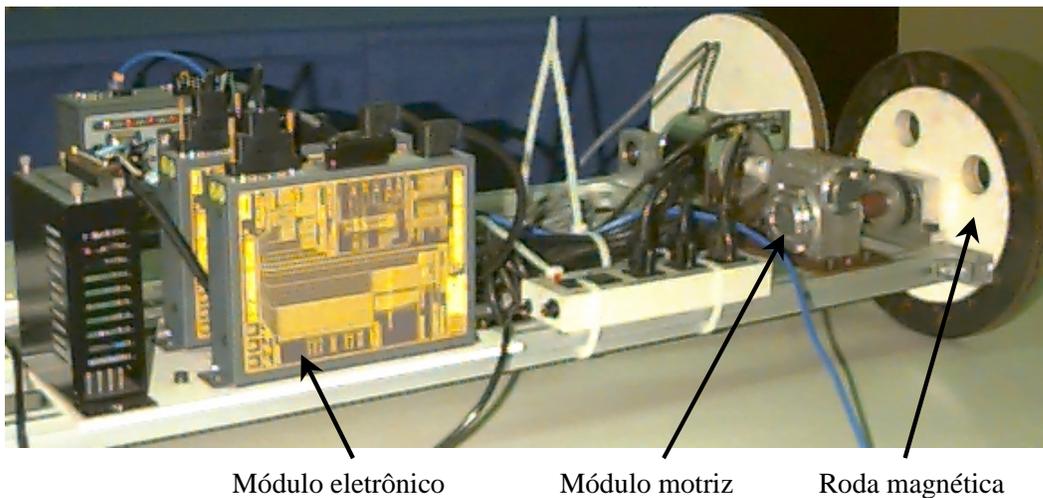


Figura III.8. Veículo para movimentação dos transdutores.

O princípio de funcionamento do sistema multicanal está descrito a seguir.

A placa de ultra-som “visual saphir” gera periodicamente pulsos numa determinada frequência (PRF). O pulso emitido é direcionado através de um dos canais do módulo multiplexador. Em seguida, a placa recebe e digitaliza o sinal ultra-sônico vindo deste canal. Antes da próxima emissão ocorrer no canal seguinte, a placa gera uma interrupção do sinal para processá-lo, armazenando os dados na memória do computador. O mesmo processo é executado na próxima emissão que estimulará o próximo transdutor, e assim sucessivamente para todos os canais. A figura III.9 é uma representação esquemática do sistema.

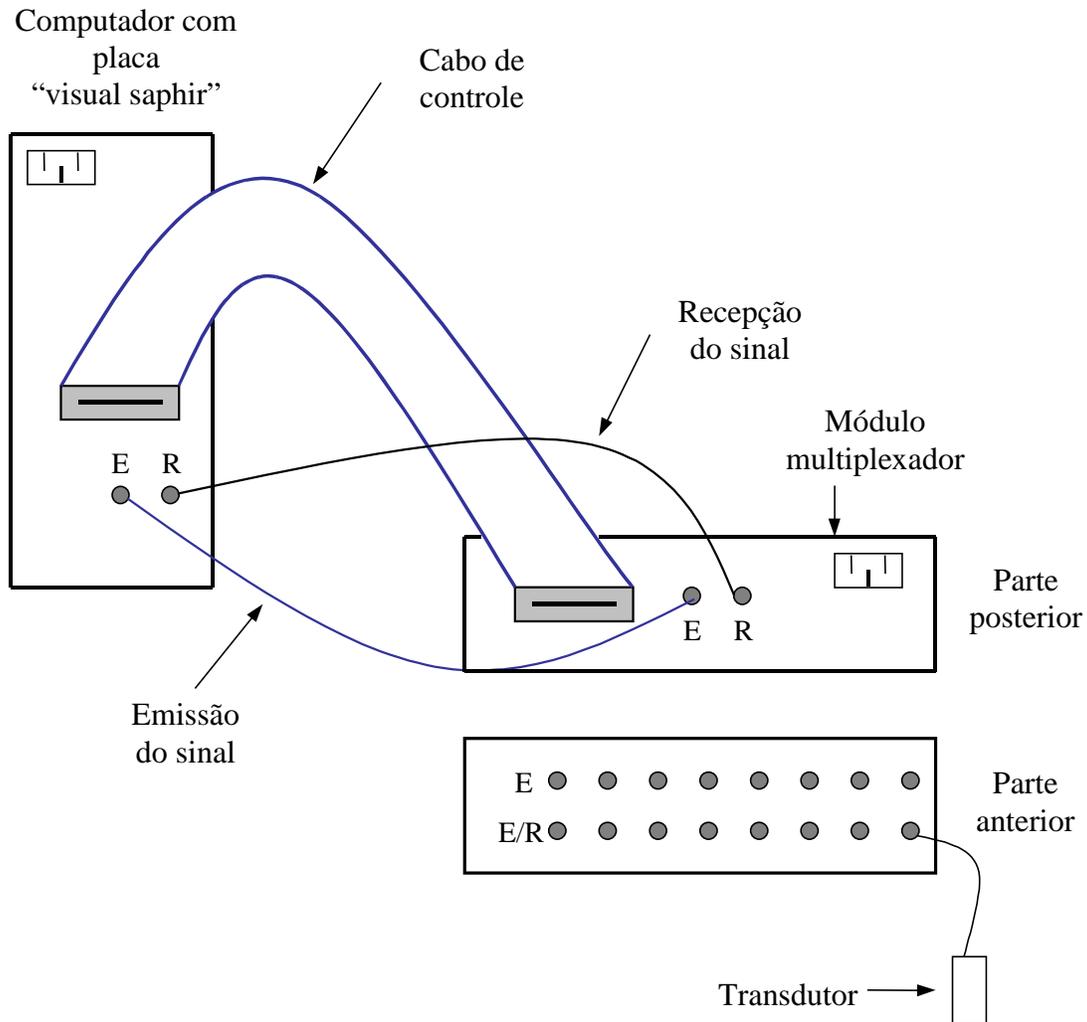


Figura III.9. Esquema do sistema de inspeção.

III.5. PROCEDIMENTO DE INSPEÇÃO, ANÁLISE E TRATAMENTO DOS SINAIS

III.5.1. UTILIZANDO O PROGRAMA NEOEND

Inicialmente efetuou-se a inspeção do corpo de prova 1 utilizando o programa Neoend. Foram efetuadas várias varreduras utilizando diversas distâncias entre aquisições, de modo que se avaliasse a detectabilidade de diferentes defeitos para diversas distâncias entre aquisições. Utilizou-se o transdutor de especificação

Krautkrämer H2K para este trabalho e a posição XY para início da inspeção era escolhido aleatoriamente.

Após a varredura da área selecionada pode-se obter o sinal A-scan, e as imagens B-scan, C-scan e D-scan, onde cada uma fornece informações diferentes da área inspecionada. Através dessas imagens pode-se visualizar as regiões defeituosas, a perda de espessura naquela região e, dependendo da distância entre aquisições, pode-se dimensionar os defeitos detectados.

Para cada ensaio realizado foi traçado uma curva de referencia, levando-se em consideração a amplitude dos sinais dos defeitos.

A imagem A-scan é o sinal que aparece na tela do aparelho de ultra-som. Numa varredura, cada ponto adquirido possui um sinal A-scan correspondente e a partir do processamento conjunto de todas estes sinais é que se obtém as imagens dela derivadas, B-scan, C-scan e D-scan.

A figura III.10 mostra o perfil de uma peça que foi inspecionada utilizando um sistema automático, da qual obteve-se as imagens mostradas na figura III.11. A figura III.11 exemplifica o sinal A-scan e as imagens B-scan, C-scan e D-scan, geradas a partir do programa Neoend [36].

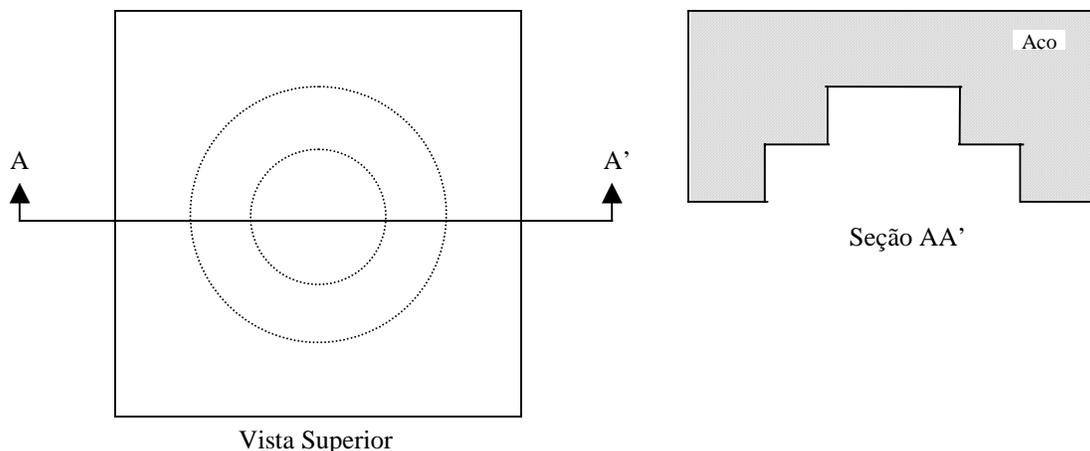


Figura III.10. Peça inspecionada, que originou as imagens da figura III.11 [36].

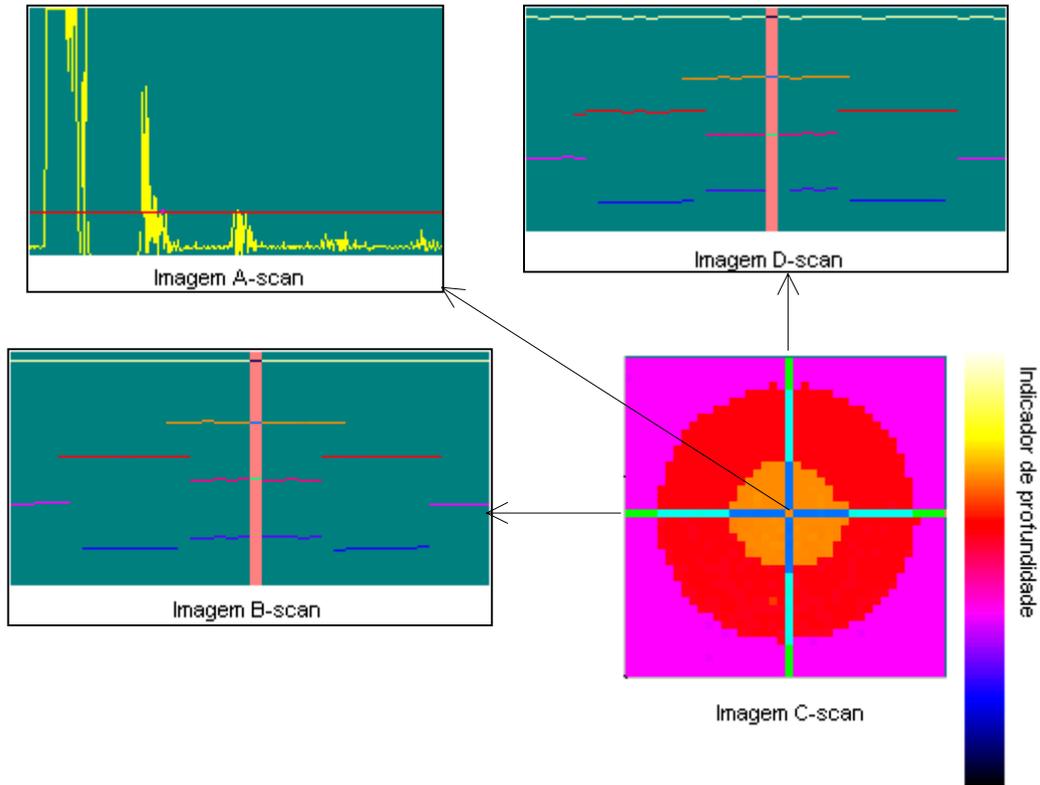


Figura III.11. Exemplo de uma imagem C-scan, suas seções transversais, B-scan e D-scan, e o sinal A-scan de qual todas derivam [36].

III.5.2. UTILIZANDO O MATLAB

Efetuuou-se a inspeção do corpo de prova 1 e do corpo de prova 2 utilizando o sistema multicanal de varredura.

No corpo de prova 1, as varreduras foram realizadas na direção do maior comprimento (300mm), com distância entre transdutores de 50mm (transdutores alinhados com os furos), fixos por um gabarito. Foram adquiridos sinais com distâncias entre aquisições de 10mm, 20mm, 30mm, 40mm e 50mm, de modo que se avaliasse a detectabilidade de diferentes defeitos para diversas distâncias entre aquisições. A posição para início da inspeção era escolhida aleatoriamente.

No corpo de prova 2, as varreduras foram realizadas na direção do maior comprimento (1000mm), com distância entre transdutores de 30mm, 40mm e 50mm,

fixos por um gabarito. Para cada distância entre transdutores foram adquiridos sinais com distâncias entre aquisições de 10mm, 20mm, 30mm, 40mm e 50mm, com o objetivo de avaliar o sistema de inspeção para um caso real. A consistência dos resultados obtidos foi avaliada através de comparação com resultados conhecidos. A posição para início da inspeção era escolhido aleatoriamente.

Após a varredura de uma área selecionada pode-se obter o sinal A-scan da área inspecionada. No entanto, o programa fornecido pelo fabricante do sistema apresenta o inconveniente de necessitar de um grande número de pontos para obter uma boa resolução do sinal A-scan, tornando o arquivo muito extenso, e também não fornece a imagem C-scan da área inspecionada, o que é fundamental para uma avaliação qualitativa da detectabilidade dos defeitos.

Para superar os problemas mencionados, foi desenvolvido em software Matlab um programa para processamento e análise dos sinais adquiridos pelo sistema multicanal de varredura. Os sinais são processados e o resultado é expresso em forma de mapas de cores. Neste processo cada ponto inspecionado recebe uma cor, que em uma escala, representa a amplitude do eco do defeito, e em consequência, representa também o nível de deterioração da chapa, formando uma imagem C-scan da área inspecionada. O programa carrega os pontos referentes aos pontos A-scan's, em extensão '.dat' ou '.mat', dentro de uma matriz, em seguida a matriz é submetida a diversas rotinas (figura III.12) para gerar a imagem C-scan (figura III.13).

Após o programa carregar numa matriz os pontos dos diversos sinais A-scan's, geralmente, com 1500 pontos cada sinal (figura III.14), a matriz é submetida a diversas rotinas como descrito abaixo:

- Refinamento – Reduz para 220 pontos cada sinal A-scan, mantendo uma boa resolução (figura III.15).
- Alisa – Realiza um alisamento do sinal A-scan, preenchendo com zeros as demais posições, mantendo os 220 pontos (figura III.16).
- Curva – É traçado uma curva de referência para definir quais os pontos de interesse na imagem (acima da curva) e descartar os pontos sem relevância (abaixo da curva). Levando-se em consideração a amplitude dos sinais dos defeitos.

- Detecta picos – Seleciona apenas o maior valor de cada conjunto de pontos, preenchendo com zeros as demais posições (figura III.17).
- Nível – Define a profundidade que a imagem é mostrada na peça. É mostrado apenas um ponto de cada imagem A-scan e todos na mesma profundidade.
- Plotar – Plota a imagem C-scan da área inspecionada (figura III.13).
- A-scan – Selecionando o botão A-scan do programa e em seguida um ponto da imagem C-scan, pode-se obter a imagem A-scan referente a este ponto, conforme figura III.18. Através da imagem A-scan podemos dimensionar a espessura naquela região. Esta janela também nos fornece a posição (linha e a coluna) referente aquele A-scan.



Figura III.12. Janela do programa para processamento dos sinais.

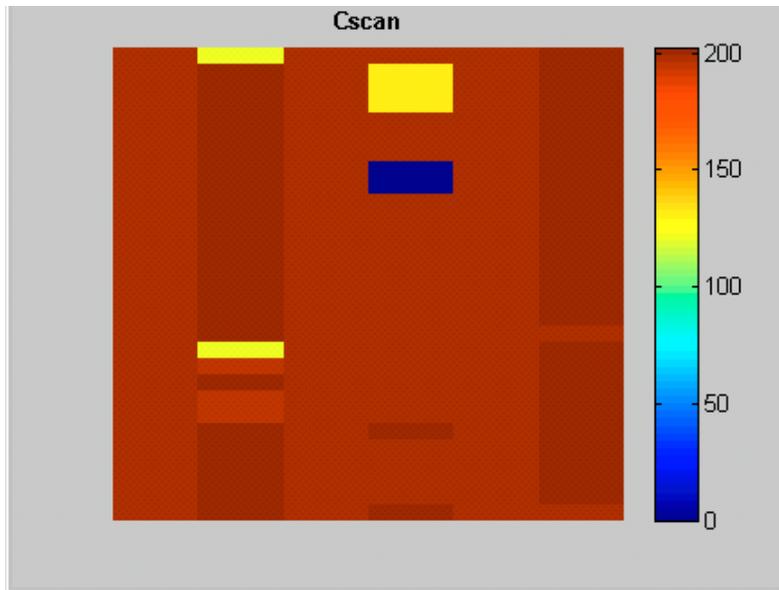


Figura III.13. Imagem C-scan da área inspecionada.

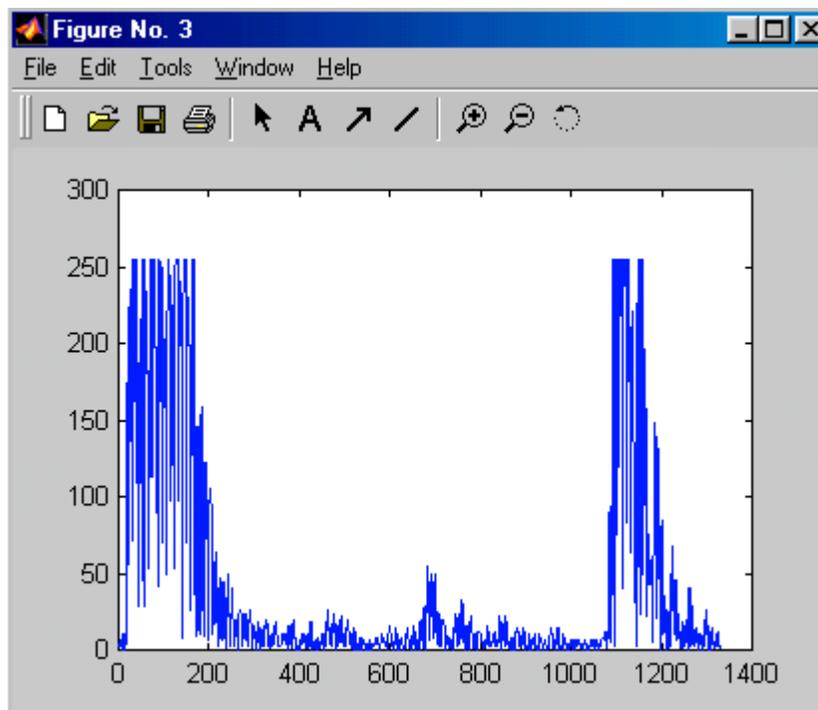


Figura III.14. Sinal A-scan com 1500 pontos.

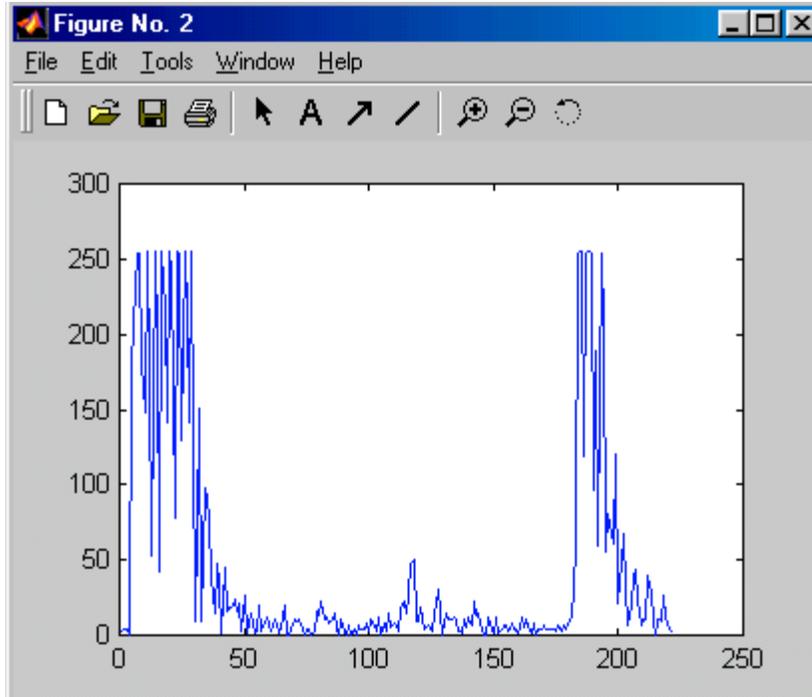


Figura III.15. Sinal A-scan com 220 pontos.

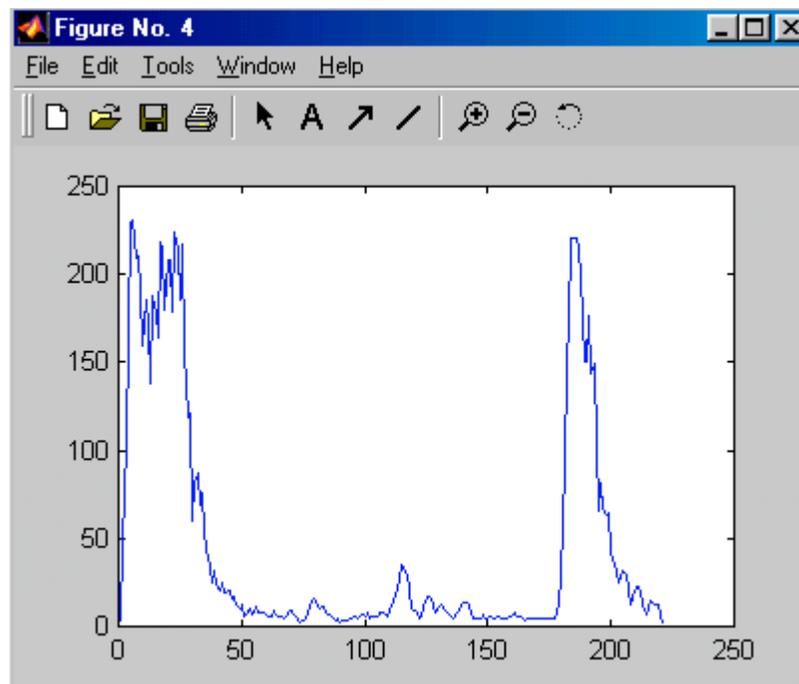


Figura III.16. Sinal A-scan alisado.

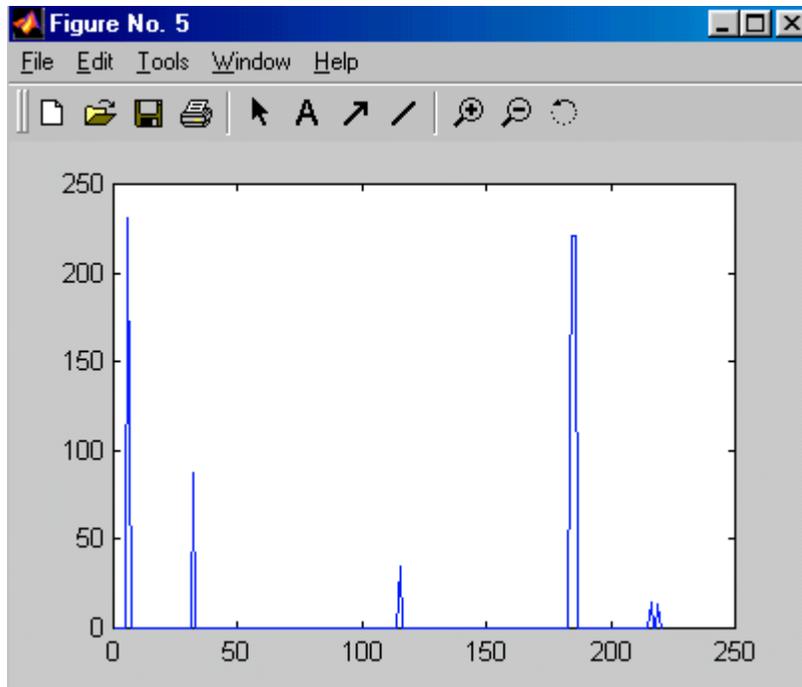


Figura III.17. Picos dos sinais A-scan's.

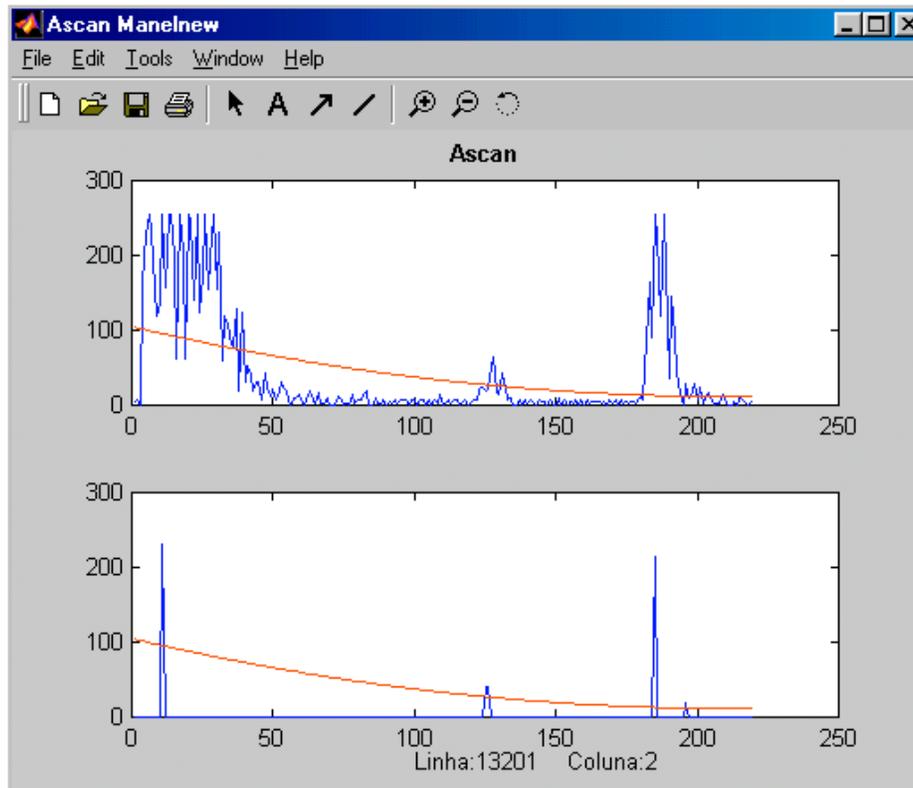


Figura III.18. Imagem A-scan de um defeito da figura III.13.

III.6. DETERMINAÇÃO DA MALHA DE VARREDURA

Com o objetivo de determinar a distância entre transdutores, para um determinado diâmetro de defeito, foi realizado um estudo estatístico de probabilidade de detecção, utilizando para tal finalidade simulação Monte Carlo.

III.6.1. ESTUDO TEÓRICO DA MALHA DE VARREDURA

Baseado em simulação Monte Carlo, desenvolveu-se um estudo teórico com o objetivo de otimizar o processo de inspeção. Neste estudo pode-se selecionar a área total de varredura e definir uma malha de inspeção de acordo com o tamanho de defeito que se deseja detectar associada a uma probabilidade de detecção desejada.

A figura III.19 é um croqui de uma área inspecionada, onde L é a dimensão característica da área total a ser inspecionada, Δx e Δy definem o tamanho dos elementos da malha e por imposição coincidem com a distância entre transdutores e a distância entre aquisições respectivamente. Neste trabalho considerou-se Δx e Δy como sendo iguais.

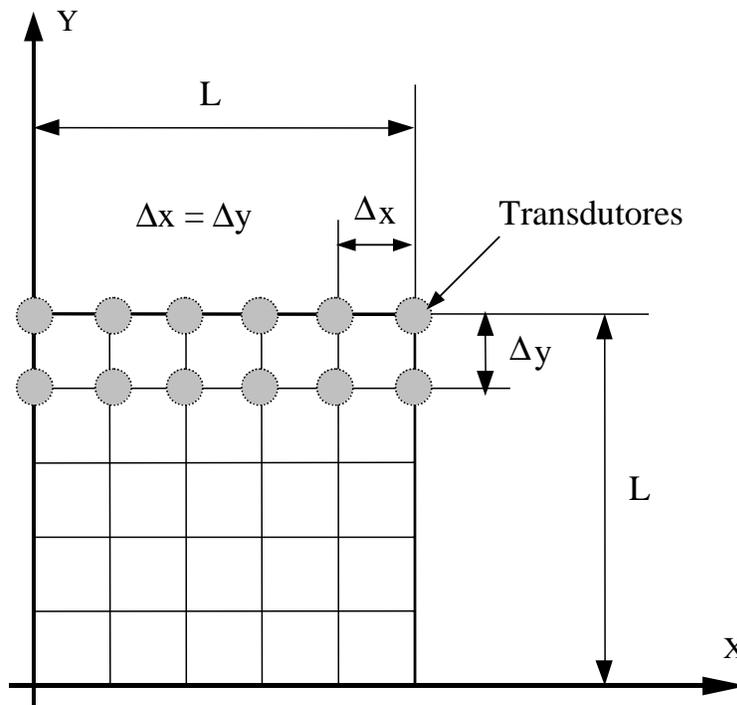


Figura III.19. Croqui da malha de varredura; Onde 'L' é o comprimento inspecionado, 'Δx' a separação entre transdutores e 'Δy' a distância entre aquisições.

A figura III.20 é um aumento da malha de varredura, onde mostra apenas um quadrante e a interferência entre o feixe ultra-sônico e o defeito. Como descrito na modelagem de Monte Carlo, o centro do diâmetro do defeito é gerado aleatoriamente em posições diversas dentro do quadrante da figura III.20 e para haver detecção, pelo menos um dos feixes deve detectar o defeito. A probabilidade de detectar o defeito pode ser calculada através do procedimento descrito a seguir.

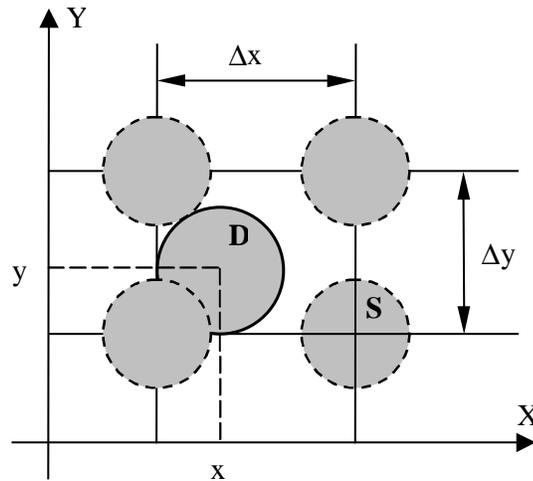


Figura III.20. Posição do defeito na malha de varredura. Onde 'D' é o defeito e 'S' é o feixe ultra-sônico.

Define-se um função indicadora:

$$I(x, y) = \begin{cases} = 0, & \text{se nenhum feixe consegue detectar o defeito} \\ = 1, & \text{se pelo menos um feixe consegue detectar o defeito} \end{cases}$$

A posição central $p(x, y)$ do defeito pode estar em qualquer posição ($0 \leq x \leq L$, $0 \leq y \leq L$), e é representada por uma distribuição uniforme bidimensional:

$$f_P(x, y) = \frac{1}{L} \cdot \frac{1}{L} = \frac{1}{L^2} \quad (\text{III.1})$$

O valor médio da função indicadora é igual a probabilidade de se detectar um defeito:

$$\bar{P} = \int_0^L \int_0^L I(x, y) \cdot f_P(x, y) dx dy = \sum_{i=1}^{N_{sim}} \frac{I_i(x_i, y_i)}{N_{sim}} = \frac{n_d}{N_{sim}} \quad (III.2)$$

Onde ‘ n_d ’ é o número de vezes em que $I_i(x_i, y_i) = 1$; ‘ N_{sim} ’ é o número de simulações; ‘ (x_i, y_i) ’ é um par de pontos definidos por duas distribuições uniformes estatisticamente independentes.

Cálculo de $I(x_i, y_i)$

Para que o defeito seja detectado, pelo menos um dos feixes do ultra-som da figura III.20 deve detectar o defeito. Para simplificação do problema, considerou-se:

- Defeito tangente ao feixe ultra-sônico não é detectado; para haver detecção deve existir o mínimo de interferência entre o defeito e o feixe (figura III.21);
- O feixe ultra-sônico possui uma abertura uniforme e constante em toda sua extensão;
- As condições do ensaio são ideais, não foi levado em consideração problemas relacionados ao equipamento, ambiente dentre outros;
- O defeito é circular.

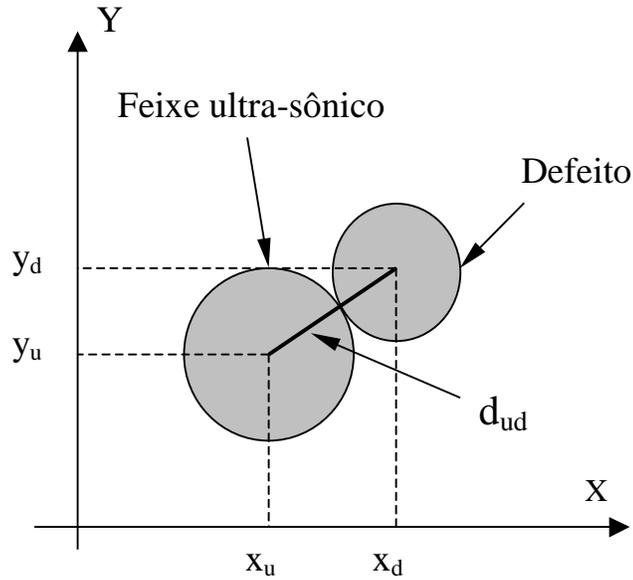


Figura III.21. Interferência do defeito com o feixe ultra-sônico.

Desta forma:

$$d_{ud} = \sqrt{(x_d - x_u)^2 + (y_d - y_u)^2} \quad (\text{III.3})$$

$$I(x_i, y_i) = \begin{cases} = 1; & \text{se } d_{ud} < (\varnothing_d + \varnothing_u) / 2 \\ = 0; & \text{se } d_{ud} \geq (\varnothing_d + \varnothing_u) / 2 \end{cases}$$

onde 'd_{ud}' é a distância do centro do defeito ao centro do feixe ultra-sônico; 'ϕ_d' é o diâmetro do defeito; ϕ_u, é o diâmetro do feixe ultra-sônico.

Utilizando este procedimento pode-se determinar uma malha de varredura de interesse de acordo com o tamanho de defeito que se deseja detectar associada a uma probabilidade de detecção desejada.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

IV.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos e as respectivas discussões, os quais foram divididos em três etapas. Na etapa 1 (seção IV.2) realizou-se a inspeção do corpo de prova 1 utilizando o programa Neoend, com o objetivo de avaliar a detecção dos defeitos de diferentes diâmetros para várias distâncias entre aquisições. Na etapa 2 (seção IV.3) realizou-se a inspeção do corpo de prova 1 utilizando o sistema multicanal, com o objetivo de avaliar este sistema e desenvolver uma metodologia de análise dos resultados das inspeções. Um estudo de probabilidade de detecção foi realizado, utilizando para esta finalidade, a técnica de simulação Monte Carlo. Na etapa 3 (seção IV.4) efetuou-se a inspeção do corpo de prova 2 utilizando o sistema multicanal, com a finalidade de avaliar a capacidade de detecção do sistema para um caso real, comparando-o com os resultados obtidos por De Padua [36], que realizou um mapeamento das diversas áreas defeituosas deste corpo de prova, utilizando um sofisticado sistema de inspeção provido de lentes acústicas. Realizou-se inspeções utilizando várias distâncias entre transdutores e entre aquisições com o objetivo de avaliar a influência destes parâmetros na detecção de defeitos reais.

IV.2. INSPEÇÃO DO CORPO DE PROVA 1 UTILIZANDO O PROGRAMA NEOEND (ETAPA 1)

Com o objetivo de avaliar a detecção dos defeitos de diferentes diâmetros para diferentes distâncias entre aquisições, realizou-se ensaios com distâncias variadas entre aquisições. Inicialmente realizou-se uma varredura fina, portanto de maior resolução, com distância entre aquisições nos eixos X e Y de aproximadamente 0,8mm, com a finalidade de se obter uma análise completa da área inspecionada (figura IV.2). Aumentou-se gradualmente a distância até um valor máximo de 25,6mm (figura IV.2 a figura IV.9). A distância entre aquisições nos eixos X e Y (ΔX e ΔY respectivamente) foram iguais para cada ensaio. Os ensaios foram realizados utilizando apenas um transdutor, com especificação Krautkrämer H2K e a representação do deslocamento do mesmo pode ser observado na figura IV.1.

Devido as limitações do sistema de varredura as inspeções foram realizadas no corpo de prova 1 sobre os furos de 10mm à 30mm e a posição inicial de inspeção foi escolhida aleatoriamente. Para cada ensaio uma curva de referência foi traçada, levando-se em consideração a amplitude dos ecos dos defeitos e as imagens C-scans resultantes são mostradas a seguir.

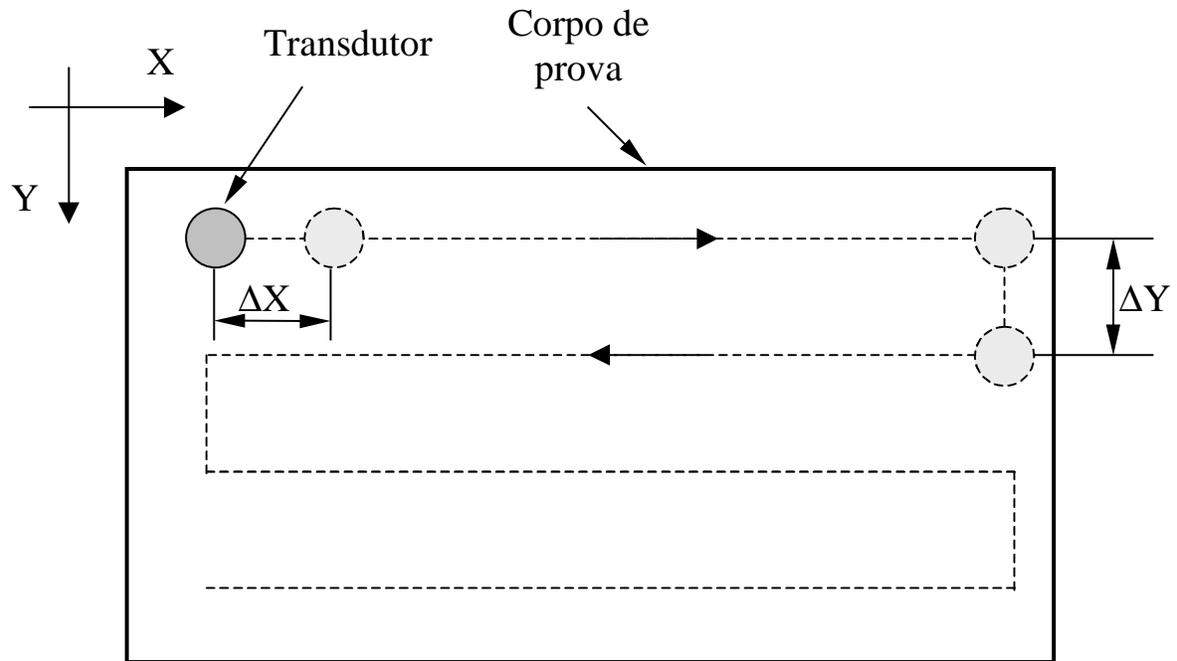


Figura IV.1. Representação esquemática do deslocamento do transdutor sobre o corpo de prova, onde, ΔX e ΔY representam as distâncias entre aquisições nos eixos X e Y respectivamente.

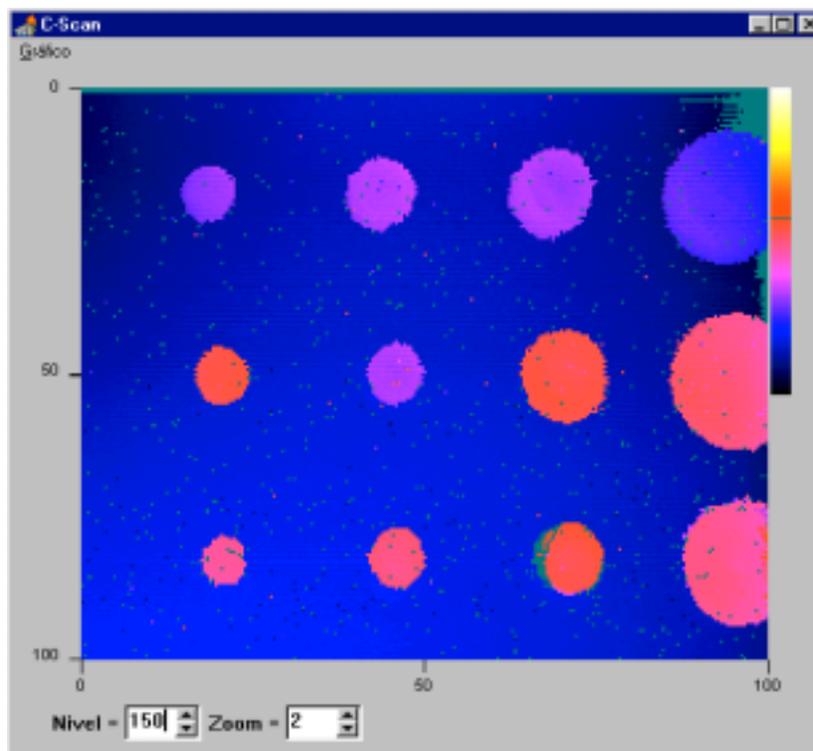


Figura IV.2. Inspeção com distância entre aquisições de 0,8mm.

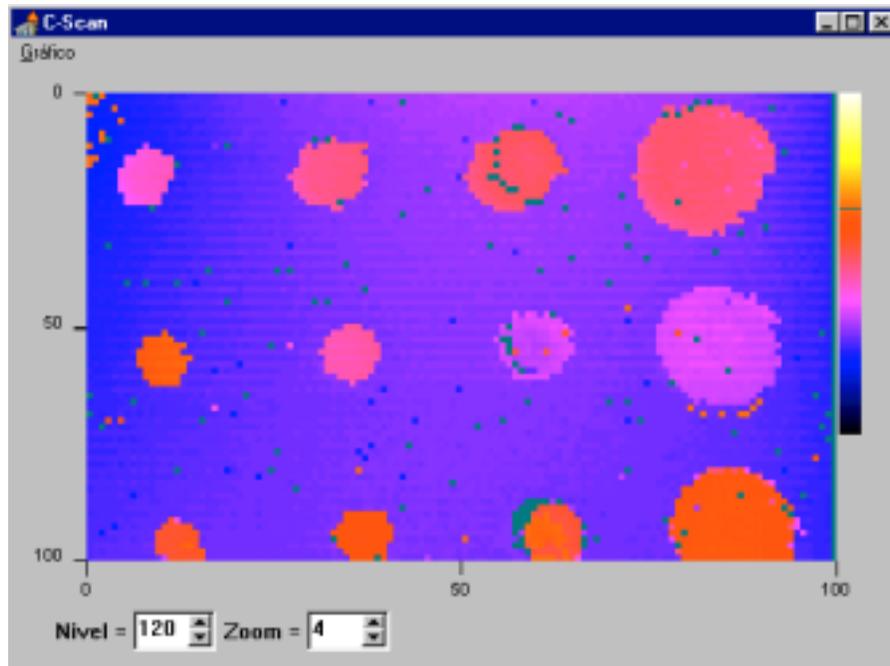


Figura IV.3. Inspeção com distância entre aquisições de 1,6mm.

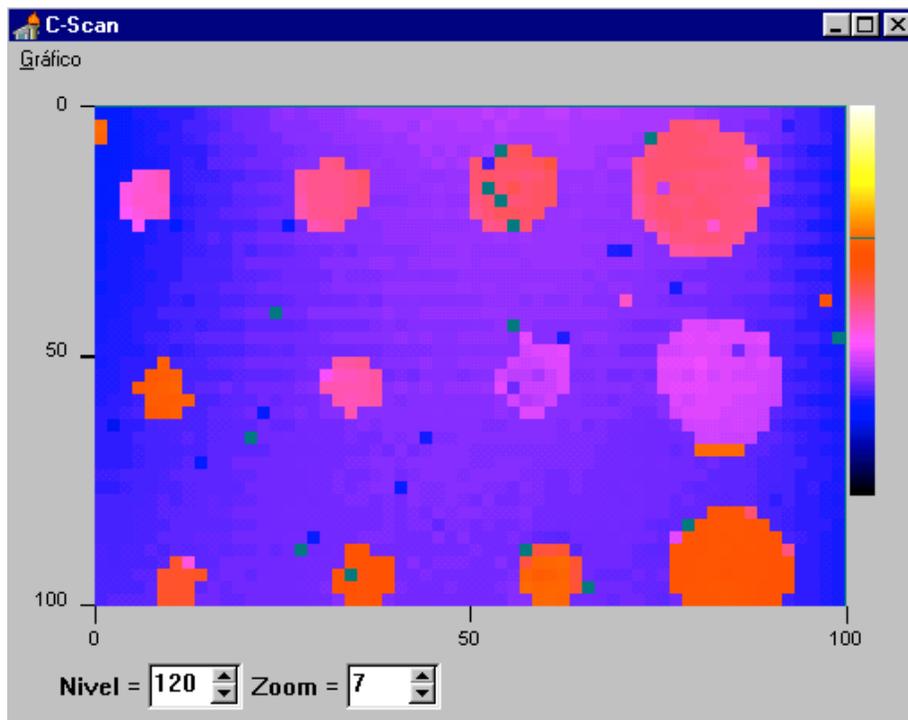


Figura IV.4. Inspeção com distância entre aquisições de 3,2mm.

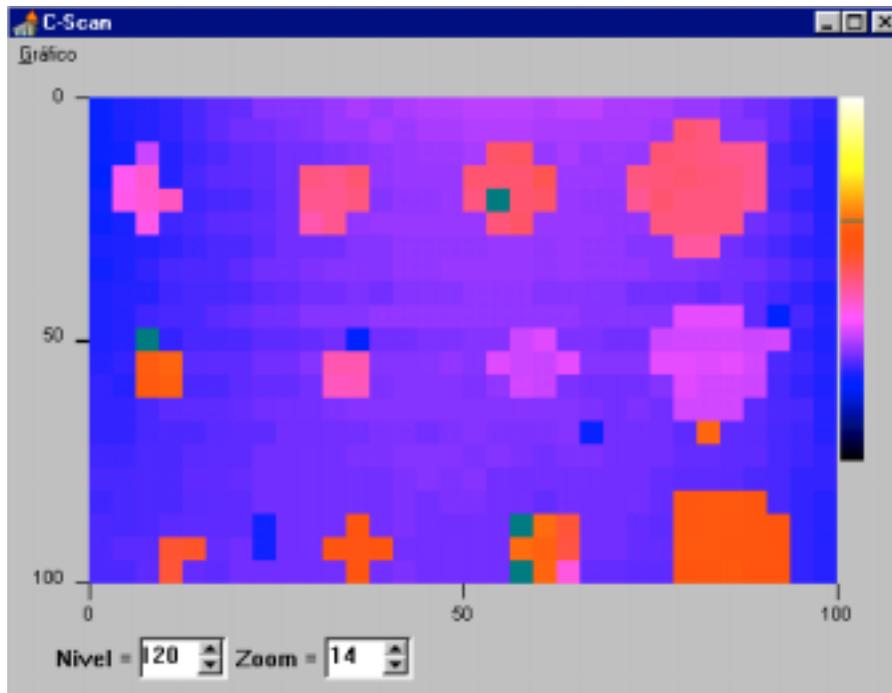


Figura IV.5. Inspeção com distância entre aquisições de 6,4mm.

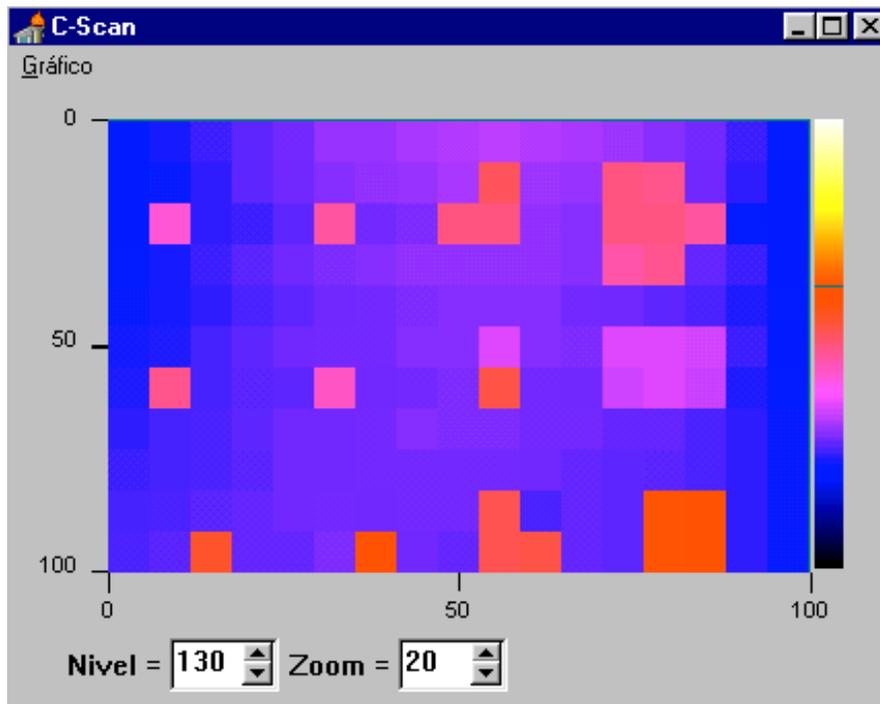


Figura IV.6. Inspeção com distância entre aquisições de 12,8mm.

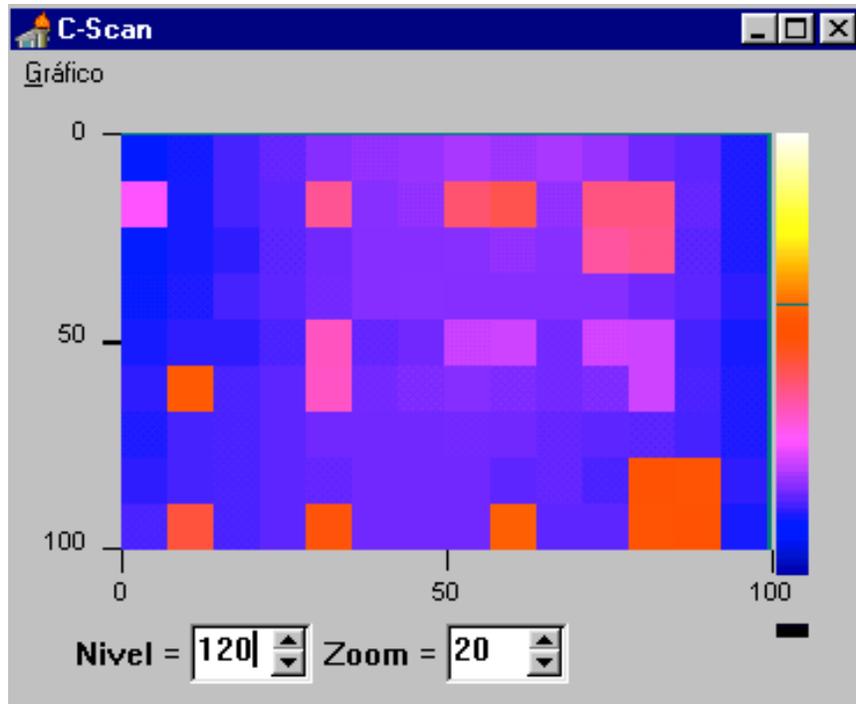


Figura IV.7. Inspeção com distância entre aquisições de 15mm.

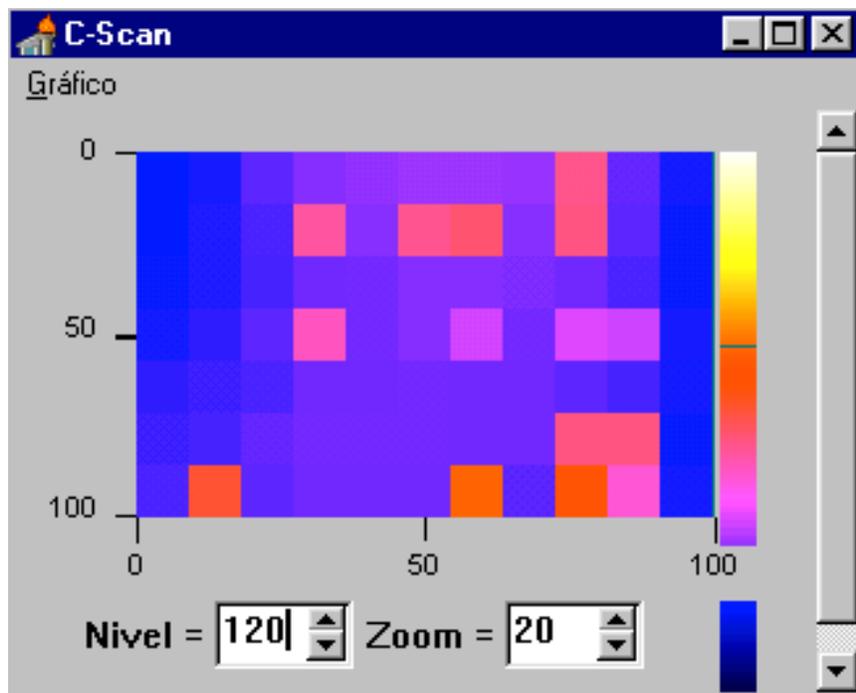


Figura IV.8. Inspeção com distância entre aquisições de 20mm.

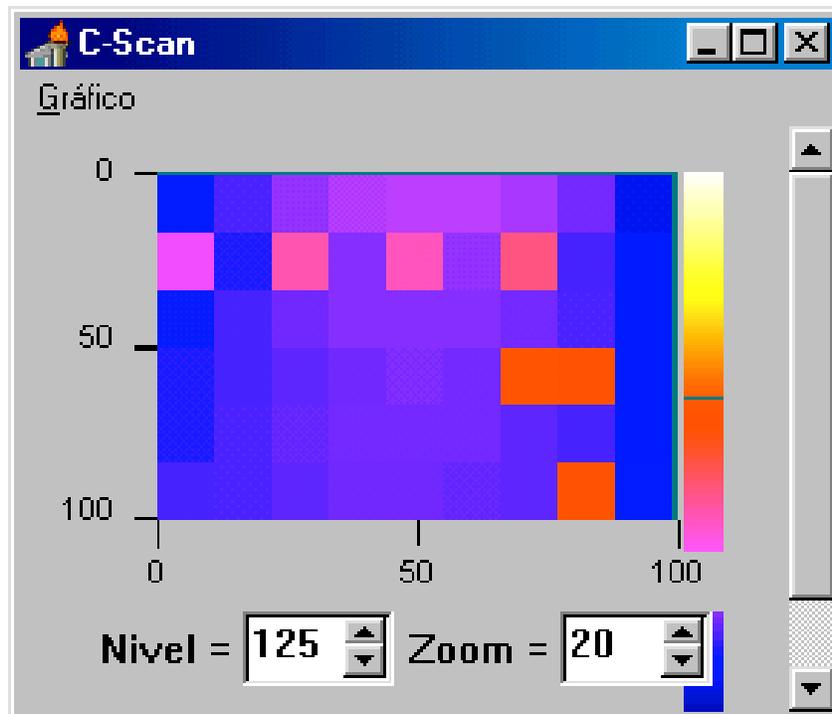


Figura IV.9. Inspeção com distância entre aquisições de 25,6mm.

De acordo com o procedimento adotado aumentou-se gradualmente a distância nos eixos X e Y para avaliar a interação dos diferentes defeitos para várias distâncias entre aquisições, cujos resultados estão mostrados nas figuras de IV.2 a IV.9. Contudo, o grau de detectabilidade dos defeitos está também, relacionado a outros fatores, tais como, posição ente o transdutor e o corpo de prova no início da inspeção e posição relativa entre o transdutor e o corpo de prova durante todo o ensaio.

Para este trabalho a posição inicial da inspeção foi aleatoriamente selecionada e cada ensaio foi repetido 5 vezes, os resultados apresentados (figura IV.2 a figura IV.9) representam a configuração que mais se repetiu, em média 4 dos 5 ensaios realizados. Pode ser observado que a medida que a distância entre aquisições aumenta a resolução da forma dos defeitos diminui, no entanto, para propósito deste trabalho, a forma do defeito não é um fator relevante, pois o objetivo é apenas detectar o defeito e medir a perda de espessura naquela região através do sinal A-scan. Percebeu-se também que a profundidade dos defeitos não tiveram influência na detectabilidade do mesmos.

Pode-se observar pelas figuras de IV.2 a IV.9 que, para uma distância entre aquisições de até 15mm (figura IV.7), todos os defeitos foram detectados, sendo este um

bom resultado, visto que, inclusive defeitos de apenas 10mm de diâmetro foram detectados. No entanto, para valores superiores a 15mm entre aquisições alguns defeitos não foram detectados. Para um valor limite de 25,6mm entre aquisições (figura IV.9), apenas 6 defeitos entre os 12 foram detectados, entre eles os defeitos de 30mm de diâmetro. Outro fato interessante que se pode observar na figura IV.9, é que em uma linha ao longo do eixo X, todos defeitos foram detectados, até mesmo os furos de 10mm de diâmetro. A tabela IV.I e a figura IV.10 mostram o número de defeitos detectados para cada distância entre aquisição.

Com base nestes resultados, observou-se que, em geral, para distância entre aquisições inferior ao diâmetro dos defeitos, todos os defeitos são detectados, considerando condições ideais de operação (bom acoplamento entre o transdutor e o corpo de prova, transdutor paralelo ao corpo de prova, entre outros). Por outro lado, para distância entre aquisições superiores ao diâmetro dos defeitos a detecção torna-se um fenômeno aleatório, visto que a detectabilidade está relacionada a variáveis como posição inicial da inspeção e posição relativa entre o transdutor e o corpo de prova, portanto, dependendo do comportamento destas variáveis, os resultados das inspeções podem ser completamente diferentes, logo esses resultados podem ser tratados estatisticamente. Um estudo de probabilidade de detecção será abordado posteriormente (seção IV.3).

Tabela IV.1. Número de defeitos detectados para cada distância entre aquisição.

Distância entre aquisições (mm)	Diâmetro dos defeitos (mm)			
	10	15	20	30
0,8	3	3	3	3
1,6	3	3	3	3
3,2	3	3	3	3
6,4	3	3	3	3
12,8	3	3	3	3
15	3	3	3	3
20	1	2	3	3
25,6	1	1	1	3

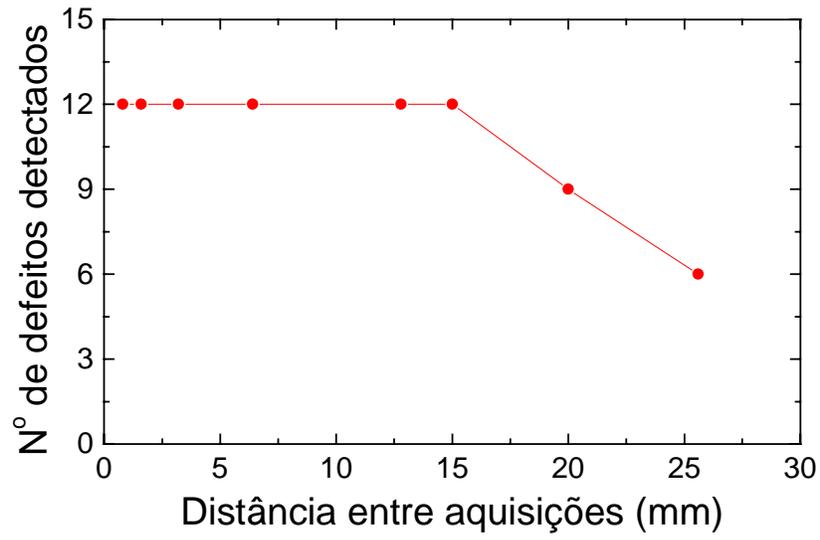


Figura IV.10. Número de defeitos detectados versus distância entre aquisições.

IV.3. INPEÇÃO DO CORPO DE PROVA 1 UTILIZANDO MULTICANAL (ETAPA 2)

Com o objetivo de avaliar o sistema multicanal e desenvolver uma metodologia para analisar os resultados das inspeções, realizou-se ensaios com o corpo de prova 1 (figura IV.12 a figura IV.16) utilizando este sistema. Realizou-se vários ensaios com distância entre transdutores fixa de 50mm e distâncias entre aquisições variadas (10mm, 20mm, 30mm, 40mm e 50mm) com a finalidade de avaliar a influência desta variável na detecção. As varreduras foram realizadas na direção do maior comprimento (300mm), com os transdutores alinhados com os furos, portanto, desta maneira cada transdutor inspecionava uma coluna de furos (figura IV.11).

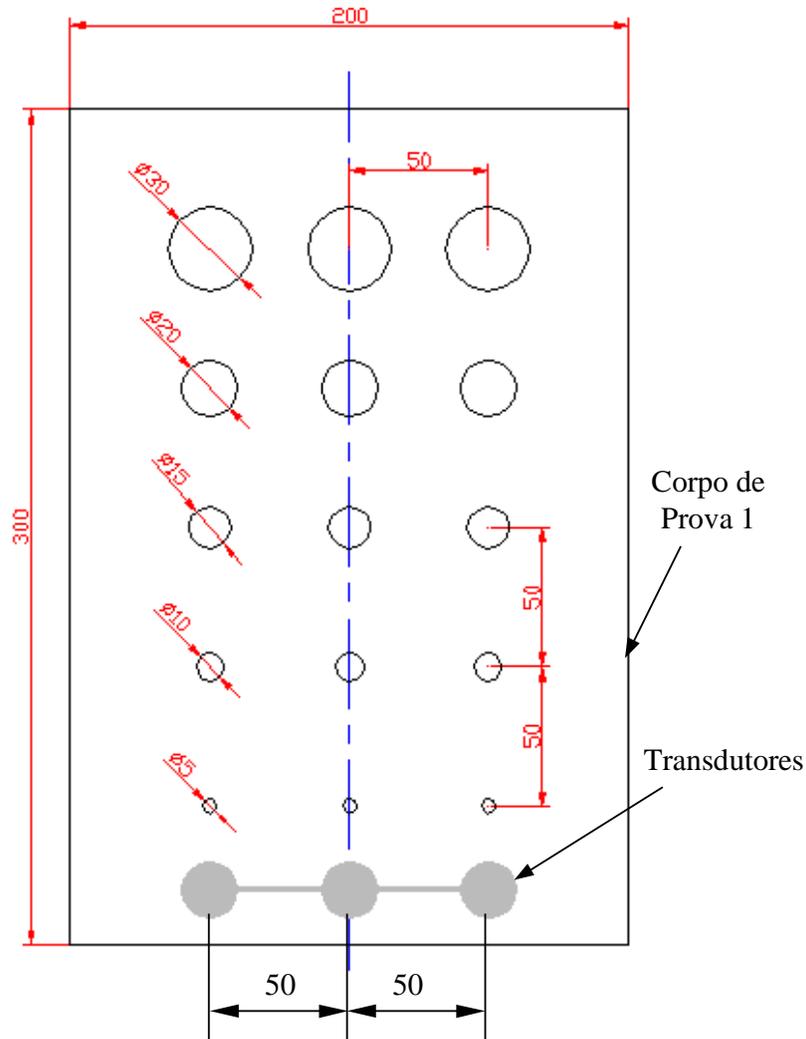


Figura IV.11. Croqui do esquema de varredura. Dimensões em milímetros.

O sistema desenvolvido neste trabalho, permite a partir do sinal A-scan, gerado pelo equipamento multicanal, construir uma imagem C-scan da área inspecionada, o que torna possível uma visualização em escala de cores dos defeitos (figura IV.12 a figura IV.16). O sistema foi gerado em software Matlab onde procedeu-se várias rotinas como descrito a seguir:

- Refinamento – Reduz para 220 pontos cada sinal A-scan, gerado pelo sistema multicanal;
- Alisa – Realiza um alisamento do sinal A-scan, preenchendo com zeros as demais posições, mantendo os 220 pontos;
- Curva – É traçado uma curva de referência para definir quais os pontos de interesse na imagem (acima da curva) e descartar os pontos sem relevância (abaixo da curva). Levando-se em consideração a amplitude dos ecos dos defeitos;
- Detecta picos – Seleciona apenas o maior valor de cada conjunto de pontos, preenchendo com zeros as demais posições;
- Nível – Define a profundidade que a imagem é mostrada na peça. É mostrado apenas um ponto de cada sinal A-scan e todos na mesma profundidade;
- Plotar – Plota a imagem C-scan da área inspecionada;
- A-scan – Selecionando o botão A-scan do programa e em seguida um ponto da imagem C-scan, pode-se obter a imagem A-scan referente a este ponto. Através da imagem A-scan pode-se dimensionar a espessura naquela região. Esta janela também fornece a posição (linha e coluna) referente aquele A-scan.

Efetou-se varreduras com várias distâncias entre aquisições para avaliar a interação dos diferentes defeitos para várias distâncias entre aquisições. Os resultados apresentados (figura IV.12 a figura IV.16) não representam o tamanho geométrico do defeito, sendo apenas uma indicação do mesmo, visto que, a imagem C-scan mostrada neste trabalho nada mais é que uma matriz de pontos do sinal analógico que foi digitalizado e processado no Matlab. Por exemplo, cada coluna (canal) da figura IV.12, possui 28 aquisições, enquanto cada coluna da figura IV.14, possui somente 8 aquisições, sendo praticamente o mesmo comprimento inspecionada nos dois casos. No entanto, a perda de espessura em cada defeito pode ser obtida através do sinal A-scan correspondente.

Cada ensaio foi repetido 5 vezes e os resultados apresentados aqui correspondem a configuração que mais se repetiu, em média 4 dos 5 ensaios realizados. Os mesmos canais apresentados na figura IV.12 e a mesma dimensão são válidos para as figuras de IV.12 a IV.16.

A posição inicial para cada ensaio foi escolhido aleatoriamente, no entanto, buscou-se sempre que a inspeção percorresse todo o corpo de prova.

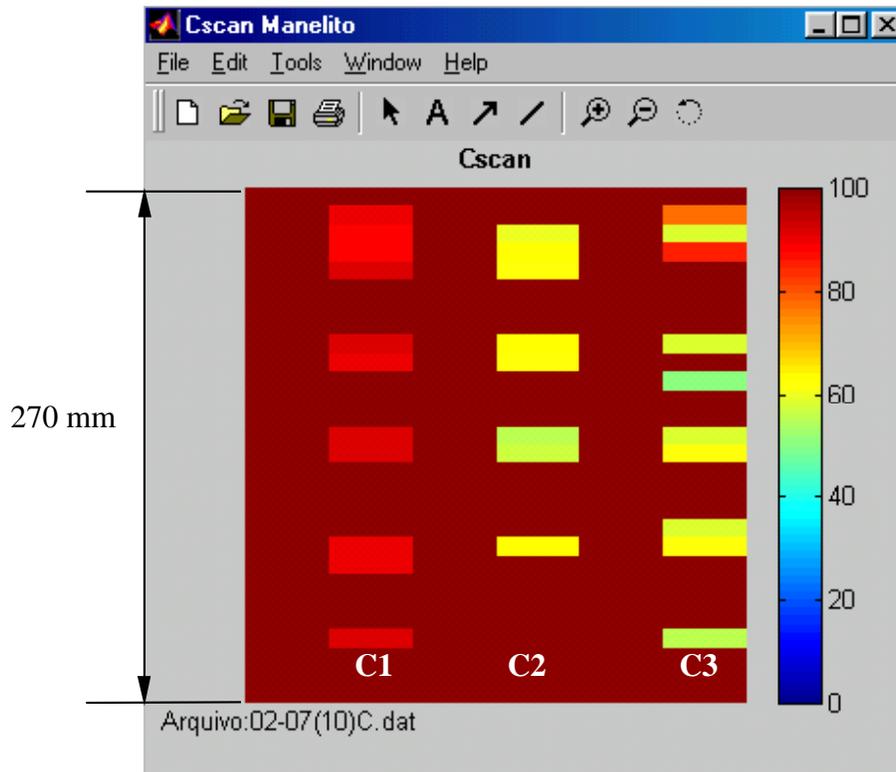


Figura IV.12. Inspeção com distância entre aquisições de 10mm. C1, C2 e C3, correspondem aos canais 1, 2 e 3 respectivamente.

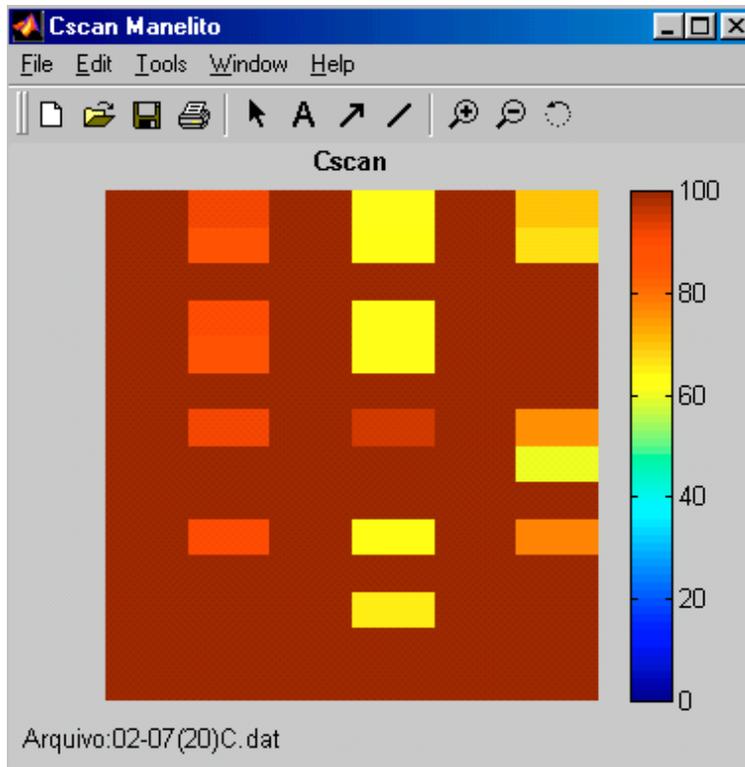


Figura IV.13. Inspeção com distância entre aquisições de 20mm.

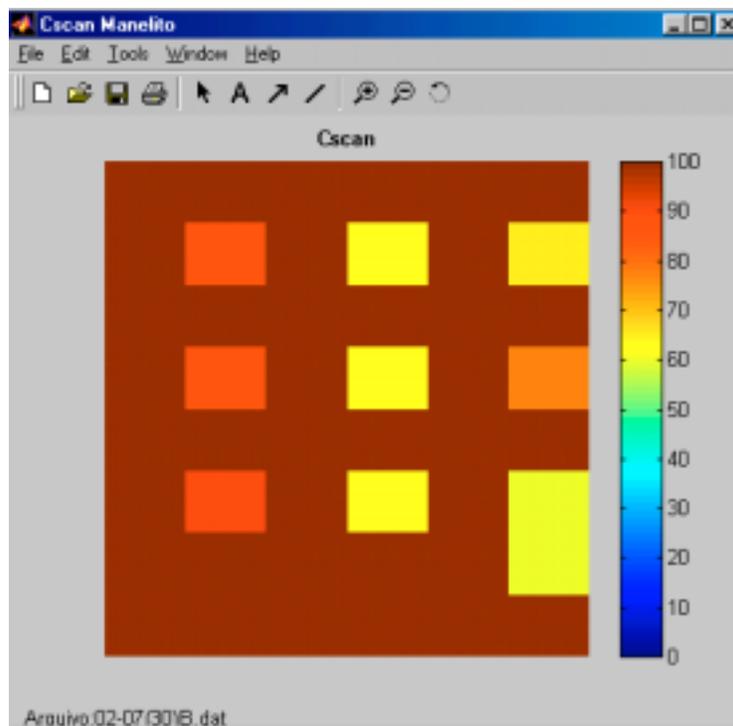


Figura IV.14. Inspeção com distância entre aquisições de 30mm.

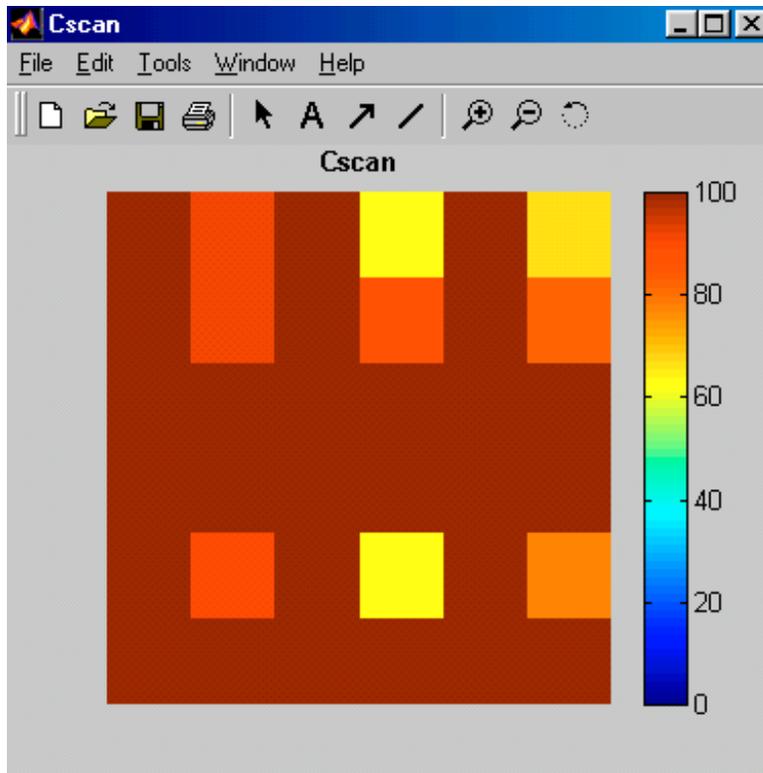


Figura IV.15. Inspeção com distância entre aquisições de 40mm.

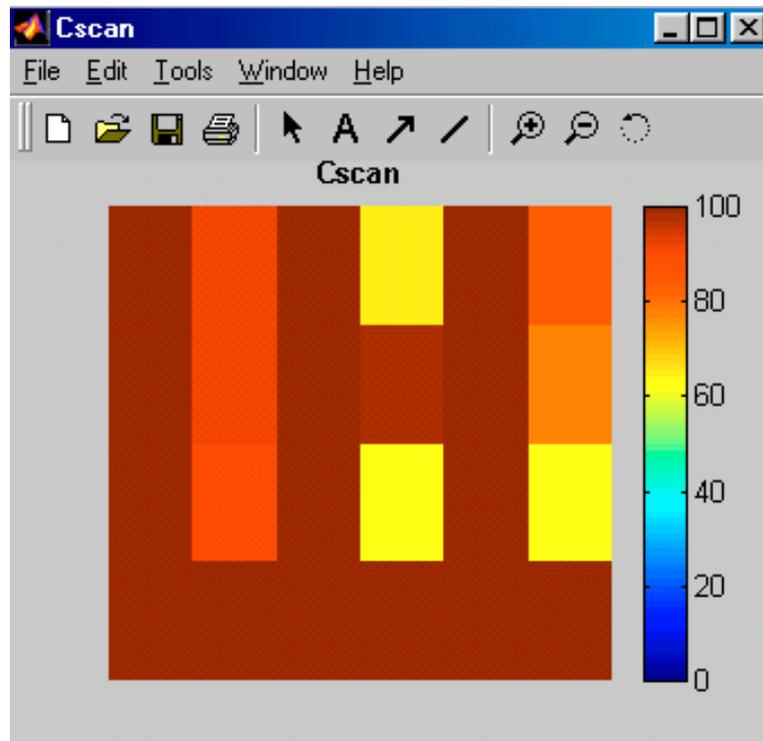


Figura IV.16. Inspeção com distância entre aquisições de 50mm.

Pode-se observar que os ensaios realizados neste corpo de prova serviram para comprovar a eficiência do sistema de inspeção. No entanto, da mesma forma que os ensaios realizados com o programa Neoend, a probabilidade de detecção está relacionada às variáveis do processo de inspeção, entre eles, diâmetro do defeito, distância entre transdutores, distância entre aquisições, posição entre o transdutor e corpo de prova no início da inspeção, entre outros.

Como esperado, pode-se verificar que, a medida que a distância entre aquisições aumenta, o número de defeitos detectados diminui. Na figura IV.12, mesmo utilizando uma distância entre aquisição de 10mm, dois defeitos de 5mm de diâmetro foram detectados. Já na figura IV.13, com 20mm de distância entre aquisições, um defeito de 5mm foi detectado, enquanto que um defeito de 20mm de diâmetro não foi detectado, isto pode ter ocorrido provavelmente porque não houve uma interferência mínima entre o feixe ultra-sônico e o defeito. Outro fato interessante que pode ser observado, é que para distância entre aquisições de 50mm (figura IV.16) as aquisições coincidiram exatamente com os defeitos, deixando entender que toda a região é uma área defeituosa, enquanto que na verdade são defeitos isolados.

Conforme discutido na etapa 1 e como pode-se observar pelos resultados apresentados nesta etapa, para distância entre aquisições superior ao diâmetro do defeito, a detecção é um fenômeno aleatório. Um estudo teórico de probabilidade de detecção de defeitos foi realizado, utilizando para esta finalidade a técnica de simulação Monte Carlo. Neste estudo, define-se algumas variáveis, tais como: diâmetro do defeito, distância entre transdutores e entre aquisições, dimensão a ser inspecionada e diâmetro do feixe ultra-sônico, então através de simulação Monte Carlo, obtêm-se a probabilidade de detecção do defeito, baseado no estudo realizado na seção III.6 deste trabalho e considerando:

- Defeito tangente ao feixe ultra-sônico não é detectado, para haver detecção deve existir o mínimo de interferência entre o defeito e o feixe;
- O feixe ultra-sônico possui uma abertura uniforme e constante em toda sua extensão;
- As condições do ensaio são ideais, não sendo levado em consideração problemas relacionados ao equipamento, ambiente dentre outros;
- O defeito é circular.

Como exemplo, definiu-se uma área total de inspeção e para vários diâmetros diferentes de defeitos, simulou-se a probabilidade do mesmo ser detectado com várias malhas de varredura (distância entre transdutores e entre aquisições). A figura IV.17 exemplifica este exemplo. Pode-se observar que para um defeito de 10mm de diâmetro, para se obter uma probabilidade de detecção de 80% deve-se usar uma malha de varredura de aproximadamente 20mm, enquanto que para um defeito de 40mm de diâmetro para essa mesma probabilidade de detecção, deve-se usar uma malha de aproximadamente 50mm. Avaliando-se, portanto esta variável isoladamente, tem-se como resultado uma redução considerável no tempo de inspeção, o que está diretamente relacionado ao custo desta operação.

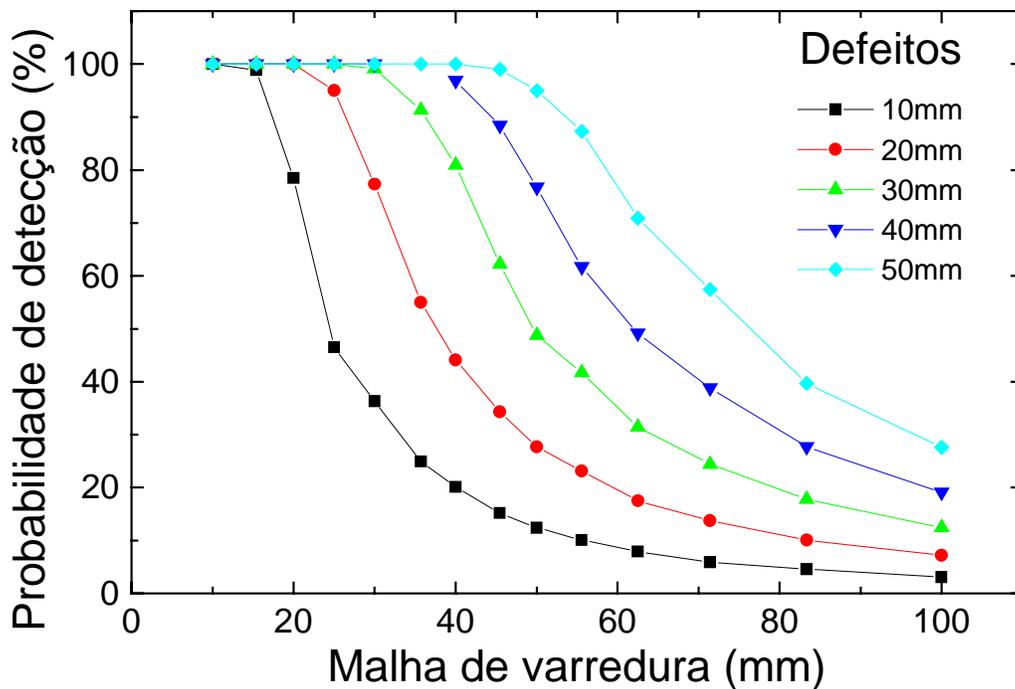


Figura IV.17. Probabilidade de detecção de defeitos.

IV.4. INSPEÇÃO DO CORPO DE PROVA 2 UTILIZANDO O SISTEMA MULTICANAL (ETAPA 3)

Com o objetivo de avaliar a capacidade de detecção do sistema multicanal para um caso real, efetuou-se a inspeção do corpo de prova 2 (figuras IV.20 a IV.34) utilizando este sistema. Isto porque, defeitos reais, provocados por corrosão devido ao ataque por hidrogênio (figura A.1 a figura A.18 do anexo A) possuem características geométricas bem diferentes do que defeitos induzidos por usinagem em um corpo de prova confeccionado em laboratório.

Os resultados das inspeções foram comparados com os resultados obtidos por De Padua [36], o qual mapeou os vários defeitos contidos neste corpo de prova (figura A.1 a figura A.18 do anexo A) [36], utilizando um sofisticado sistema de inspeção provido de lentes acústicas, especialmente projetado para esta finalidade. Vale ressaltar, como já mencionado, que as dimensões dos defeitos apresentados neste trabalho, não representam as dimensões reais dos defeitos, sendo apenas uma indicação do mesmo. Não é objetivo deste trabalho reconstruir a forma geométrica dos defeitos, até mesmo porque, como dito anteriormente, este sistema não se adequa a esta finalidade.

Efetuuou-se vários ensaios variando-se as distâncias entre transdutores e entre aquisições (figura IV.20 a figura IV.34). As varreduras foram realizadas conforme croqui apresentado na figura IV.18. Em todas as inspeções a posição inicial foi escolhida aleatoriamente, no entanto, buscou-se sempre, colocar os transdutores centralizados no início do primeiro quadrante para começar a inspeção (figura IV.18).

Cada ensaio foi repetido 5 vezes e os resultados apresentados correspondem a configuração que mais se repetiu, em média 4 dos 5 ensaios realizados. Em todos os ensaios praticamente o mesmo comprimento foi inspecionado e cada coluna onde visualiza-se os defeitos corresponde a um transdutor ou a um canal, conforme figura IV.19. Na figura IV.19 a base da figura corresponde ao primeiro quadrante, enquanto que o topo corresponde ao último.

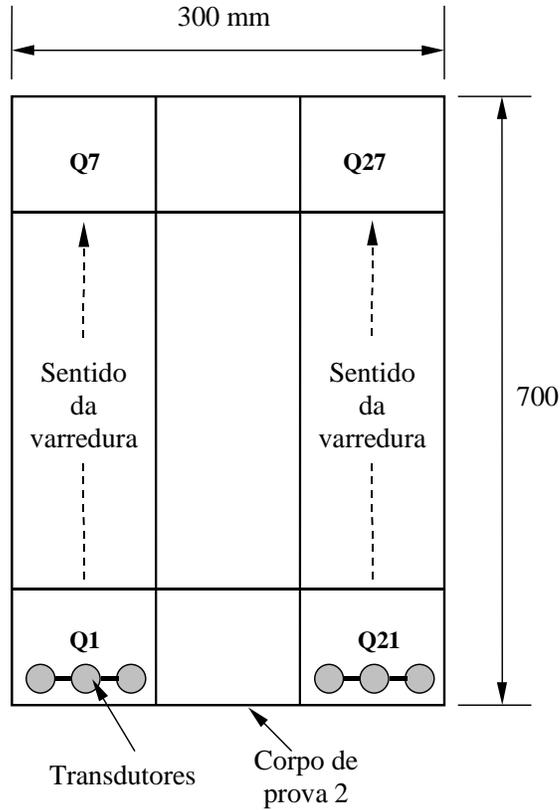


Figura IV.18. Croqui do esquema de varredura.

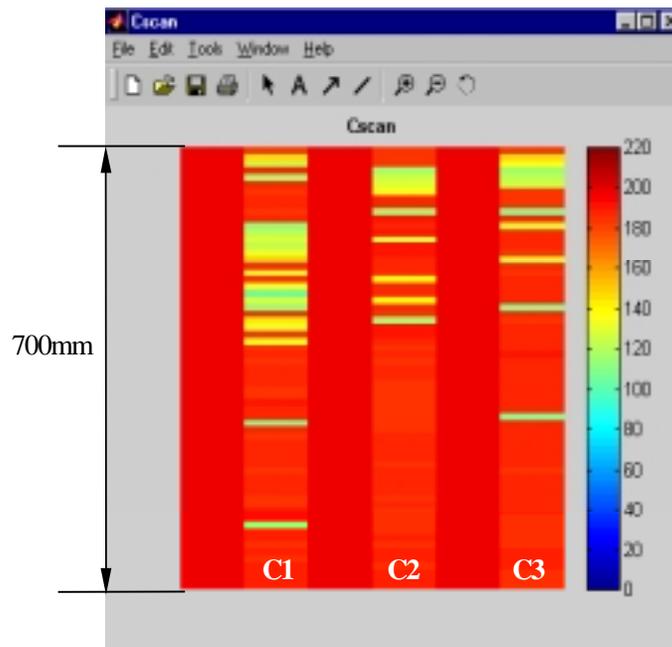


Figura IV.19. Imagem C-scan, mostrando a dimensão inspecionada e os canais C1, C2 e C3 correspondentes aos transdutores 1, 2 e 3 respectivamente.

Inspeção do quadrante Q1 ao quadrante Q7 com separação entre transdutores de 30mm (figura IV.20 a figura IV.24)

As imagens mostradas nas figuras de IV.20 a IV.24 são imagens C-scans obtidas a partir de uma varredura realizada sobre o quadrante Q1 ao quadrante Q7 utilizando o sistema multicanal de inspeção. Cada imagem corresponde a uma varredura completa do quadrante Q1 ao quadrante Q7, conforme croqui da figura IV.18, e o primeiro quadrante corresponde a base da figura.

Utilizou-se três transdutores alinhados e com separação entre eles de 30mm e distância entre aquisições de 10mm, 20mm, 30mm, 40mm e 50mm respectivamente, sendo que em cada varredura utilizou-se apenas um valor para a distância entre aquisições. O transdutor utilizado foi um do tipo por contato com especificação Krautkrämer MB4S.

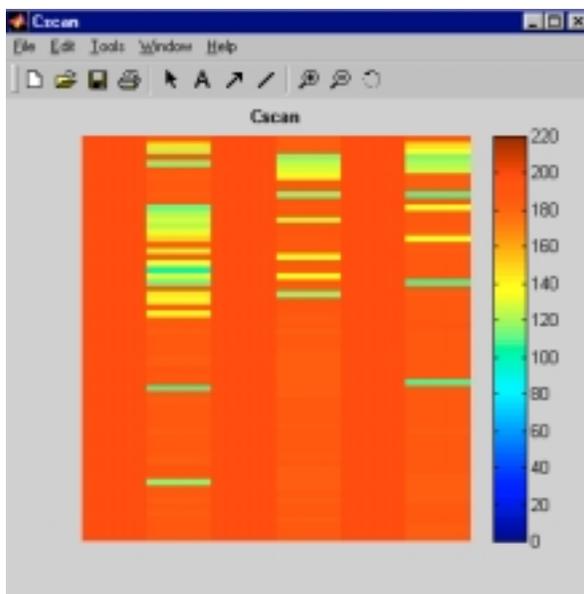


Figura IV.20. Imagem C-scan com distância entre aquisições de 10mm.

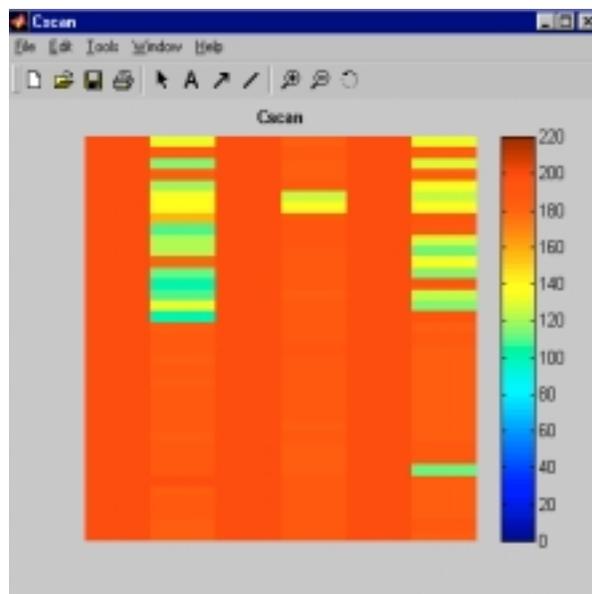


Figura IV.21. Imagem C-scan com distância entre aquisições de 20mm.

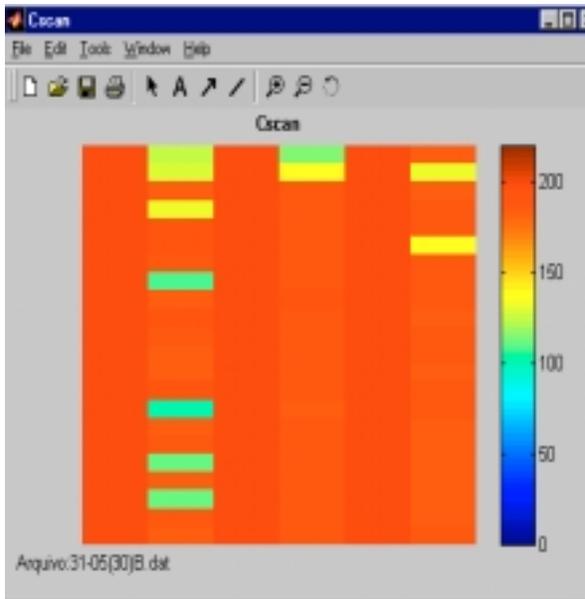


Figura IV.22. Imagem C-scan com distância entre aquisições de 30mm.

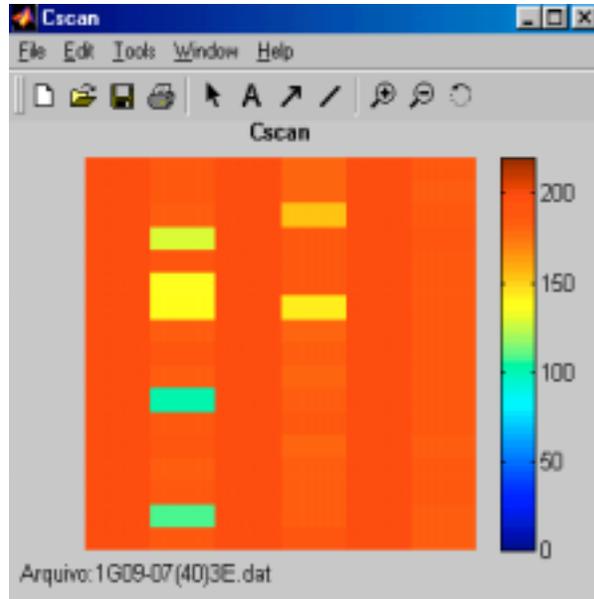


Figura IV.23. Imagem C-scan com distância entre aquisições de 40mm.

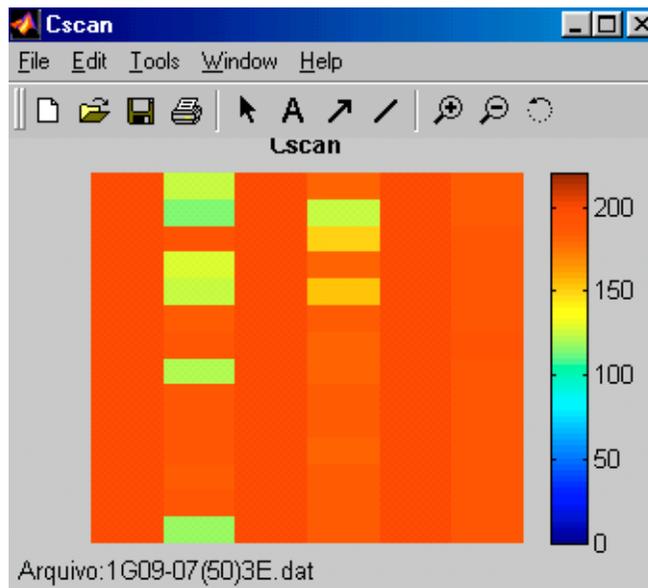


Figura IV.24. Imagem C-scan com distância entre aquisições de 50mm.

Pode-se observar pelas imagens C-scans mostradas anteriormente, principalmente para distâncias entre aquisições de 10mm e 20mm (figuras IV.20 e IV.21 respectivamente), que os defeitos mapeados por De Padua [36] nos quadrantes Q5 e Q6 (figura A.3 a figura A.8 do anexo A) foram detectados por este sistema e mesmo outros defeitos que não foram mapeados foram detectados. O defeito do quadrante Q1, em alguns casos não foi detectado, provavelmente, por este se localizar na extremidade do quadrante, enquanto os transdutores inspecionaram o centro do quadrante.

Uma das conclusões que se pode chegar em relação ao aumento da distância entre aquisições é que, na maioria das vezes, a medida que a distância entre aquisições aumenta, o número de defeitos detectados diminui. Em algumas inspeções, as aquisições coincidem exatamente com os defeitos, deixando entender que tudo é uma área defeituosa, como pode ser observado no canal 1 (C1) e canal 3 (C3) da figura IV.21 e principalmente no canal 1 (C1) da figura IV.24. Em outros casos, as aquisições coincidem exatamente entre os defeitos, mascarando também o resultado, como é o caso do canal 3 (C3), das figuras IV.23 e IV.24. No entanto, para menores distâncias entre aquisições tem-se uma maior precisão nos resultados, pois os defeitos são melhor separados. Principalmente porque os defeitos deste corpo de prova são bastante dispersos, na verdade são áreas com corrosão.

Em alguns casos, pode ter ocorrido que o eco refletido possuía uma amplitude tão baixa que não cortava a curva de referência traçada.

Inspeção do quadrante Q1 ao quadrante Q7 com separação entre transdutores de 40mm (figura IV.25 a figura IV.29)

Devido aos defeitos neste corpo de prova se localizarem em posições aleatórias nos quadrantes, o mesmo ensaio realizado para distância entre transdutores de 30mm foi realizado para distância entre transdutores de 40mm e 50mm.

As imagens mostradas nas figuras de IV.25 a IV.29 são imagem C-scans obtidas a partir de uma varredura realizada sobre o quadrante Q1 ao quadrante Q7 utilizando o sistema multicanal de inspeção. Foram utilizados três transdutores alinhados e com separação entre eles de 40mm e distância entre aquisições de 10mm, 20mm, 30mm, 40mm

e 50mm respectivamente, sendo que em cada varredura utilizou-se apenas um valor para a distância entre aquisições. O transdutor utilizado foi um transdutor por contato com especificação Krautkrämer MB4S.

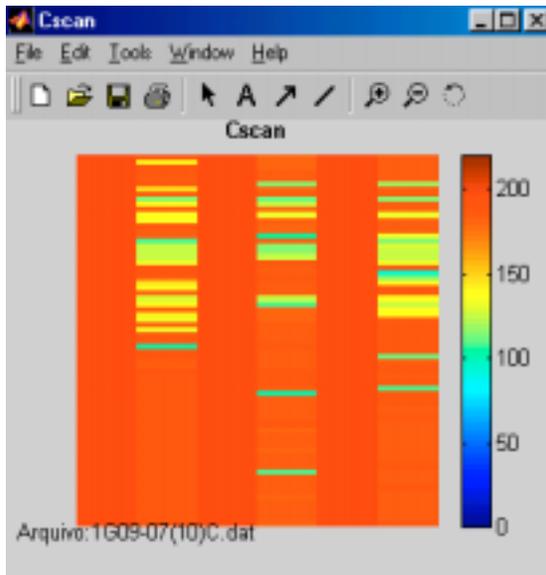


Figura IV.25. Imagem C-scan com distância entre aquisições de 10mm.

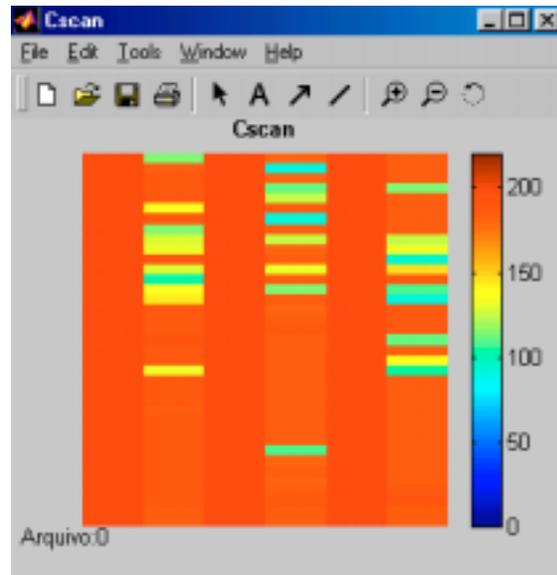


Figura IV.26. Imagem C-scan com distância entre aquisições de 20mm.

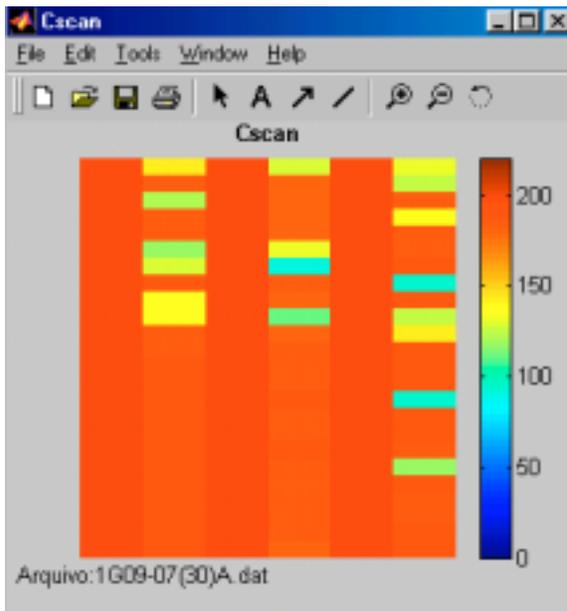


Figura IV.27. Imagem C-scan com distância entre aquisições de 30mm.

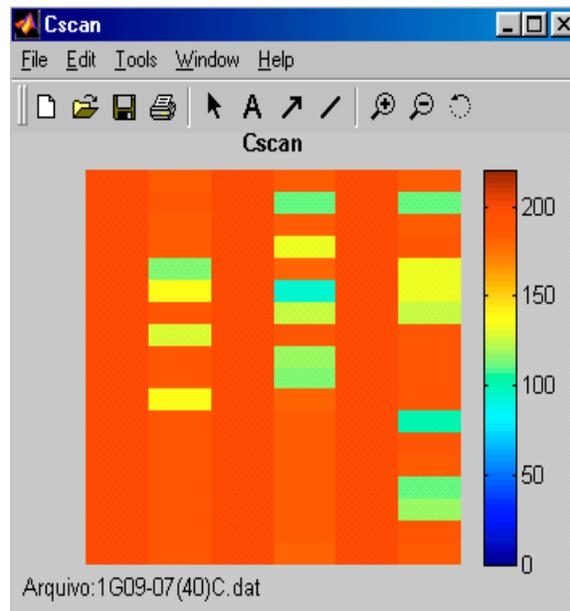


Figura IV.28. Imagem C-scan com distância entre aquisições de 40mm.

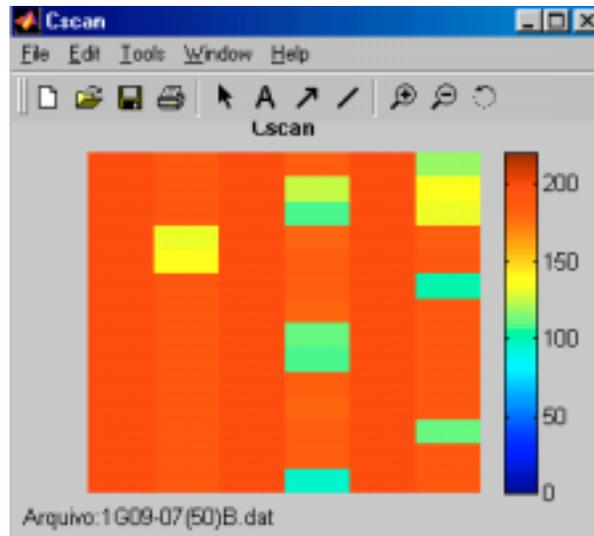


Figura IV.29. Imagem C-scan com distância entre aquisições de 50mm.

O que pode ser observado analisando as aquisições com distância entre transdutores de 40mm, em relação as aquisições com distância entre transdutores de 30mm, é que a quantidade de defeitos detectados aumentou. Isto se deve ao fato das áreas com maior quantidade de defeitos estarem próximas das bordas dos quadrantes, como pode ser observado pelas figuras de A.1 a A.8 do anexo A. No entanto, as mesmas observações que foram colocadas para distância entre transdutores de 30mm são válidas, ou seja, a medida que se aumenta a distância entre aquisições, a quantidade de defeitos detectados diminui, e para menores distâncias entre aquisições tem-se uma maior precisão na detecção, isto é, consegue-se separar melhor as áreas não defeituosas dos defeitos.

Em geral, assim como também para distâncias entre transdutores de 30mm, as áreas que continham defeitos e que foram mapeadas por De Padua [36] o sistema conseguiu detectar.

Inspeção do quadrante Q1 ao quadrante Q7 com separação entre transdutores de 50mm (figura IV.30 a figura IV.34)

Nestes ensaios aumentou-se a distância entre transdutores para 50mm, permitindo que dois dos transdutores inspecionasse a borda do quadrante, enquanto o terceiro transdutor passasse sobre o centro do quadrante.

As imagens mostradas nas figuras de IV.30 a figura IV.34 são imagens C-scans obtidas a partir de uma varredura realizada sobre o quadrante Q1 ao quadrante Q7 utilizando o sistema multicanal de inspeção. Foram utilizados três transdutores alinhados e com separação entre eles de 50mm e distância entre aquisições de 10mm, 20mm, 30mm, 40mm e 50mm respectivamente, sendo que em cada varredura utilizou-se apenas um valor para a distância entre aquisições. O transdutor utilizado foi um do tipo por contato com especificação Krautkrämer MB4S.

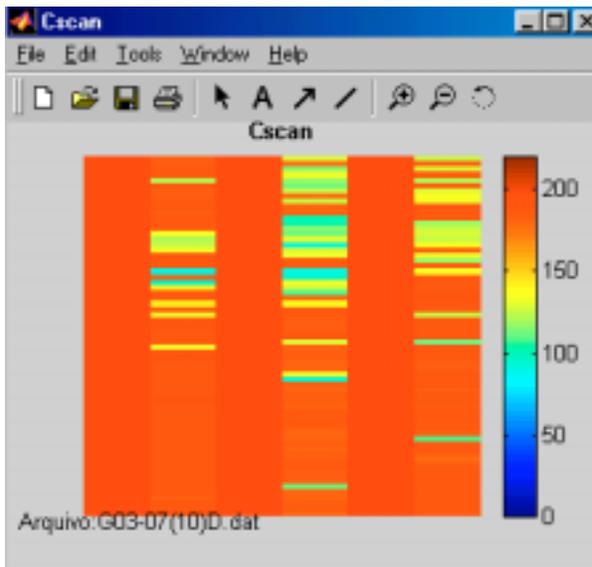


Figura IV.30. Imagem C-scan com distância entre aquisições de 10mm.

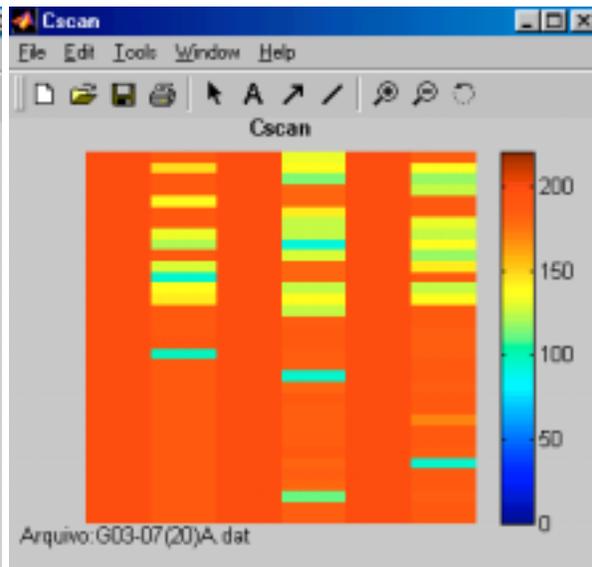


Figura IV.31. Imagem C-scan com distância entre aquisições de 20mm.

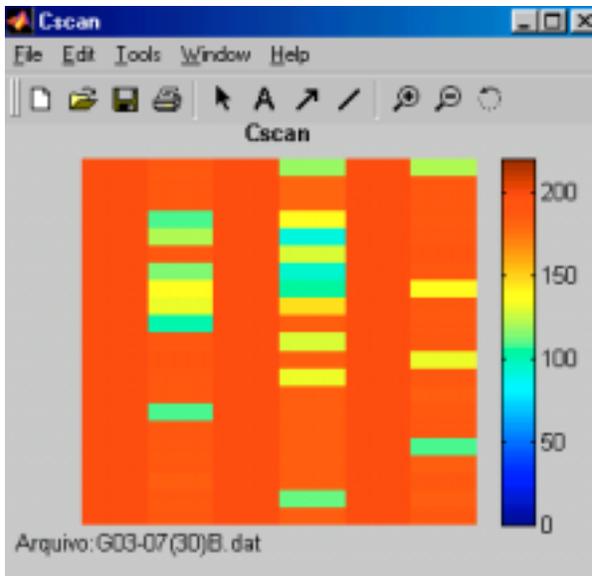


Figura IV.32. Imagem C-scan com distância entre aquisições de 30mm.

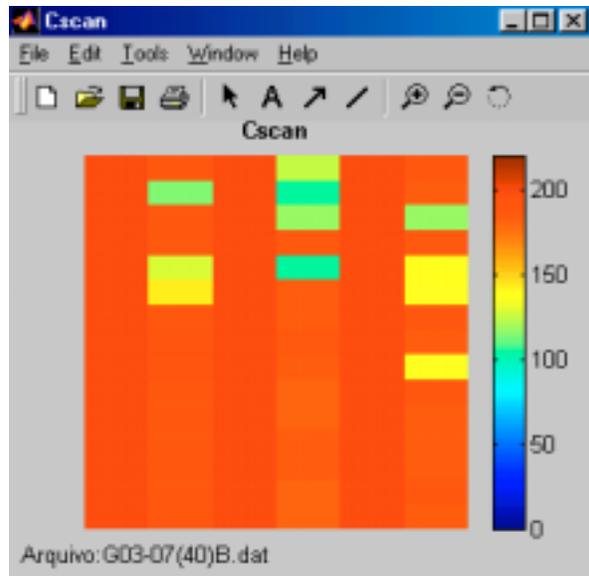


Figura IV.33. Imagem C-scan com distância entre aquisições de 40mm.

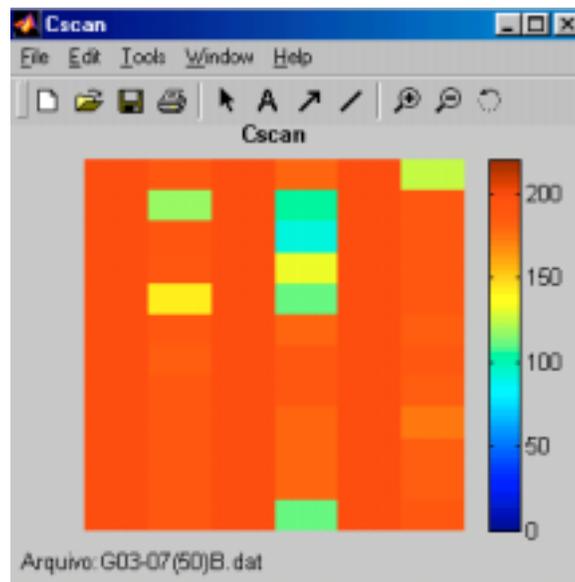


Figura IV.34. Imagem C-scan com distância entre aquisições de 50mm.

Pode ser observado que as configurações e quantidade de defeitos detectados não modificaram muito em relação as inspeções realizadas com distância entre transdutores de 40mm. Isto deve-se ao fato, como dito anteriormente, dos defeitos se localizarem mais nas bordas dos quadrantes.

Um fato relevante que pode ser observado analisando todos os ensaios realizados, é que para distâncias iguais entre aquisições, mas diferentes distâncias entre transdutores, o transdutor do canal 2, (C2) deveria detectar os mesmos defeitos, visto que, teoricamente, inspecionaria sempre o centro dos quadrantes, no entanto, isto não ocorreu, pelo menos na maioria dos casos. Este fato pode ser explicado se for levado em consideração, que os pontos iniciais das inspeções não coincidiam e que o mecanismo de inspeção não garante uma precisão no deslocamento dos transdutores, ou seja não se pode garantir que o transdutor central estaria realmente no centro do quadrante.

A principal conclusão que podemos chegar avaliando todos os ensaios realizados, é que, em geral, as áreas que continham defeitos e que foram mapeadas por De Padua [36], o sistema em estudo conseguiu detectar. No entanto uma maior ou menor precisão dos resultados vai depender do uso de uma menor ou maior distância entre aquisições respectivamente. Por outro lado, a medida que diminui a distância entre aquisições, o tempo de inspeção aumenta o que acarreta um maior custo da operação, como já mencionado anteriormente. Portanto, a distância entre aquisições é uma decisão que vai depender da aplicação desejada e do risco que se pode correr, como já foi levantado no estudo de simulação Monte Carlo.

Os quadrantes Q21 ao quadrante Q27 do corpo de prova 2 também foram inspecionados por este sistema, e os resultados estão no anexo B (figura B.1 a figura B.15) deste trabalho, no entanto, o mesmo raciocínio aplicado para a discussão do quadrante Q1 ao quadrante Q7 pode ser aplicado às inspeções realizadas do quadrante Q21 ao quadrante Q27.

IV.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Na etapa 1, utilizando o programa Neoend e um corpo de prova com defeitos artificiais, avaliou-se a influência do aumento da distância entre aquisições na detecção de defeitos. Pode-se observar que a medida que distância entre aquisições aumenta a definição da forma do defeito diminui e que para distância entre aquisições inferior ao diâmetro do defeito, todos os defeitos são detectados, enquanto que para distância entre aquisições superior ao diâmetro do defeito a detecção torna-se um fenômeno aleatório, podendo ser tratado estatisticamente.

Na etapa 2, utilizando o sistema multicanal e um corpo de prova com defeitos artificiais, desenvolveu-se uma metodologia de detecção e análise dos resultados das inspeções. O método desenvolvido permite visualizar os defeitos por meio de um mapa de cores C-scan. Utilizando a técnica de simulação Monte Carlo, realizou-se um estudo teórico da probabilidade de detecção dos defeitos, para diferentes distâncias entre transdutores e entre aquisições, os resultados foram mostrados em forma de gráfico de probabilidade de detecção versus diâmetro do defeito.

Na etapa 3, utilizando o sistema multicanal e um corpo de prova real, avaliou-se a capacidade de detecção do sistema multicanal para um corpo de prova contendo defeitos reais provocados por corrosão devido ao ataque por hidrogênio. Os resultados foram comparados com resultados conhecidos e pode-se comprovar a eficiência do sistema para um caso real. Variou-se a distância entre aquisições para verificar a influência desta variável na detecção de defeitos reais, o que comprovou os ensaios realizados na etapa 1 com um corpo de prova contendo defeitos artificiais, ou seja, que quanto menor a distância entre aquisições, maior será a precisão nos resultados.

No estudo de simulação Monte Carlo, foram feitas várias considerações. Na modelagem considerou-se as condições mais ideais possíveis. Portanto, uma sugestão para trabalho futuro é modelar condições mais próximas da realidade. Outra sugestão, é realizar um estudo de risco versus custo para selecionar a malha de varredura e a respectiva probabilidade de detecção, fundamentadas em estudos mais detalhados.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo avaliar o sistema multicanal na detecção de descontinuidades e desenvolver uma metodologia de detecção e avaliação dos resultados das inspeções, assim como também, estudar a influência de variáveis que estão relacionadas ao processo de inspeção de um sistema multicanal, como a distância entre transdutores e entre aquisições. Foram realizados ensaios em corpos de provas com defeitos artificiais inseridos e em corpos de prova com defeitos reais de corrosão devido ao ataque por hidrogênio. Um método de avaliação dos resultados foi desenvolvido, permitindo visualizar os defeitos através de mapas de cores C-scan. A influência das variáveis, distância entre transdutores e entre aquisições pôde ser analisada experimentalmente, através dos ensaios realizados e teoricamente através de um estudo estatístico de probabilidade de detecção de defeitos, utilizando para tal finalidade a ferramenta de simulação Monte Carlo. A partir dos resultados obtidos pôde-se concluir que:

- O sistema funciona com eficiência na detecção de descontinuidades planares e na determinação de perda de espessura por corrosão;
- A adoção de um sistema que opere simultaneamente vários transdutores oferece maior produtividade ao sistema de inspeção;
- O nível de detectabilidade dos defeitos está associado ao seu tamanho e a distância entre aquisição de sinais;

- Para o corpo de prova contendo defeitos artificiais, a resolução da forma do defeito diminui a medida que aumenta-se a distância entre aquisições;
- Para o corpo de prova contendo defeitos reais por corrosão a precisão dos resultados aumenta a medida que a distância entre aquisições diminui, pois os defeitos são melhor separados;
- Para distância entre aquisições menor que o diâmetro do defeito, todos os defeitos são detectados, considerando condições ideais de operação. Por outro lado, para distância entre aquisições maior que o diâmetro do defeito, a detecção torna-se um fenômeno aleatório podendo ser tratado estatisticamente;
- Utilizando simulação de Monte Carlo pode-se definir uma malha de varredura de interesse, relacionando o tamanho do defeito e a probabilidade de detecção.

CAPÍTULO VI

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] DEUTSCH, W. A. K., “Automated Ultrasonic Inspection”, *15th World Conference on Non-Destructive Testing*, Roma, 15-21 October 2000.
- [2] GINZEL, E. A., LEGAULT, G., KIM, Y. M., “Mechanized Ultrasonic Inspection of Offshore Platform Structures”, *NDT.net*, Vol. 3, N^o. 01, January 1998.
- [3] RAKOCEVIC, M., WANG, X., CHEN, S., et al., “Development of an Automated Mobile Robot Vehicle Inspection System for NDT of Large Steel Plates”, *Insight*, Vol. 41, N^o. 06, pp 376-382, June 1999.
- [4] WILLSHER, S. J., SMITH, R. A., “Multi-Element Ultrasonic Scanning of in-Service Airframes”, *Insight*, Vol. 40, N^o. 03, pp 154-159, March 1998.
- [5] STRYCEK, J. O., LOERTSCHER, H. P., STARMAN, S., “High Speed Large Area Scanning Using Air-Coupled Ultrasound”, *15th World Conference on Non-Destructive Testing*, Roma, 15-21 October 2000.
- [6] KRETOW, J., PRAVOS, K., ROCKSTROH, B., at al., “New Eletronic Components and Software for Single and Multi-Channel Ultrasonic Inspections of Piping and Componentes”, *NDT.net*, Vol. 3, N^o. 05, May 1998.
- [7] Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos. “*Ensaio Não Destrutivo Ultrason*”, São Paulo.

- [8] SANTIN, J.L., *Ultra-som Técnica e Aplicação*, 1^a Edição, Rio de Janeiro, Editora Qualitymark, 1996.
- [9] FISF, P., *Physics and Instrumentation of Diagnostic Medical Ultrasound*, New York, Editora Jonh Wiley & Sons, 1990.
- [10] SILVA, I. C., *Avaliação da Técnica do Tempo de Percurso da Onda Difrata no Dimensionamento de Descontinuidades*. Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1999.
- [11] American Society for Nondestructive Testing, *Nondestructive Testing Handbook*, 2^a Edição, Vol. 7, 1991.
- [12] Nondestructive Evaluation and Quality Control, *Metals Handbook*, 3^a edição, Vol. 17, 1994.
- [13] NEPOMUCENO, L. X., *Tecnologia Ultra-sônica*, 1^a Edição, São Paulo, Editora Edgard Blücher LTDA, 1980.
- [14] Lloyd, P. A., “Ultrasonic System for Imaging Delaminations in Composite Materials”, *Ultrasonics*, Vol. 27, pp 8-18, 1989.
- [15] TEMPLE, J. A . G., “Theoretical Work in Reation to Reliability: Time-of-Flight Diffraction”, *Non-Destructive Examination for Pressurised Components*, ed. Elsevier Applied Science Publishers, pp 279-304, 1984.
- [16] SERRUYS, Y., JOFFRE, F., PARADIS, L., et al., “Methods of Signal Processing for Determination of Dimension of Objects” *Non-Destructive Examination for Pressurised Components*, ed. Elsevier Applied Science Publishers, pp 99-111, 1984.

- [17] SJERVE, E. M., BRYANT, G. F., STEWART, D. C., “Ultrasonic Phased Array Technology in the Pipeline Industry”, *2000 International Pipeline Conference*, Vol. 2, pp 823-826, Canada, 2000.
- [18] DESRUELLES, D., BURAT, O., PIERRE, G., “Inspection of Tube Using Ultrasonic Phased Probes”, *NDT.net*, Vol. 2, N°. 06, June 1997.
- [19] LINES, D., “Integrated Ultrasonic Arrays for Rapid Manual Inspection and Mapping”, *NDT.net*, Vol. 5, N°. 07, July 2000.
- [20] LAFONTAINE, G., CANCRE, F., “Potential of Ultrasonic Phased Arrays for Faster, Better and Cheaper Inspections”, *NDT.net*, Vol. 5, N°. 07, October 2000.
- [21] SJERVE, E. M., STEWART, D. C., BRYANT, G. F., “Comparison of Multi-probe and Phased Array Girth Weld Inspection systems”, *2000 International Pipeline Conference*, Vol. 2, pp 827-830, Canada, 2000.
- [22] LIMA, M. A. D., *Focalização e Deflexão Eletrônica do Feixe Ultra-Sônico de Um Transdutor Linear*. Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1995.
- [23] REZENDE, J. C. P., *Transdutor de Ultra-Som em Arranjo Linear com Varredura Eletrônica*. Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1993.
- [24] RUMBOLD, J. G., “Multichannel Versus Multiplex Ultrasonic NDT Systems”, *Materials Evaluation*, Vol. 41, pp 1258-1260, October 1983.
- [25] GINZEL, E., HOFF, M., “Further Developments in Ultrasonic Inspection of Pipeline Girth Welds”, *NDT.net*, Vol. 1, N°. 06, June 1996.

- [26] AGTHOVEN, R. V., RAAD, J. A., “Reliability of Mechanised UT Systems to Inspect Girth Welds During Pipeline Construction”, *NDT.net*, Vol. 3, N^o. 11, November 1998.
- [27] GINZEL, E., BOER, P., HOFF, M., “Application of Mechanized Ultrasonic Inspection to Manually Welded Pipeline Girth Welds”, *NDT.net*, Vol. 2, N^o. 05, May 1997.
- [28] RAAD, J. A., DIJKSTRA, F. H., “Mechanised Ultrasonic on Girth Welds During Pipeline Construction”, *NDT.net*, Vol. 3, N^o. 11, November 1998.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] 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.
- [32] ANG, A. H. S., TANG, W. H., *Probability Concepts in Engineering Planning and Design – Decision, Risk and Reliability*, Vol. 3, New York, Editora John Wiley & Sons, 1984.
- [33] BUSSAB W. O., MORETTIN P. A., *Métodos Quantitativos – Estatística Básica*, 4^a Edição, São Paulo, Editora Atual, 1987.

- [34] SHIAVI R., *Introduction to Applied Statistical Signal Analysis*, 2^a Edição, San Diego, Editora Academic Press, 1999.
- [35] MELCHERS R. E., *Structural Reliability – Analysis and Prediction*, New York, Editora Jonh Wiley & Sons, 1987.
- [36] DE PADUA, G. X., *Estudo da focalização do Feixe Ultra-Sônico por Lentes Acústicas aplicado à Detecção e Dimensionamento de trincas de hidrogênio no aço*. Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1999.
- [37] PEREZ, G. B., *Detecção de Micro-Danos Induzidos por Hidrogênio Através da Análise Espectral Ultra-Sônica*. Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1998.
- [38] Procedimento REPLAN, *Execução de Ensaio Não Destrutivo – Ultra-Som*, PETROBRAS N-1594b, Novembro, 1989.

ANEXO A

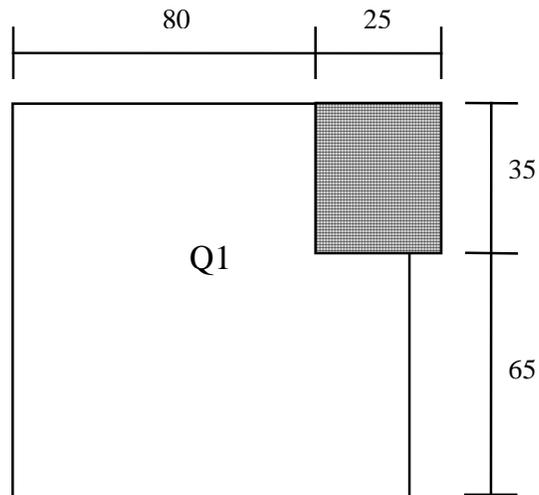


Figura A.1. Localização da malha de varredura do defeito Q1M0 [36].

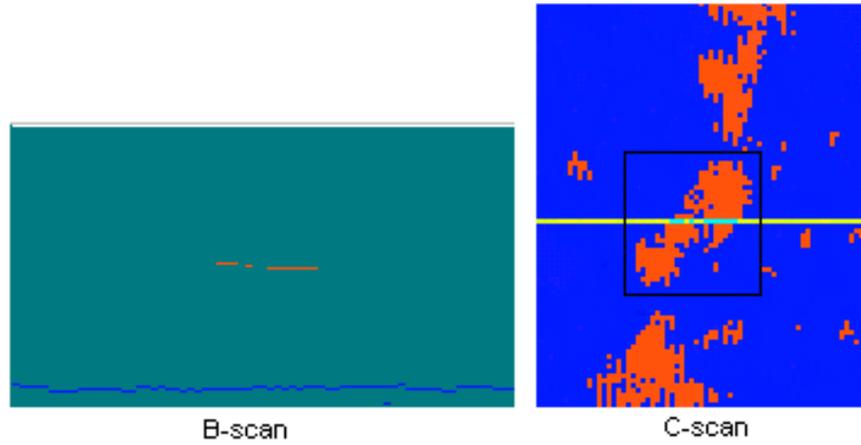


Figura A.2. Imagens B-scan e C-scan do defeito Q1M0 obtida com o transdutor H10M acoplada a lente esférica [36].

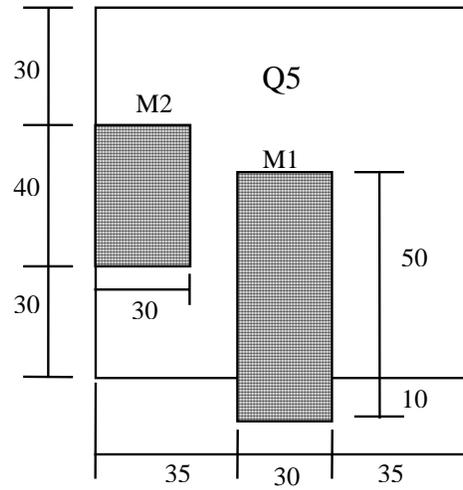


Figura A.3. Localização da malha de varredura dos defeitos Q5M1 e Q5M2 [36].

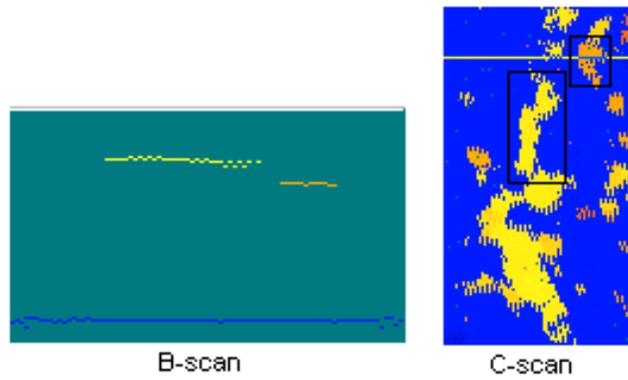


Figura A.4. Imagens B-scan e C-scan do defeito Q5M1 obtida com o transdutor H10M acoplada a lente esférica [36].

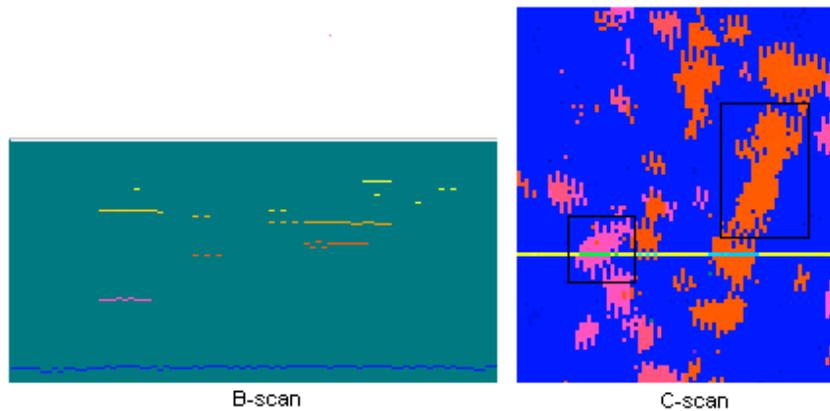


Figura A.5. Imagens B-scan e C-scan do defeito Q5M2 obtida com o transdutor H10M sem lente [36].

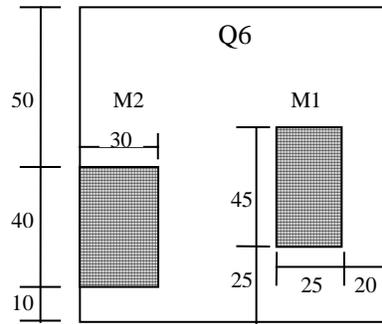


Figura A.6. Localização da malha de varredura dos defeitos Q6M1 e Q6M2 [36].

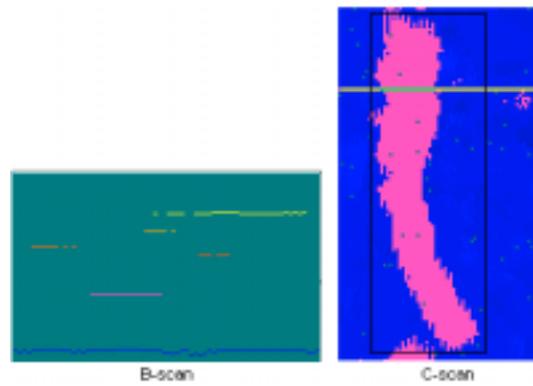


Figura A.7. Imagens B-scan e C-scan do defeito Q6M1 obtida com o transdutor H10M sem lente [36].

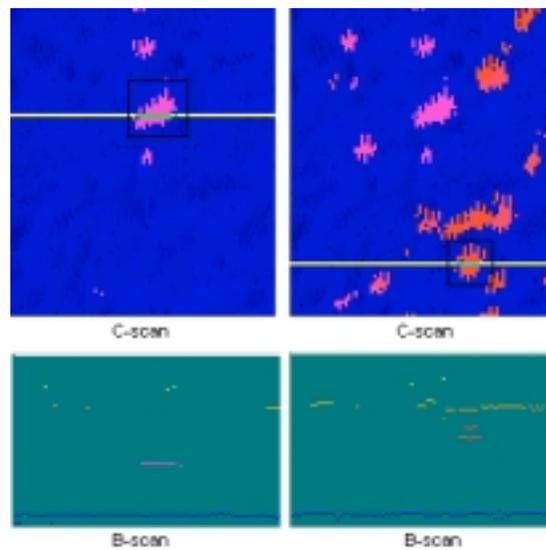


Figura A.8. Imagens B-scan e C-scan do defeito Q6M2 obtida com o transdutor H10M acoplado a lente esférica [36].

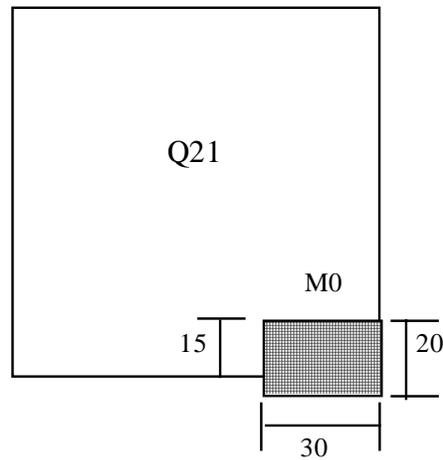


Figura A.9. Localização da malha de varredura do defeito Q21M0 [36].

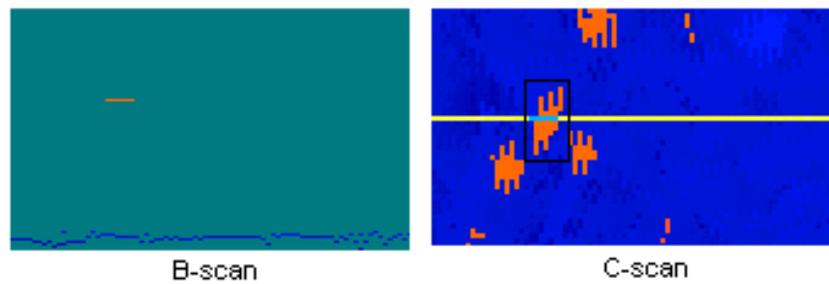


Figura A.10. Imagens B-scan e C-scan do defeito Q21M0 obtida com o transdutor H10M acoplado a lente esférica [36].

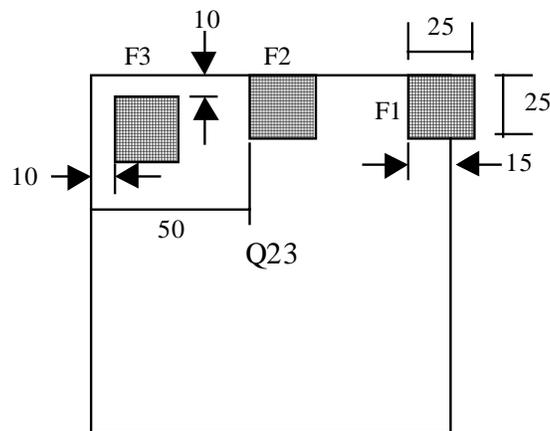


Figura A.11. Localização da malha de varredura dos furos Q23F1, Q23F2 e Q23F3 [36].

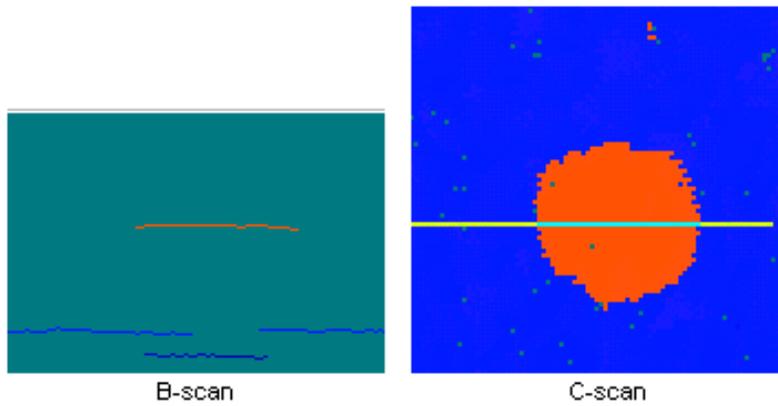


Figura A.12. Imagens B-scan e C-scan do furo Q23F1 obtida com o transdutor H10M sem lente [36].

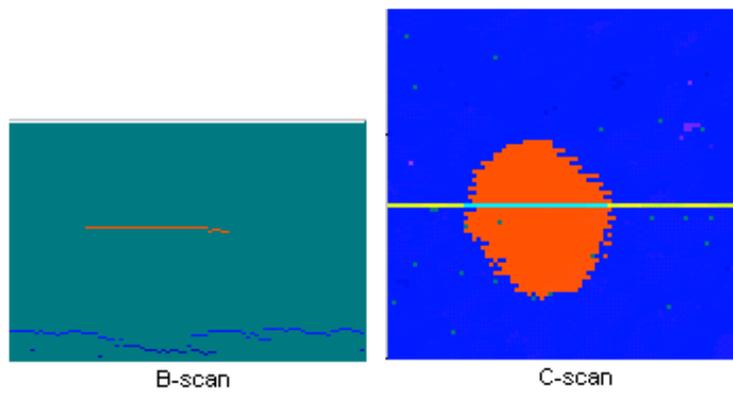


Figura A.13. Imagens B-scan e C-scan do furo Q23F2 obtida com o transdutor H10M acoplado a lente esférica [36].

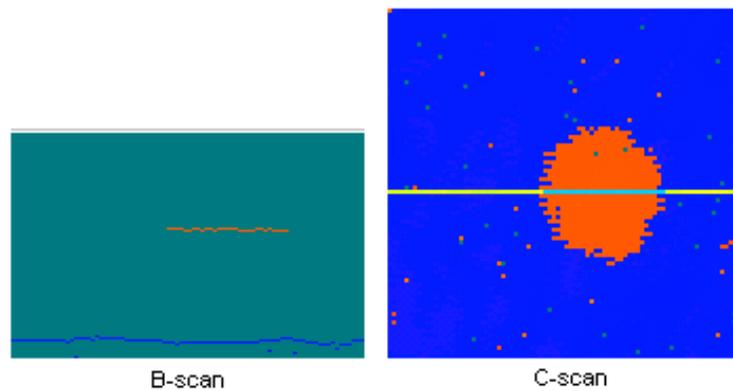


Figura A.14. Imagens B-scan e C-scan do furo Q23F3 obtida com o transdutor H10M acoplado a lente cônica 160° [36].

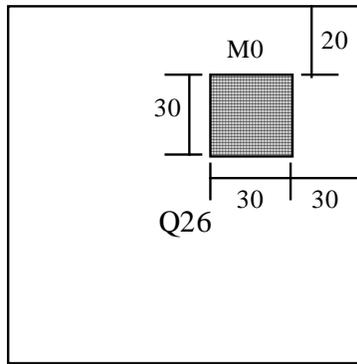


Figura A.15. Localização da malha de varredura do defeito Q26M0 [36].

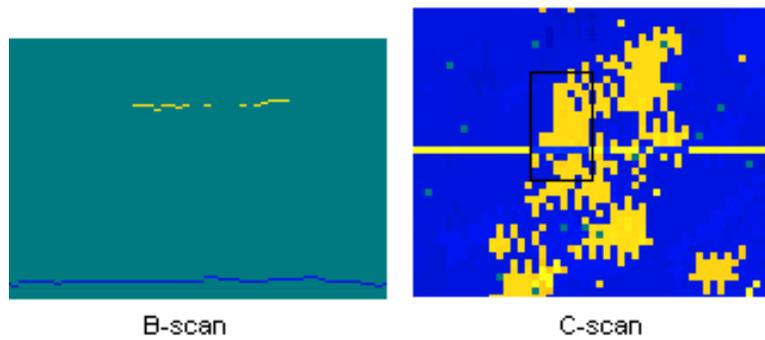


Figura A.16. Imagens B-scan e C-scan do defeito Q26M0 obtida com o transdutor H10M acoplado a lente cônica 160° [36].

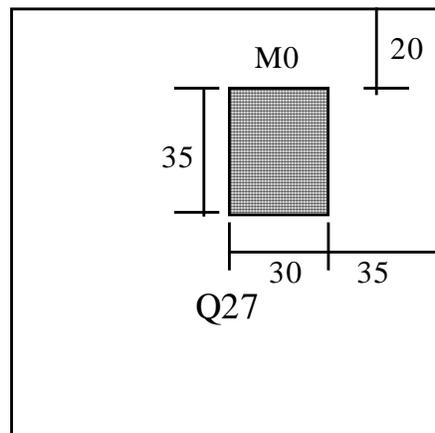


Figura A.17. Localização da malha de varredura do defeito Q27M0 [36].

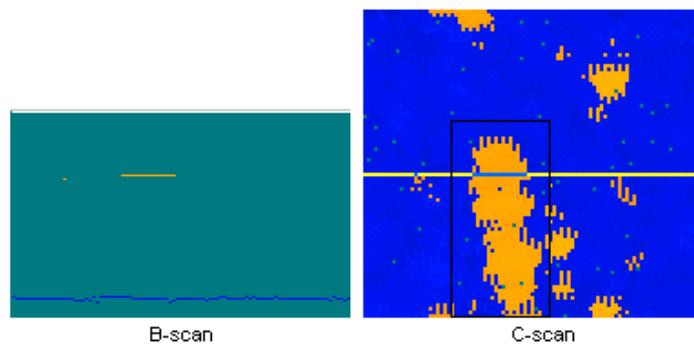


Figura A.18. Imagens B-scan e C-scan do defeito Q27M0 obtida com o transdutor H10M sem lente [36].

ANEXO B

Inspeção do quadrante Q21 ao quadrante Q27 com separação entre transdutores de 30mm (figura B.1 a figura B.5)

As imagens mostradas nas figuras de B.1 a B.5 são imagens C-scans obtidas a partir de uma varredura realizada sobre o quadrante Q21 ao quadrante Q27 utilizando o sistema multicanal de inspeção. Foram utilizados três transdutores com separação entre eles de 30 mm e distância entre aquisições de 10mm, 20mm, 30mm, 40mm e 50mm respectivamente. O transdutor utilizado foi um transdutor por contato com especificação Krautkrämer MB4S e o primeiro quadrante corresponde a base da figura.

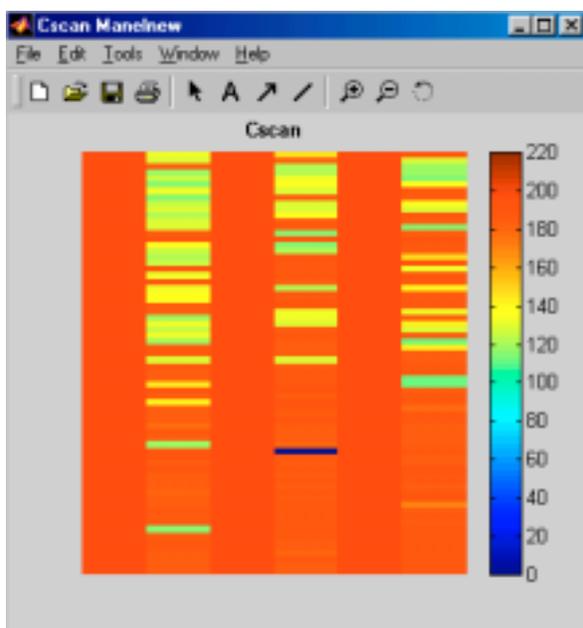


Figura B.1. Imagem C-scan com distância entre aquisições de 10mm.

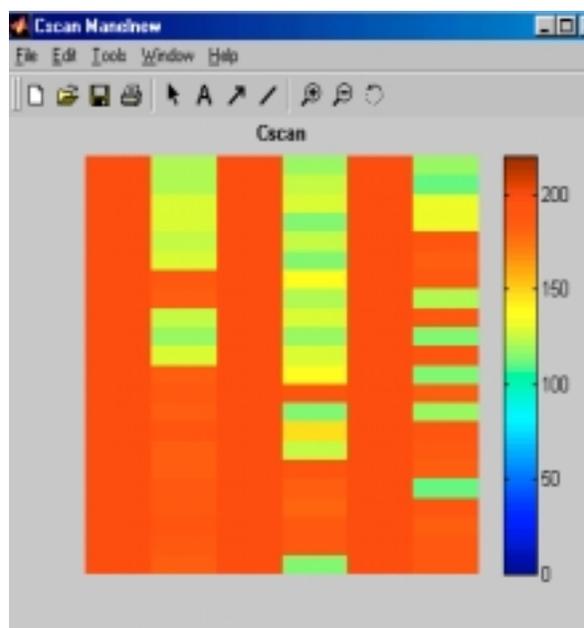


Figura B.2. Imagem C-scan com distância entre aquisições de 20mm.

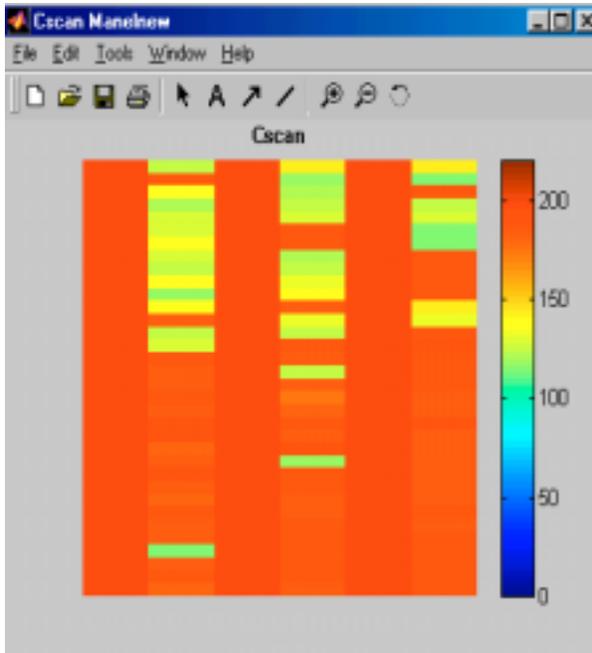


Figura B.3. Imagem C-scan com distância entre aquisições de 30mm.

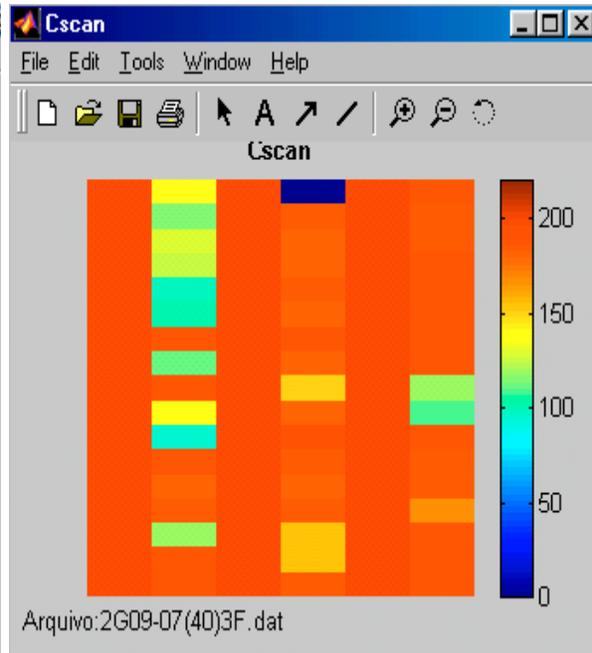


Figura B.4. Imagem C-scan com distância entre aquisições de 40mm.

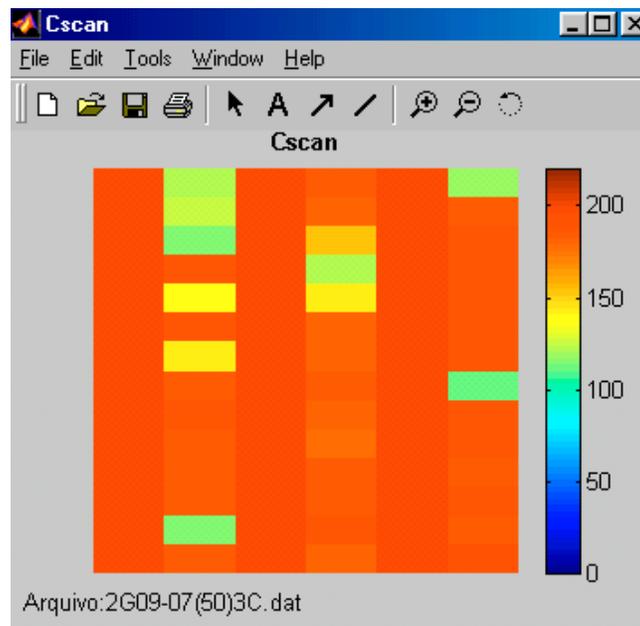


Figura B.5. Imagem C-scan com distância entre aquisições de 50mm.

Inspeção do quadrante Q21 ao quadrante Q27 com separação entre transdutores de 40mm (figura B.6 a figura B.10).

As imagens mostradas nas figuras de B.6 a B.10 são imagens C-scans obtidas a partir de uma varredura realizada sobre o quadrante Q21 ao quadrante Q27 utilizando o sistema multicanal de inspeção. Foram utilizados três transdutores com separação entre eles de 40mm e distância entre aquisições de 10mm, 20mm, 30mm, 40mm e 50mm respectivamente. O transdutor utilizado foi um transdutor por contato com especificação Krautkrämer MB4S e o primeiro quadrante corresponde a base da figura.

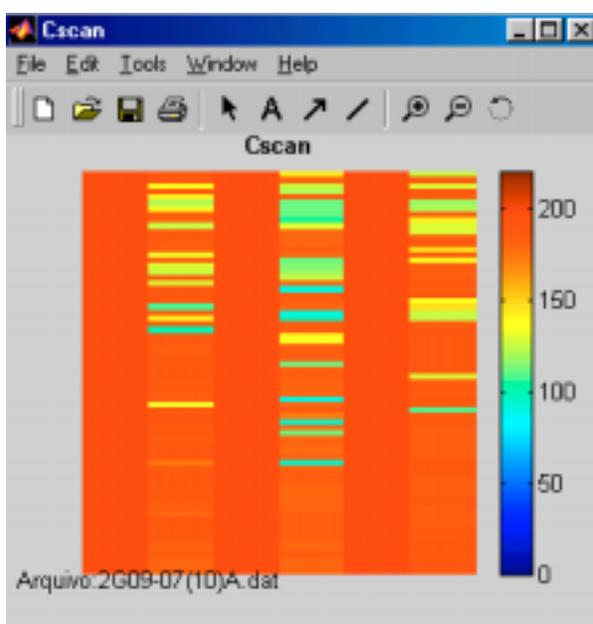


Figura B.6. Imagem C-scan com distância entre aquisições de 10mm.

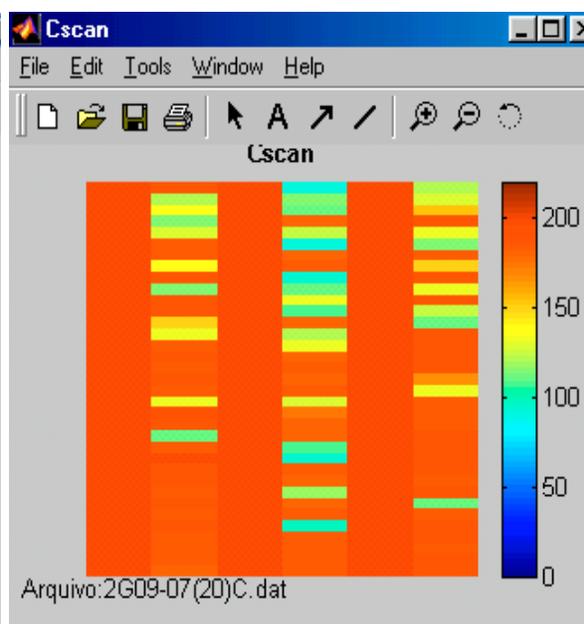


Figura B.7. Imagem C-scan com distância entre aquisições de 20mm.

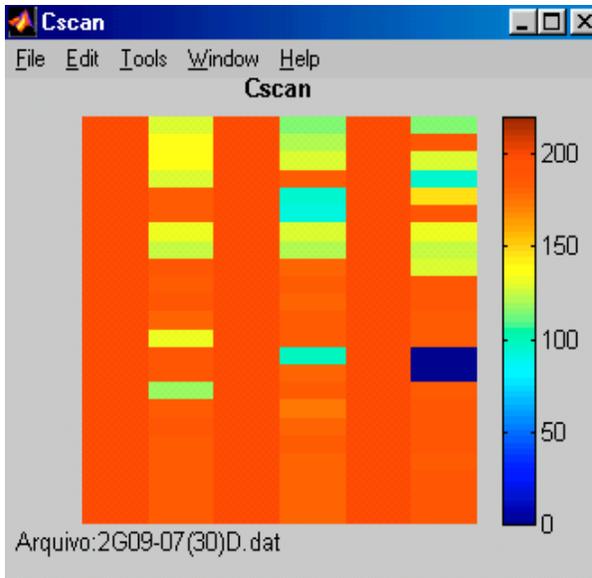


Figura B.8. Imagem C-scan com distância entre aquisições de 30mm.

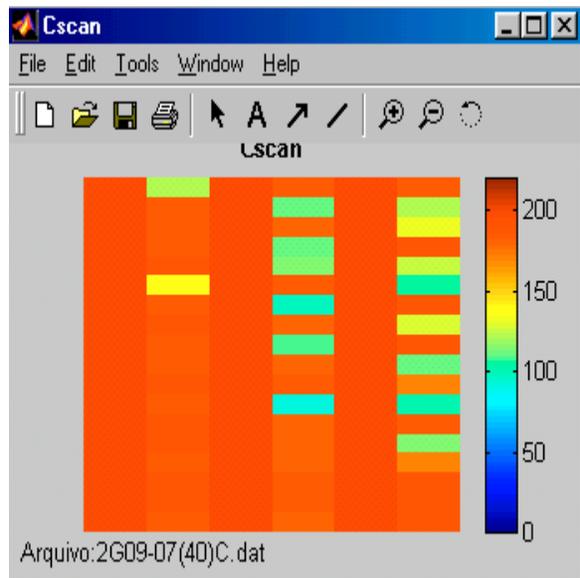


Figura B.9. Imagem C-scan com distância entre aquisições de 40mm.

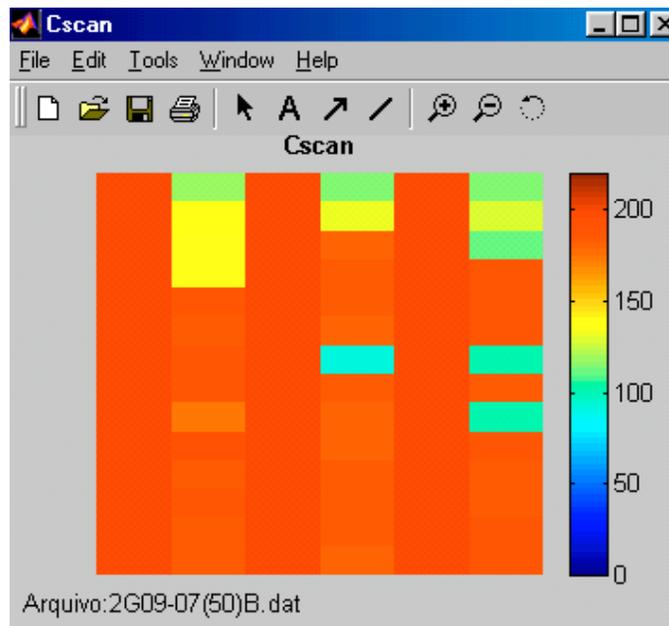


Figura B.10. Imagem C-scan com distância entre aquisições de 50mm.

Inspeção do quadrante Q21 ao quadrante Q27 com separação entre transdutores de 50mm (figura B.11 a figura B.15)

As imagens mostradas nas figuras de B.11 s B.15 são imagens C-scans obtidas a partir de uma varredura realizada sobre o quadrante Q21 ao quadrante Q27 utilizando o sistema multicanal de inspeção. Foram utilizados três transdutores com separação entre eles de 50mm e distância entre aquisições de 10mm, 20mm, 30mm, 40mm e 50mm respectivamente. O transdutor utilizado foi um transdutor por contato com especificação Krautkrämer MB4S e o primeiro quadrante corresponde a base da figura.

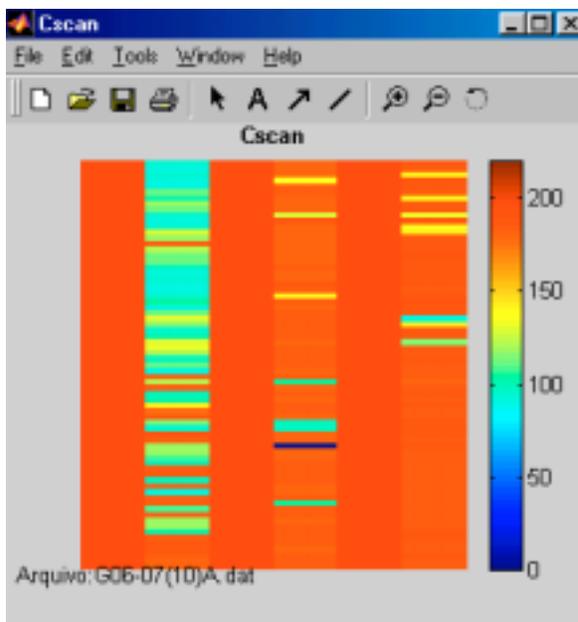


Figura B.11. Imagem C-scan com distância entre aquisições de 10mm.

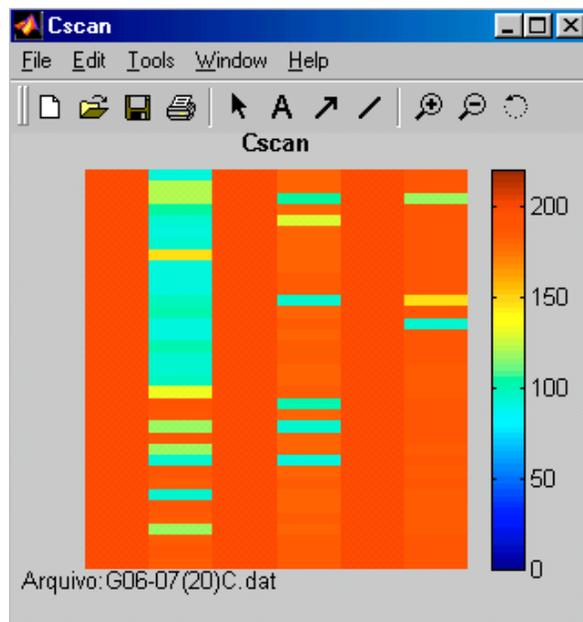


Figura B.12. Imagem C-scan com distância entre aquisições de 20mm.

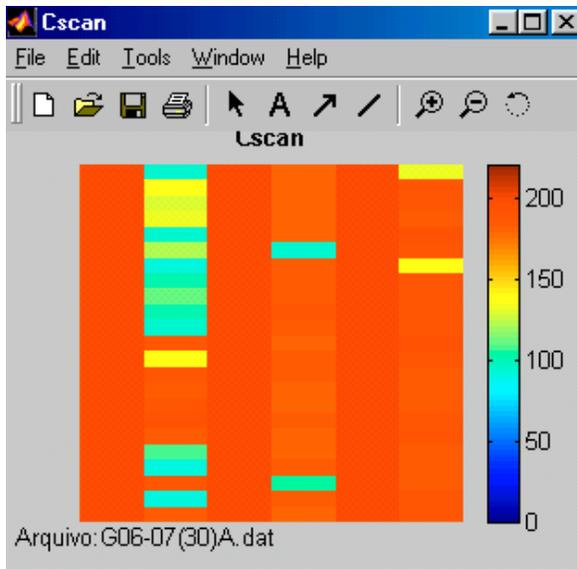


Figura B.13. Imagem C-scan com distância entre aquisições de 30mm.

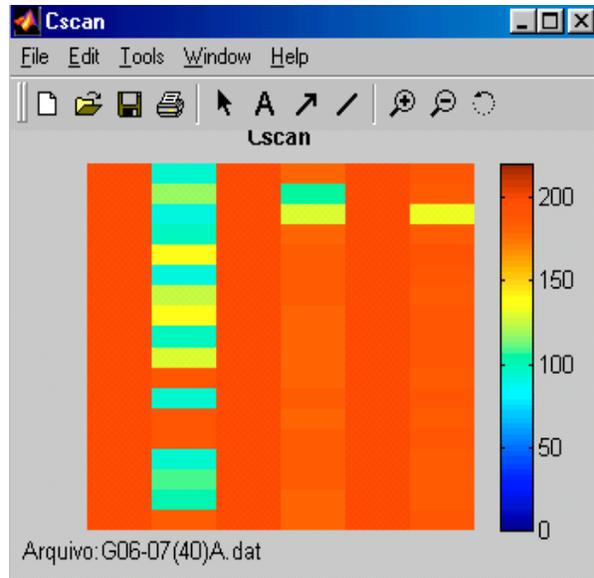


Figura B.14. Imagem C-scan com distância entre aquisições de 40mm.

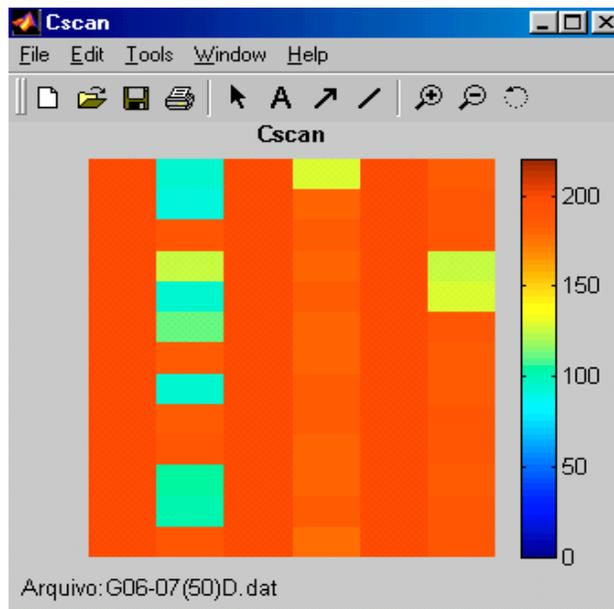


Figura B.15. Imagem C-scan com distância entre aquisições de 50mm.