DESENVOLVIMENTO DE ALGORITMO PARA FOCALIZAÇÃO DO FEIXE ULTRA-SÔNICO PELA TÉCNICA DE ABERTURA SINTÉTICA

André Mariano

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 A. Rebello, D.Sc.

Prof. Carlos Eduardo N. Gatts. D.Sc.

Prof. Fernando Luiz Bastian, Ph.D.

Prof. Arthur Martins Barbosa Braga, Ph.D

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL MARÇO DE 2003

MARIANO, ANDRÉ

Desenvolvimento de Algoritmo para Focalização do Feixe Ultra-sônico pela Técnica de Abertura Sintética [Rio de Janeiro] 2003

VI, 123 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc, Engenharia Metalúrgica e de Materiais, 2003)

Tese – Universidade federal do Rio de Janeiro, COPPE

1. Processamento de sinais ultra-sônicos

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

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

DESENVOLVIMENTO DE ALGORITMO PARA FOCALIZAÇÃO DO FEIXE ULTRA-SÔNICO PELA TÉCNICA DE ABERTURA SINTÉTICA

André Mariano

Março / 2003

Orientador: João Marcos Alcoforado Rebello

Programa: Engenharia Metalúrgica e de Materiais

Os ensaios não destrutivos experimentaram, juntamente com a ciência da informática, grandes avanços nas últimas décadas. A associação desses dois campos tem permitido o desenvolvimento de diversas aplicações que procuram cada vez mais atender os requisitos de controle de qualidade impostos pelas necessidades atuais. Entre esses desenvolvimentos pode-se destacar a Técnica de Focalização por Abertura Sintética (Synthetic Aperture Focusing Technique - SAFT), que consiste em uma técnica de pós-processamento de dados que visa melhorar a capacidade de localização e dimensionamento de defeitos. Ela utiliza geralmente, para isso, dados que tenham sido obtidos através de técnicas automatizadas de varredura. Essa técnica visa principalmente aumentar a relação sinal-ruído, bem como melhorar a resolução do ensaio.

Esse trabalho consistiu no desenvolvimento de um algoritmo de SAFT para aplicação em imagens de B-Scan obtidas por varredura automatizada do transdutor ultra-sônico no modo pulso-eco. Além do algoritmo linear (L-SAFT), algumas modificações foram implementadas de modo a melhorar o resultado obtido pela técnica.

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

DEVELOPMENT OF AN ALGORITHM FOR ULTRASOUND BEAM FOCUSING THROUGH A SYNTHETIC APERTURE TECHNIQUE.

André Mariano

March / 2003

Advisor: João Marcos Alcoforado Rebello

Department: Metallurgical and Material Engineering

Non-destructive evaluation techniques have experienced, along with computer science, a large development in the past decades. The massive use of computational resources in non-destructive evaluation methods has allowed the development of several applications that make possible to fulfill the quality control requirements of modern needs. One of these developments is the Synthetic Aperture Focusing Technique (SAFT), a signal processing technique which aims to improve the capability of locating and dimensioning material discontinuities. This technique processes data acquired through automated surface scans, to improve both the signal to noise relation and resolution.

In this work a SAFT algorithm was developed for the pitch/catch mode of ultrasound inspection, using a normal transducer. In addition, new signal processing was developed with the purpose of making the algorithm more robust.

Índice

1. Introdução	1
1.1 O Ultra-som como ensaio não destrutivo	1
1.2 Introdução ao Texto	3
2. Revisão Bibliográfica	4
2.1 A localização e o dimensionamento de trincas	4
2.2 A relação sinal-ruído	5
2.3 Resolução do feixe sônico	8
2.4 Automatização dos ensaios	10
2.5 Digitalização de sinais	10
2.6 Processamento de sinais digitais	15
2.6.1 Análise Espectral	16
2.6.2 Processamento de Espectro Fracionado – "Split	
Spectrum Processing"	21
2.6.3 Deconvolução	23
2.6.4 Filtragem de Freqüências – "Block Filtering"	24
2.6.5 Redes Neurais Artificiais ("Artificial Neural	
Network") e Lógica Nebulosa ("Fuzzy Logic")	25
2.7 SAFT	26
2.7.1 Considerações gerais sobre a técnica	26
2.7.2 A evolução da técnica	27
2.7.3 Características especiais do SAFT	28
2.7.4 L-SAFT	33
2.7.5 F-SAFT	38

3. Materiais e Métodos	39
3.1 Determinação do feixe sônico	39
3.2 Aquisição dos dados	42
3.3 Corpo de prova	43
3.4 O Algoritmo de SAFT	48
3.5 Procedimento experimental	52
4. Resultados Obtidos e Discussão	53
4.1 A abertura sintetizada	53
4.2 Corpo de prova – lado A	57
4.3 Corpo de prova – lado B	74
5. Conclusão	84
5.1 O algoritmo de SAFT	84
5.2 Trabalhos futuros	85
6. Referências Bibliográficas	86
Apêndice A	94

1.1 O Ultra-som como ensaio não destrutivo

Desde a criação do aparelho de ultra-som, na década de 40, os princípios do método permanecem os mesmos [1,2,3]. Os maiores desenvolvimentos têm sido na instrumentação eletrônica e no processamento de dados, principalmente devido à utilização da informática.

Os ensaios não destrutivos, e principalmente a técnica ultra-sônica, estão a cada dia ganhando mais espaço, não só como método de inspeção, mas também e principalmente como ferramenta capaz de aumentar 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 caracterização de descontinuidades em materiais, bem como na avaliação das suas propriedades, devido principalmente a algumas vantagens sobre os demais ensaios não destrutivos [1,2]:

- Grande poder de penetração, que permite a detecção de descontinuidades em grandes profundidades. A inspeção ultra-sônica é feita rotineiramente em materiais de várias espessuras;
- Alta sensibilidade, permitindo a detecção de pequenas descontinuidades;
- Maior precisão na determinação da posição de falhas internas, em estimar o seu tamanho e caracterizar sua orientação e natureza, quando comparada com outras técnicas de ensaios não destrutivos;
- Somente uma superfície da peça precisa ser acessível;
- Operação é eletrônica, o que produz uma imediata indicação da falha. Isto torna o método adequado para interpretação imediata, podendo ser incorporado a um sistema de varredura automática para monitoramento "on-line" da produção e controle de processo;
- Não apresenta perigo para o operador e nem para a integridade dos equipamentos inspecionados;
- Portabilidade;

 O aparelho contém uma saída que permite a ligação a um computador, e posterior processamento do sinal.

Entre as desvantagens do método, no entanto, podem ser destacadas as seguintes:

- O método manual de inspeção requer grandes cuidados, além de pessoal bem qualificado para a execução e avaliação dos resultados;
- É necessário o uso de acoplantes para a transmissão das ondas ultra-sônicas do transdutor para a peça a ser inspecionada;
- Descontinuidades muito próximas à superfície podem não ser detectadas;
- É necessário o uso de blocos padrões e de referência para a calibração do aparelho e para a caracterização das descontinuidades.

O ensaio ultra-sônico fornece informações a respeito de diversos aspectos do material, como: espessura, atenuação, forma, presença de descontinuidades e tamanho e orientação dos mesmos. Esses resultados se baseiam em duas informações principais: a amplitude do sinal e o tempo de percurso do mesmo. O conteúdo em freqüência do sinal também fornece informações importantes, mas essas ainda são utilizadas em menor escala.

Os princípios físicos que regem a propagação de ultra-som, os principais fatores que influenciam os resultados obtidos pelo ensaio e as técnicas principais de ensaio ultra-sônico são descritos em maiores detalhes no apêndice A deste trabalho.

1.2 Introdução ao trabalho

Com o tempo vários desenvolvimentos foram realizados no sentido de melhorar a técnica de inspeção e torná-la mais abrangente, principalmente no que diz respeito à automatização do processo. Procura-se, dessa forma, reduzir a influência do operador nos resultados obtidos, aumentar a confiabilidade da técnica, e ao mesmo tempo simplificar a interpretação dos resultados através das técnicas de pós-processamento de sinais. Entre esses desenvolvimentos pode-se destacar a Técnica de Focalização por Abertura Sintética ("Synthetic Aperture Focusing Technique" - SAFT), que consiste em uma técnica de pós-processamento de dados que visa melhorar a capacidade de localização e dimensionamento de descontinuidades, aumentar a relação sinal-ruído e melhorar a resolução do ensaio. Desenvolver um algoritmo que realize essa focalização é o objetivo desse trabalho.

No capítulo 2 desse trabalho está contemplada uma revisão bibliográfica sobre os assuntos significativos ao desenvolvimento do trabalho. Abordam-se temas como a relação sinal-ruído, a localização e o dimensionamento de trincas, a resolução do feixe sônico, a automatização de ensaios e a digitalização de sinais. É feita, ainda, uma revisão bibliográfica sobre as principais técnicas de processamento de sinais digitais. A técnica de focalização por abertura sintética é detalhada, sendo dada ênfase ao algoritmo que foi desenvolvido neste trabalho.

No capítulo 3 se detalham os materiais e métodos utilizados na execução deste trabalho. No capítulo 4 os resultados obtidos são apresentados e discutidos. O capítulo 5 apresenta a conclusão final do trabalho realizado e apresenta sugestões para trabalhos futuros que pretendam abordar esse tema.

O capítulo 6 contém as referências bibliográficas, e o apêndice A detalha o ensaio por ultra-som, descrevendo suas principais propriedades.

2.1 A localização e o dimensionamento de descontinuidades

A capacidade de carregamento de um determinado material pode ser altamente comprometida pela presença de descontinuidades em geral, e em particular pela presença de trincas. Sob o ponto de vista da mecânica da fratura, o dimensionamento das trincas, bem como a determinação da sua profundidade e orientação, possuem uma importância fundamental na determinação da vida remanescente dos componentes. Existe uma vasta literatura que aborda esse tema sob o ponto de vista do ultra-som [4-13].

No início dos anos 70 houve muitas críticas a respeito do mau desempenho da técnica de ultra-som no dimensionamento de descontinuidades. Essa limitação surgiu, principalmente, porque o parâmetro empregado para a estimativa da profundidade da descontinuidade (extensão ao longo da espessura) consistia na amplitude do pulso refletido [4,6]. Essa amplitude pode ser influenciada por diversos parâmetros além do tamanho do refletor, como rugosidade, transparência e a orientação da descontinuidade, bem como pela eficiência do acoplamento. Isso conduz a uma correlação insatisfatória entre a amplitude do pulso refletido e a profundidade da descontinuidade.

Nessa época, portanto, os esforços em pesquisa e desenvolvimento, no que diz respeito a dimensionamento e localização de trincas, se concentravam em aumentar a acuidade das técnicas existentes. Investigava-se, também, a possibilidade de se desenvolverem novas técnicas ainda mais acuradas. Era sabido que um problema inerente à interpretação dos dados do ultra-som consistia no embaçamento da resposta de qualquer descontinuidade devido à largura relativamente grande do feixe sônico, resultado da sua divergência no campo distante. Esse problema será evidentemente mais crítico nos corpos de prova mais espessos, gerando um limite real à eficiência da técnica de queda de decibel, geralmente utilizada para o dimensionamento das trincas [4].

Nesse período os trabalhos de Aldridge em holografía ultra-sônica, de Frederick em SAFT, e de Silk em deconvolução mostraram que era possível reduzir significativamente os efeitos da divergência do feixe [4]. Essas técnicas, no entanto, tiveram aplicação reduzida nessa época devido a limitações tecnológicas do período, limitações essas que foram superadas com o avanço da ciência da informática.

Ainda nesse período foram desenvolvidos os primeiros trabalhos com a técnica de tempo de percurso de onda difratada ("Time of Flight Diffraction Technique" – TOFD), que também significou um grande avanço na precisão em estimativas de profundidade de descontinuidades [4,5,10].

2.2 A relação sinal-ruído

A inspeção pelo método intensidade versus tempo de percurso, também conhecida como pulso-eco, depende da interpretação de sinais obtidos por transdução piezelétrica, nos quais se registram os ecos de refletores eventuais [14]. A figura 2.1 ilustra algumas situações que podem ser resultantes desse ensaio. É visível na ilustração (2.1-f) o efeito que uma baixa relação sinal-ruído ocasiona no sinal obtido, impedindo o discernimento do eco proveniente da decontinuidade.

Os dados obtidos através do ensaio por ultra-som são normalmente afetados por ruído. Por vezes se deve ao ruído eletrônico, por vezes devido ao ruído acústico gerado por ecos de pequenas inclusões ou grãos, e por vezes devido ao acoplamento imperfeito. O efeito do ruído é aumentar a dificuldade de interpretação de sinais de eco individuais, pois o eco devido a uma falha pode não estar distinguível devido ao ruído presente [15].

Tendo em vista o aumento da relação sinal-ruído, algumas medidas podem ser tomadas. Umas das soluções possíveis é o aumento da razão entre o comprimento de onda e o tamanho médio de grão (reduzindo, assim, o ruído de origem microestrutural). Isso pode ser realizado através de refino de grão (através de tratamento térmico) ou através da diminuição da freqüência utilizada para excitar o material. Essas duas técnicas podem ser utilizadas concomitantemente, mas podem existir algumas limitações quanto ao seu uso. O refino de grão pode ser inviável tanto econômica quanto tecnicamente, enquanto a seleção de menores freqüências (e consequentemente comprimentos de onda maiores) diminui a sensibilidade do ensaio, aumentando o tamanho mínimo de descontinuidade detectável, além de reduzir a resolução do ensaio tanto axial (pulsos mais longos) quanto transversalmente (feixes mais divergentes).





Transdutores altamente amortizados, ou de banda larga, podem reduzir a amplitude do ruído, mas limitam o alcance do ensaio, uma vez que os pulsos amortizados possuem baixa energia.

A utilização de transdutores angulares em materiais que possuam orientação preferencial dos grãos também é possível, fazendo-se a excitação segundo a direção de menor coeficiente de espalhamento. Esses transdutores emitem, junto com as ondas longitudinais, um feixe de ondas transversais devido à conversão de modo. Como, para iguais freqüências, as ondas longitudinais têm comprimentos de onda maiores do que as

transversais, dá-se preferência ao seu uso em detrimento dessas últimas. A única restrição ao uso destes transdutores é que a incidência das ondas longitudinais seja direta, sem que possa haver a reflexão em outras superfícies antes que o feixe atinja a falha (figura 2.2). Dessa forma evita-se a conversão de modo que ocorre quando a onda longitudinal é refletida.



Figura 2.2 – Transdutor angular de ondas longitudinais. A conversão de modo ocorre quando a onda é refletida pela superfície oposta [14].

A relação sinal-ruído pode ser melhorada, também, através da utilização de feixes fisicamente focalizados através de lentes acústicas [10,16].

Mesmo após tomadas as medidas acima descritas, ainda existirão casos nos quais a relação sinal-ruído não permitirá a realização do ensaio ultra-sônico. Pode-se, nesses casos, aplicar-se alguma técnica de processamento digital de sinais. Essas técnicas possuem algumas desvantagens inerentes pois requerem tempo de processamento, equipamentos específicos e o desenvolvimento de "softwares". Apesar disso, com a crescente capacidade de processamento dos computadores e com a redução do custo dos mesmos, essas técnicas têm experimentado um grande avanço, e suas aplicações têm se tornado mais freqüentes a cada dia.

2.3 Resolução do feixe sônico

O feixe sônico possui limitações em sua resolução tanto na direção axial (ao longo do comprimento do feixe), quanto transversal (ao longo da largura do feixe) [7,17].

A resolução axial é uma medida da capacidade do instrumento em separar os ecos provenientes de refletores que estejam próximos ao longo da direção do feixe do ultra-som, e é governada basicamente pelo comprimento do pulso transmitido (figura 2.3). A distância entre os refletores que podem ser separados pelo equipamento é uma medida da resolução.



Figura 2.3 – Resolução axial: (a) separação do refletor, (b) sinal recebido, (c) mostrador do a-scan [17].

A resolução lateral é governada pela largura do feixe. O instrumento mostrará o eco de uma determinada estrutura que esteja dentro do campo atingido pelo feixe sônico como se a mesma estivesse no eixo principal do feixe [18] (figura 2.4).



Figura 2.4 – Formação de uma imagem de b-scan (b) de um pequeno refletor durante uma varredura linear (a).

Como a largura do feixe sônico é dependente da profundidade (devido à divergência), a resolução transversal também o será.

2.4 Automatização dos ensaios

A automatização dos ensaios (não somente dos ensaios ultra-sônicos, mas também de outros ensaios não destrutivos) possui vantagens e desvantagens [2,19].

Entre as maiores vantagens encontra-se a reprodutibilidade dos resultados. A sensibilidade de um sistema automatizado de varredura, de uma forma geral, pode ser um pouco inferior à sensibilidade de um operador experiente, mas, associado a um processamento de sinais, aquele pode obter um desempenho muito superior com uma reprodutibilidade de praticamente 100% (ao contrário do ensaio conduzido pelo operador, que possui uma reprodutibilidade pobre [19]).

Uma outra vantagem importante é a redução do tempo de inspeção, uma vez que o sistema automatizado pode realizar uma varredura com velocidade até 200 vezes superior à velocidade de varredura manual, podendo ainda eliminar a possibilidade de sobreposição de áreas investigadas, ou a existência de áreas que não foram investigadas.

Entre as desvantagens, no entanto, podemos destacar o custo de implementação dos sistemas de varredura e a sua complexidade. Apesar disso a automatização dos ensaios vêm experimentando um crescimento ao longo dos últimos anos, e esse fato tem impulsionado ainda mais o desenvolvimento das técnicas de pós-processamento de dados.

2.5 Digitalização de sinais

Os dados são adquiridos pelo aparelho de ultra-som através dos transdutores, que convertem a energia mecânica de uma vibração em um sinal elétrico. O sinal possui uma forma contínua (figura 2.5), e a sua conversão dessa forma analógica para a forma digital é necessária antes que seja feito o seu processamento por um computador [1,20-23]. A conversão de um sinal analógico para um digital é obtida fazendo-se uma amostragem do primeiro em intervalos discretos de tempo, seguida de uma quantização dos valores e o conseqüente armazenamento das amplitudes dos pontos amostrados (figura 2.6).



Figura 2.5 – Diferenças entre um sinal analógico e um sinal digital [22]



Figura 2.6 – Processo de conversão de um sinal analógico para digital [22]

A amostragem de um sinal é matematicamente descrita pela seguinte equação:

$$s[n] = \sum_{n=-\infty}^{\infty} s(t)\delta(t-nT)$$
⁽¹⁾

Onde: s[n] é o sinal discreto no tempo

s(t) é o sinal analógico

T é o intervalo de amostragem

 δ é a função de amostragem unitária, $\delta(0)=1$

δ(≠0)=0

A digitalização converte, então, um sinal contínuo no tempo em um sinal discreto, onde a resolução desses valores é dependente do número de bits que são reservados para cada um deles. São possíveis 2ⁿ valores distintos para um conversor de n-bits (ex. para a representação utilizando 8 bits, existem 256 valores possíveis).

De outra forma, a transformação para o domínio da freqüência de um sinal digitalizado possui particularidades importantes. A transformada de Fourier de um sinal digital obtido a partir de um sinal analógico pode ser dada pela seguinte equação:

$$S^{*}(f) = \frac{1}{T} \sum_{m = -\infty}^{\infty} S(f - m.f_{s})$$
⁽²⁾

Onde: $f_s=1/T$, sendo T o intervalo de amostragem

S(f) a transformada de Fourier da função analógica s(t)

S^{*}(f) a transformada de Fourier da função digital s[n]

A transformada discreta de Fourier é uma réplica periódica da transformada analógica com uma freqüência de separação F=1/T. Dois casos especiais devem ser considerados: para $F>2f_m$ (figura 2.7) não ocorre sobreposição, e para $F<2f_m$ existe sobreposição dos espectros adjacentes, fenômeno que é conhecido como "aliasing".



Figura 2.7 – (a) sinal digitalizado; (b) F>2f_m: não ocorre "aliasing";
(c) F<2f_m: sobreposição dos espectros adjacentes [1].

A freqüência limite de amostragem $F_n=2f_m$, acima da qual não ocorre "aliasing", é conhecida como freqüência de Nyquist. Se essa condição for satisfeita, o sinal original pode facilmente ser reconstruído a partir de seu formato discreto aplicando-se um filtro passa baixa como ilustrado na figura 2.8.

Uma conseqüência desse teorema de amostragem é que as técnicas digitais não podem ser rigorosamente aplicadas em sinais que não sejam limitados em banda, pois o "aliasing" ocorrerá independentemente do quão curto sejam os períodos de amostragem.



Figura 2.8 – Filtro passa baixa aplicado para reconstituir o sinal original [1].

O processo que converte a seqüência de amplitudes amostradas em uma série de valores discretos é conhecido como quantização. Esse processo consiste em uma aproximação, uma vez que o sinal original pode assumir um número infinito de estados, enquanto o número de bits da representação digital limita o número de estados possíveis (figura 2.9)[20].



Figura 2.9 – Exemplo de quantização de uma função analógica

Tanto a amostragem quanto a quantização introduzem distorções no sinal contínuo tratado.

2.6 Processamento de sinais digitais

Haja vista as já citadas dificuldades para a localização e dimensionamento de descontinuidades, a necessidade de aumento da relação sinal ruído e de resolução do feixe sônico, e como conseqüência quase imediata da crescente automatização dos ensaios e do avanço da ciência de computação, o processamento de sinais digitais ("Digital Signal Processing" - DSP) vem experimentando um crescimento contínuo e conquistando espaços cada vez maiores para sua aplicação na indústria e em pesquisa [15,24].

DSP é um termo largamente empregado na engenharia e, de uma forma geral, pode ser descrito como uma transformação convertendo os dados do sinal em informações úteis, utilizando para isso computadores digitais. Uma análise da literatura de END atual revela que muitos problemas dessa área estão sendo resolvidos pela aplicação de DSP. Pode-se visualizar através dessa análise, também, que os maiores objetivos para a aplicação de DSP estão claramente definidos [24]. São eles:

- melhorar a confiabilidade da inspeção;
- melhorar a capacidade de detecção de descontinuidades;
- melhorar a caracterização de descontinuidades;
- gerar informações de valor para a determinação da vida remanescente de estruturas (por exemplo, as propriedades mecânicas de um material);
- gerar informações sobre processos. Por exemplo, processos de cura de materiais compósitos, solda e corte por chama, etc.

Diversas são as técnicas atualmente aplicadas no DSP de dados de END. Serão apresentadas aqui algumas das principais técnicas atualmente utilizadas para o processamento de dados de ultra-som. São elas: análise espectral, processamento de espectro fracionado (SSP), deconvolução, filtragem de freqüências ("block filtering"), lógica nebulosa ("fuzzy") e redes neurais artificiais (ANN), e a técnica de focalização por abertura sintética (SAFT).

Existem, no entanto, outras técnicas de processamento que têm se revelado bastante promissoras. Entre elas podemos citar a técnica de filtragem adaptativa ("adaptive filtering technique") e as "wavelets" entre outras, mas essas técnicas não serão aqui descritas.

2.6.1 Análise Espectral

Denomina-se comumente como análise espectral a análise do sinal ultra-sônico no domínio da freqüência. O objetivo dessa análise é permitir uma melhor avaliação dos fenômenos de natureza física que ocorrem quando da interação das ondas ultra-sônicas com a microestrutura do material. Ela deve ser vista como uma análise complementar à análise convencional, já que se propõe a resolver problemas para os quais a análise convencional se mostra pouco adequada, como na análise de: descontinuidades de dimensões reduzidas, descontinuidades mal orientadas em relação ao feixe ultra-sônico ou ainda localizadas próximas demais de alguma interface, e de materiais policristalinos de granulação grosseira, que geram um ruído de fundo demasiadamente elevado [6,7,22,23,25-27].

A análise espectral consiste na passagem do sinal do ultra-som do domínio do tempo para o domínio da freqüência, utilizando para isso a transformada de Fourier. Uma vez realizada essa transformação, espera-se que seja possível separar em grupos distintos os espectros obtidos para os diversos sinais. Cada grupo de espectros deverá carregar a informação da interação do feixe com um determinado tipo de descontinuidade, ou deverá descrever uma determinada característica ou propriedade do material.

De fato, grande parte das técnicas de processamento de sinais confia na conversão do sinal para o domínio da freqüência, mas utilizam concomitantemente outras técnicas para realizar a análise do espectro obtido. São exemplos dessas técnicas o processamento de espectro fracionado (SSP), a deconvolução, a filtragem de freqüências ("block filtering"), e algumas técnicas de reconhecimento de padrões, geralmente executadas por redes de neurônios artificiais (ANN). Os fundamentos dessas técnicas serão brevemente descritos nos itens seguintes.

Existem atualmente várias técnicas que empregam a análise de freqüências para a detecção de descontinuidades de dimensões reduzidas. Entre elas podemos destacar algumas, que serão descritas a seguir [26].

A. Análise das freqüências de interferência

A ocorrência de pontos de interferência no espectro de distribuição de freqüências está relacionada à presença de uma ou mais regiões no interior do material em inspeção que possuam impedâncias acústicas diferentes da do meio, possibilitando a reflexão das ondas ultra-sônicas. Conhecendo-se o comprimento de onda correspondente ao valor da freqüência para o qual o fenômeno de interferência ocorre, pode-se estimar a dimensão da descontinuidade responsável pelo efeito. Essa técnica, no entanto, possui limitações na precisão do cálculo, além de apresentar dificuldades na determinação da posição da descontinuidade.

B. Análise da curva de densidade espectral

Essa análise é geralmente aplicada quando não é possível se identificar de maneira clara as freqüências nas quais a interferência ocorre. A transformada de Fourier permite calcular a distribuição das amplitudes dos diferentes harmônicos, que constituem um determinado sinal. Pode-se calcular, também, a distribuição de energia no domínio da freqüência, isto é, o quadrado da amplitude. Essa função, definida como de densidade espectral, pode refletir a influência do efeito dos danos do material sobre o espectro.

C. Utilização de dois transdutores

Quando o ângulo do plano que contém a descontinuidade em relação ao feixe não for conhecido, a análise das freqüências de interferência não pode ser realizada. Uma solução relativamente simples consiste em trabalhar com dois transdutores, sendo um emissor fixo e um receptor que gira no plano definido pelos transdutores e pela amostra. O intervalo entre dois valores de amplitude máxima de freqüência consecutivos é dependente, entre outros parâmetros, do ângulo entre a descontinuidade e os transdutores, além do ângulo entre e os transdutores.

D. Análise matemática do sinal

Em determinados casos é preciso se fazer uma análise matemática do sinal. Para isso utiliza-se algumas funções matemáticas que serão brevemente descritas aqui. São elas: correlação, auto-correlação, convolução e deconvolução.

Chama-se correlação o resultado de uma comparação entre sinais correspondentes a funções diferentes, e auto-correlação quando se trata do mesmo sinal. Pode-se, dessa forma, obter informações sobre o comportamento periódico do sinal. Para isso executam-se medidas da amplitude do sinal para dois tempos separados por um intervalo τ , calcula-se seu produto e faz-se a média sobre o intervalo medido [20].

Matematicamente tem-se:

$$corr(g,h) = \int_{-\infty}^{\infty} g(t) h(t-\tau) d\tau$$
(3)

para a correlação entre duas funções g(t) e h(t). Para a auto-correlação tem-se:

$$autocorr(g) = \int_{-\infty}^{\infty} g(t) g(t - \tau) d\tau$$
(4)

Pode ser demonstrado que:

$$corr(g,h) = G(f).H(f)$$
(5)

isto é, a correlação entre duas funções g(t) e h(t) pode ser obtida multiplicando-se a transformada de Fourier G(f) pelo complexo conjugado $\overline{H}(f)$ da transformada de Fourier H(f), respectivamente das funções g(t) e h(t).

Na figura 2.10 está ilustrada uma interpretação gráfica do produto de correlação [73]. Trata-se de duas funções diferentes cujo produto será a função de correlação. Procedese inicialmente uma mudança de variável de (t) para (τ). Em seguida a função h(τ) e deslocada de (-t) e multiplicada por $g(\tau)$. O produto $h(\tau).g(\tau-t)$ é representado pela área hachurada da figura (2.10-c). Após integração obtém-se uma função z(t)=corr(g,h) que é função do tempo (t).



Figura 2.10 – Procedimento gráfico da transformada de correlação [26]

O produto de convolução de duas funções g(t) e h(t) é dado por:

$$g^*h = \int_{-\infty}^{\infty} g(\tau)h(t-\tau)d\tau$$
(6)

Ou ainda, o produto de convolução pode ser dado por:

$$g^*h = G(f).H(f) \tag{7}$$

Isto é, ele pode ser obtido pelo produto da transformada de Fourier G(f) e H(f) das funções g(t) e h(t), respectivamente.

Graficamente o produto de convolução está representado na figura 2.11, sendo semelhante ao produto de correlação. A única diferença é que, antes de deslocar a função h(t), toma-se o seu simétrico em relação ao eixo vertical.



Figura 2.11 – Procedimento gráfico do produto de convolução [26]

Maiores detalhes sobre o uso da convolução no tratamento do sinal serão dados posteriormente no subitem 2.6.3 desta proposta.

2.6.2 Processamento de Espectro Fracionado – "Split Spectrum Processing" (SSP)

Entre os fenômenos que influem negativamente na qualidade da resposta de um ensaio ultra-sônico se encontra o ruído microestrutural. A energia do feixe ultra-sônico é espalhada na microestrutura, gerando ecos espúrios que podem possuir magnitudes até maiores do que o eco produzido por uma falha interna. Esse espalhamento microestrutural é causado, principalmente, pela anisotropia elástica [14].

O ruído microestrutural, por si só, não é um fator limitante para a inspeção na maioria das ligas. Isso se deve à forte dependência que o coeficiente de espalhamento possui da razão entre o comprimento de onda e o tamanho de grão. Para aços com tamanho médio de grão de 1/100 do comprimento de onda o espalhamento é desprezível. Quando essa relação se aproxima de 1/10 do comprimento de onda podem ocorrer fenômenos de difração, e o teste ultra-sônico começa a se tornar inviável.

Ao se fixar a freqüência do pulso utilizado no ensaio e a posição do transdutor, a energia retroespalhada será invariante no tempo. Se for realizada uma mudança na freqüência de excitação ou na posição do transdutor, no entanto, essa energia experimentará uma alteração. A forma do ruído microestrutural será dependente das freqüências presentes no sinal, e, como conseqüência disso, sinais com conteúdos distintos de freqüência tomados de um mesmo ponto apresentarão distintas formas de onda correspondentes ao ruído. O eco correspondente a uma descontinuidade, ao contrário, apresentará uma coincidência de picos para os diferentes conteúdos de freqüência.

O SSP deriva todo o conjunto espectralmente diverso de um único sinal de banda larga, passando-o através de uma série de filtros passa-banda paralelos, cujas freqüências centrais sejam crescentes e que possuam larguras constantes. Esse procedimento é ilustrado na figura 2.12, a qual contém um esquema geral do modelo, além da definição dos parâmetros do SSP: *B* é o espectro útil ao SSP, Δf é a separação ótima entre os filtros a serem utilizados, e *b* é a largura de banda de cada filtro aplicado.



Figura 2.12 – Esquema geral e definição dos parâmetros do SSP: B é o espectro útil ao SSP, Δf é a separação ótima entre os filtros a serem utilizados, e b é a largura de banda de cada filtro aplicado [14].

É realizada uma interferência, então, desses espectros assim obtidos para cada uma das seções do espectro original, aumentando-se, dessa forma, a relação sinal-ruído no sinal de correlação final [7,14,25].

2.6.3 Deconvolução

Um sistema ultra-sônico, constituído por transdutor, aparelhos, materiais, sinais emitidos e refletidos, pode ser representado pelo seguinte esquema [26]:

$$g(t) \rightarrow h(t) \rightarrow F(t)$$

sendo g(t) a função que representa o sinal gerado pelo sistema e que chega ao material. A função F(t) corresponde ao sinal refletido, ou seja, à resposta impulsional do material à excitação g(t). A função h(t) é a função de transferência do material, que leva em conta a quantidade de energia transferida, a um valor fixo de freqüência, entre g(t) e F(t). Em um sistema linear invariante no tempo, tem-se:

$$F(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t - \tau) g(\tau) d\tau$$
(8)

Isto quer dizer que a convolução do sinal de excitação e da função de transferência conduz à função do sinal resposta do sistema. Sendo a convolução o produto de funções correspondentes às transformadas de Fourier, temos:

$$F(f) = H(f).G(f) \tag{9}$$

ou

$$H(f) = F(f)/G(f) \tag{10}$$

isto é, tomando-se a transformada de Fourier inversa dessa relação obtém-se o produto de deconvolução, ou seja, a função h(t), que representa a resposta do material no domínio do tempo.

Diversos são os algoritmos que têm sido utilizados para executar a deconvolução, mas os objetivos da técnica, que são aumentar a resolução e melhorar a qualidade das imagens ultra-sônicas, se mantém [28,29,30].

2.6.4 Filtragem de Freqüências - "Block Filtering"

O objetivo da filtragem de freqüências é separar o conteúdo do sinal em bandas estreitas de freqüência, permitindo a amplificação e o processamento de diferentes comprimentos de onda independentemente [29,31].

É sabido que quanto mais estreito o feixe sônico, maior é a resolução lateral da imagem de c-scan (imagem obtida por uma varredura bidimensional do transdutor – ver apêndice A deste trabalho). A largura do feixe no campo distante é dependente do ângulo de divergência (θ), que é uma função da freqüência e do diâmetro do transdutor. Um transdutor de elevada freqüência poderia ser utilizado para produzir um feixe estreito, aumentando assim a resolução lateral [2].

$$\theta = \arcsin\left(0.61\frac{\lambda}{d}\right) \tag{11}$$

onde d é o diâmetro do transdutor e λ é o comprimento de onda.

Esse método por si só, no entanto, apresenta algumas limitações. O fato é que o eco que retorna pode estar contaminado por componentes de baixa freqüência, uma vez que os componentes de mais alta freqüência são atenuados muito mais rapidamente que os de baixa freqüência. O coeficiente de atenuação *a* para aços em função da freqüência, tamanho de grão e anisotropia é dado por Mason e McSkimin [31] como:

$$a = C_1 f + C_2 A D^3 f^4 \tag{12}$$

onde f é a freqüência, D é o tamanho de grão, A é relacionado à anisotropia e C₁ e C₂ são constantes.

Para resolver esse problema, um filtro passa banda no domínio da freqüência, conhecido como filtro de bloco ("block filter"), tem sido utilizado para remover os componentes de baixa freqüência dominantes nos ecos recebidos, sendo o sinal filtrado sendo então utilizado para construir uma imagem c-scan. Dessa forma a largura efetiva do feixe é reduzida, e a resolução lateral é melhorada.

2.6.5 Redes Neurais Artificiais ("Artificial Neural Network" –ANN) e Lógica Nebulosa ("Fuzzy Logic")

As redes neurais consistem de algoritmos que tentam modelar algumas funções do cérebro tais como reconhecimento de padrões, criação de associações e aprendizado com experiência ou treinamento. Muitas destas tarefas, que na maioria das vezes passam desapercebidas, são realizadas rotineiramente pelo ser humano. Quando está no trânsito e olha para o semáforo, o homem distingue com facilidade a informação contida neste e o procedimento a seguir. Quando observa uma fotografía, consegue identificar com precisão as pessoas presentes, bastando somente que já as tenha visto (mesmo por poucas vezes) previamente, embora possam estar com roupas, cabelos e em posições diferentes. Estas pequenas tarefas, como outras mais, parecem triviais para os seres humanos, mas são extremamente complexas suas implementações computacionais. Isto pode estar relacionado ao fato de se considerar o cérebro como um computador altamente paralelo com bilhões de unidades processadoras (neurônios), que embora realizem operações simples sozinhas, tem grande poder quando trabalham simultaneamente.

Embora sejam muito menos complexas que o cérebro humano, as redes neurais tem a capacidade de processar grandes quantidades de dados que normalmente só poderiam ser analisados por um especialista. O treinamento ou aprendizado da rede a partir de exemplos, tal como o cérebro humano, é uma de suas mais importantes características. Durante a fase de aprendizado, a própria rede modifica suas conexões (sinapses) entre os elementos (neurônios) de modo que se crie uma relação entre entradas e saídas.

As principais aplicações de redes neurais são em simuladores, controladores, classificadores, reconhecimento de padrões, filtragem não linear, dentre outros [32].

As redes neurais tem sido aplicadas nos dados obtidos por ultra-som para classificar descontinuidades e para estimar a profundidades dos mesmos [6,13,33,34]. A substituição da interpretação humana da resposta obtida pelo ensaio de ultra-som pela interpretação de um sistema de inteligência artificial (AI) ainda é, no entanto, controversa [35].

2.7 SAFT

2.7.1 Considerações gerais sobre a técnica

O SAFT consiste em um processo no qual as propriedades focais de um transdutor focalizado de grande abertura são reproduzidas, ou sintetizadas, por uma série de medidas realizadas utilizando-se um transdutor de pequena abertura que tenha sido varrido sobre uma grande área. Em outras palavras, o processamento do SAFT consiste em simular um transdutor focalizado [38].

Para a aquisição de dados típica utilizada para SAFT, tanto um transdutor focalizado pode ser posicionado com o ponto focal na superfície da parte a ser varrida, quanto um transdutor de contato pode ser utilizado. Essas duas configurações simulam uma fonte/receptor pontual, a partir do qual um feixe largo e divergente é emitido em direção ao objeto a ser varrido [55]. À medida que o transdutor é varrido por sobre a superfície do objeto, um conjunto de a-scans é gravado (um para cada posição do transdutor). Cada refletor produz uma coleção de ecos nos a-scans gravados, produzindo uma curva hiperbólica característica. O ápex e a curvatura da hipérbole são completamente determinados pela profundidade do refletor dentro do objeto testado (figura 2.13).

Essa relação entre a localização do eco nos a-scans gravados e a posição do refletor dentro do objeto testado torna possível reconstruir uma imagem processada a partir dos dados originais através de um somatório coerente, que leva em consideração as diferenças de percurso do feixe sônico [38].

Esse somatório coerente, detalhado no item 2.7.4 deste trabalho, é realizado para cada a-scan contido na varredura. Nas regiões da peça investigada que contém descontinuidades, os a-scans obtidos experimentarão uma interferência construtiva do componente do espectro relativo ao eco refletido pela descontinuidade, e uma interferência destrutiva do componente do espectro relativo ao ruído. Nas regiões da peça investigada que não contém descontinuidades, os a-scans experimentarão uma interferência destrutiva para todos os componentes do espectro.



Figura 2.13 – Hipérboles formadas na imagem de b-scan devido à presença de descontinuidades

2.7.2 A evolução da técnica

A aplicação da técnica de focalização por abertura sintética (SAFT) em ultra-som derivou-se da experiência de Prine em radares [36,37]. Ela fora primeiramente aplicada com o objetivo de melhorar a resolução lateral dos sistemas de mapeamento por radares instalados em aviões, onde os mesmos eram utilizados para realizar uma varredura da antena sobre uma área maior. Essa técnica permitiu que fosse sintetizada uma abertura efetiva maior, e consequentemente se melhorasse a resolução.

A primeira implementação digital do SAFT em ultra-som foi desenvolvida na Universidade de Michigan [38]. Pulsos com banda larga, gravação direta dos dados e um somatório coerente foram utilizados para demonstrar a aplicabilidade do SAFT digital e, com a melhora da resolução lateral em relação aos outros ensaios não destrutivos, obter-se uma melhor avaliação do tamanho, localização e orientação de descontinuidades. O SAFT linear (L-SAFT) foi implementado em um computador pessoal (PC) por Schmitz [37], que obteve vistas reconstruídas bidimensionais (b-scans). Desde 1990 instituições de pesquisa utilizam inúmeros algoritmos de SAFT em diferentes versões, como: 2D, 3D, no domínio do tempo, no domínio da freqüência, em pulso-eco, em arranjo tandem, entre outros [18,30,36,39-54].

Diversos trabalhos que tratam temas como processamento de sinais e melhora na localização e dimensionamento de descontinuidades sugerem o SAFT como algoritmo de processamento, tornando-o um dos assuntos mais pesquisados nos últimos anos na área de pós-processamento de sinais digitais [1,4,6,15,21,24].

2.7.3 Características especiais do SAFT

A. Resolução lateral

Uma característica notável do processamento pelo SAFT diz respeito à resolução lateral do feixe da abertura sintetizada. Isso pode ser observado na figura 2.14, onde uma abertura sintetizada formada por 5 espectros consecutivos está representada. Em relação ao espectro central (P_0), três áreas podem ser identificadas ao longo da profundidade do feixe. Na área 1 apenas o feixe central é portador de "informações" em relação à peça testada naquela região. Nessa profundidade não existe abertura a ser sintetizada.

Na área 2 pode ser visto que os espectros imediatamente adjacentes ao central ($P_{-1} e P_{+1}$) são portadores de "informações" em relação à peça investigada naquela região. A abertura sintetizada para essa área corresponde à distância entre o primeiro e o último espectro de interesse (de P_{-1} a P_{+1} , ou seja, duas vezes a distância entre aquisições ao longo do eixo da varredura).

O mesmo é válido para a área 3, cuja abertura sintetizada será de quatro vezes a distância entre aquisições ao longo do eixo da varredura (equivalente à distância entre P_{-2} e P_{+2}).

Quando se realizam as interações dos espectros (para cada profundidade separadamente, dependendo do tamanho da abertura sintetizada) se observará que apenas ocorrerá interferência construtiva para as descontinuidades localizadas em alguma das áreas marcadas em negrito (áreas 1, 2 e 3). Quaisquer descontinuidades localizadas fora dessas regiões experimentarão uma interferência destrutiva, por estarem sendo interagidos espectros que contém informações sobre a descontinuidade, com espectros que não contém.

Pode ser observado que isso conduz intuitivamente a uma largura de feixe resultante menor, e que não depende da profundidade. No caso da figura 2.14 essa largura corresponderia à diagonal menor dos losangos em negrito. Essa medida é equivalente à distância entre aquisições ao longo do eixo da varredura.



Figura 2.14 - Resolução lateral obtida por uma abertura sintetizada formada por 5 espectros consecutivos.

Isso pode conduzir à idéia de que o feixe resultante será tanto mais estreito quanto menor a distância entre aquisições, conforme demonstrado na figura 2.15. As áreas identificadas nessa figura são semelhantes às identificadas na figura 2.14, porém as interações serão executadas, para as regiões mais profundas, com um maior número de espectros adjacentes.


Figura 2.15 - Resolução lateral obtida por uma abertura sintetizada resultante de uma varredura com distância pequena entre aquisições.

Existe, contudo, uma limitação para essa resolução lateral. Essa limitação foi demonstrada por Cutrona [37,54], que revela que a resolução do SAFT é independente da freqüência do ultra-som, sendo relacionada ao tamanho físico da transdutor com o qual será feita a varredura. A relação que determina a resolução lateral obtida por Cutrona é a seguinte:

$$\delta = \frac{D}{2} \tag{13}$$

sendo D o diâmetro do transdutor.

Isso indica que a resolução é independente do comprimento de onda e da profundidade, e que a mesma melhora se o diâmetro do transdutor for pequeno.

B. Relação sinal-ruído

A técnica de processamento do SAFT gera uma melhora da relação sinal-ruído proporcional à raiz quadrada do número de posições independentes do transdutor utilizadas na abertura sintética [37,54]. Sob condições favoráveis uma melhora de até 20 dB pode ser obtida, e sinais que antes estavam comprometidos devido ao ruído podem ser reconstituídos e utilizados na detecção de descontinuidades que de outra forma não seriam distinguíveis.

C. Acuidade de localização

O processamento pelo SAFT melhora a resolução lateral e aumenta a relação sinalruído das imagens obtidas, mas também é essencial prover o sistema de confiabilidade no que diz respeito ao exato posicionamento da descontinuidade em relação às superfícies do componente ou em relação a uma solda [37]. Nas técnicas de inspeção de contato controladas remotamente, o ângulo nominal de excitação do transdutor angular é utilizado. Para se evitar um posicionamento errado de uma descontinuidade em uma imagem b-scan, o ângulo de excitação real é verificado utilizando-se um bloco de teste adequado. Componentes industriais reais, no entanto, não possuem sempre superfícies suaves, e o transdutor pode ter seu direcionamento alterado devido a essas irregularidades. O SAFT para transdutores angulares não utiliza o ângulo nominal de excitação, e, devido à correção de posicionamento das amplitudes de acordo com o tempo de percurso, depende somente do conhecimento exato da velocidade de propagação do campo sonoro.

2.7.4 L-SAFT

Nesse modelo o foco do transdutor ultra-sônico é considerado como sendo um ponto de fase constante, no qual todos os "raios" de ultra-som passam antes de divergirem em um cone cujo ângulo é determinado pelo diâmetro do transdutor e distância do foco (figura 2.16).



Figura 2.16 – Foco do transdutor utilizado pelo L-SAFT: (a) Transdutor de imersão; (b) Transdutor de contato.

Se um refletor está localizado abaixo do ponto focal e dentro do cone, pode-se calcular o comprimento do percurso e o tempo de trânsito para um sinal trafegando ao longo do "raio". A espessura do cone a uma dada distância determina a largura da abertura que pode ser sintetizada, e o percurso que o sinal deve percorrer corresponde ao deslocamento de fase visto no sinal para aquela posição do transdutor. Com essa informação pode-se realizar uma correção nos dados, que incorporam então as vantagens de uma abertura sintética maior do transdutor [18,38,45,55].

Na figura 2.17 pode-se ver esquematicamente o transdutor localizado na posição x_1 e uma frente de onda que atravessa a posição da descontinuidade localizada em uma posição x_2 , a uma profundidade d₂ da superfície.



Figura 2.17 – Espessura do feixe sônico, ilustrando a posição do transdutor x₁ e a posição da descontinuidade x₂.

Esse efeito da espessura do feixe sônico causa uma distorção na imagem obtida na imagem de b-scan, conforme ilustrado na figura 2.18.



Figura 2.18 – Imagem distorcida resultante da espessura do feixe sônico durante o b-scan. A descontinuidade está localizado em (x_2,d_2) .

Na figura 2.19 pode-se visualizar uma imagem esquemática dos a-scans que poderiam gerar a imagem ilustrada na figura 2.18.



Figura 2.19 – Imagem esquemática dos a-scans que formaram a figura 2.18.

Sinais de posições adjacentes (que determinam a abertura) são, então, deslocados segundo um modelo geométrico que considera a diferença de percurso entre eles, sendo então somados ao sinal central. Se o sinal central estiver localizado sobre a descontinuidade, o resultado será um reforço do sinal original. Se o sinal central estiver deslocado em relação à descontinuidade, o resultado será uma correlação pobre. Esse fenômeno está ilustrado nas figuras 2.20 e 2.21.



centrada sobre a descontinuidade

O sinal é maior e o tempo de percurso é menor para o sinal central (x=0,0mm, figura 2.20), que corresponde ao eco quando o transdutor está localizado diretamente sobre a descontinuidade. À medida que o transdutor se move para as posições adjacentes à posição central, a amplitude do eco diminui, bem como o tempo de percurso aumenta. No procedimento de correlação os a-scans são deslocados de acordo com a diferença de percurso calculada para cada ponto. Na figura 2.20 o transdutor está localizado sobre a descontinuidade, o que faz com que os a-scans se alinhem construtivamente, gerando um sinal combinado de amplitude elevada.

Na figura 2.21 o procedimento se repete. Nesse caso, porém, a descontinuidade não está localizada diretamente sob o transdutor. A correlação obtida nesse caso possui uma menor amplitude quando comparada ao caso anterior.



Figura 2.21 – Somatório para uma abertura sintética deslocada em relação ao centro da descontinuidade

O modelo geométrico utilizado funciona para três dimensões, mas no caso do L-SAFT ele é restrito a somente duas dimensões. Considerando a figura 2.17, a distância d_1 é onde o eco da descontinuidade na posição x_2 aparece na quando o transdutor está localizado na posição x_1 . A distância verdadeira (d₂) que será utilizada na sobreposição do espectro pode ser calculada pela relação (figura 2.22)

$$d_2 = \sqrt{d_1^2 - (x_2 - x_1)^2}$$



Figura 2.22 – Modelo geométrico para a determinação da diferença de percurso entre os pontos x₁ e x₂

ou de forma mais genérica

$$d_{v} = \sqrt{d_{m}^{2} - (x_{p} - x_{l})^{2}}$$
(17)

onde x_p é a posição do a-scan central, em torno do qual está sendo aplicado a focalização x_L é a posição de um a-scan próximo ao x_p d_m é a distância entre o transdutor localizado em x_p e a descontinuidade localizada

 $em x_L$

d_v é a distância utilizada para se realizar a sobreposição dos espectros.

A utilização dessa equação permite eliminar ou ao menos minimizar os efeitos da espessura do feixe sônico sobre as imagens de b-scan e c-scan. Para se utilizar essa técnica deve-se calcular, para cada linha da imagem, então, a posição na qual o sinal deveria estar contido dentro dos a-scans adjacentes, fazendo-se em seguida a correlação entre os mesmos. Na prática deve-se determinar o número de a-scans que serão utilizados, haja vista a abertura do feixe do transdutor ser dependente da profundidade.

2.7.5 F-SAFT

A literatura sobre a focalização por abertura sintética tem se voltado ultimamente para a reconstrução de imagens através de técnicas no domínio da freqüência (F-SAFT).

Como foi visto, a implementação do L-SAFT é calcada num processo de "atraso e soma" no domínio do tempo para reforçar o sinal original. Essa estratégia, no entanto, requer um alto custo ocupacional de computação para os equipamentos comuns.

Nos últimos anos uma série de algoritmos de SAFT no domínio da freqüência (F-SAFT) vem sendo desenvolvidos com o intuito principal de diminuir o tempo de computação necessário [39,44,45,49,50,51,53]. O F-SAFT é uma extensão da técnica de espectro angular da teoria de difração escalar para a propagação de um determinado perfil de campo medido em um determinado plano para qualquer outro plano paralelo. O algoritmo de F-SAFT utiliza transformadas de Fourier, tanto temporais quanto espaciais, para executar eficientemente as correlações necessárias para a formação de imagens por SAFT no domínio da freqüência. Esse algoritmo, contudo, não foi objeto de estudo deste trabalho.

3.1. Determinação do feixe sônico

Para que seja implementado um algoritmo de SAFT Linear é preciso conhecer com precisão o feixe sônico emitido pelo transdutor a ser utilizado. Nesse trabalho foi utilizado o transdutor H2K, de imersão, da Krautkramer®. As informações básicas sobre esse transdutor podem ser visualizadas na tabela 1.

Tamanho do	10 mm	^ _
cristal	diâmetro	MTER - 80
Frequência	2 MHz	≷ – ∞ 2
Largura da	1 a 3 MHz	H 40
banda emitida		₩ - 20
Faixa de	14 a 77 mm	
operação		10mm
Comprimento	32 mm	
do campo		15 – 40 / 1
próximo		HA - 60
		8 E - 80
		V _100

Tabela 1 - Informações básicas sobre o transdutor H2K

As principais informações a serem obtidas sobre o feixe sônico são o comprimento do campo próximo, a largura do feixe no campo próximo e o ângulo de divergência no campo distante.

Uma vez determinadas essas grandezas, procura-se determinar o chamado "ponto emissor". Esse ponto, imaginário, serve de referência para a execução do SAFT, pois o algoritmo entenderá esse ponto como um novo ponto focal do transdutor, através do qual todos os "raios" de ultra-som passam antes de divergirem em um cone cujo ângulo é determinado pelas já citadas características do transdutor. A localização deste ponto imaginário, e a sua relação com as características do transdutor podem ser visualizados na figura 3.1.



Figura 3.1 – Localização do ponto emissor em relação ao feixe emitido por um transdutor de imersão

Existem diversas relações na literatura que procuram determinar as características geométricas do feixe emitido. Essas relações podem ser consultadas no Apêndice A deste trabalho. As mais relevantes para esse trabalho são as seguintes:

(a) Comprimento do campo próximo (cristal circular):

$$N = \frac{D_{ef}^2 \cdot f}{4V}$$

onde:

N = Campo próximo V = Velocidade da onda f = Freqüência $D_{ef} = \text{Diâmetro efetivo do cristal (} D_{ef} = 0,97 \text{ x O Diâmetro real)}$

(b) Ângulo de divergência (β):

$$\beta = sen^{-1}(\frac{0,61\lambda}{a})$$

onde:

a é o raio ativo do transdutor; λ é o comprimento de onda.

(c) Largura do feixe no ponto focal (para transdutores de imersão):

 $L = 0,2568 \times D$

onde D é o diâmetro do transdutor.

Essas relações foram utilizadas como base para o desenvolvimento do algoritmo de SAFT, sendo que um ajuste mais fino do posicionamento do ponto emissor foi executado posteriormente. Esse ajuste foi executado comparando-se as hipérboles teóricas (ver figura 2.13) esperadas para defeitos conhecidos que foram investigados, com as hipérboles encontradas nas imagens de b-scan obtidas durante a varredura desses defeitos. A construção dessas curvas teóricas e a comparação com os defeitos conhecidos serão detalhadas no item 4.1 deste trabalho.

3.2. Aquisição dos dados

Os dados que são alimentados no programa que realiza o processamento foram obtidos através de um sistema de varredura, controlado por um "software" desenvolvido pelo próprio Laboend, denominado NeoEnd. Esse programa, desenvolvido em linguagem Delphi ®, gerencia a aquisição dos dados e possibilita que os mesmos sejam visualizados na forma de a-scan, b-scan, c-scan ou d-scan.

O sistema de inspeção pode ser dividido nas seguintes partes:

- Aparelho de ultra-som (onde o transdutor está conectado);
- Computador tipo PC e programa de controle (gerencia a aquisição);
- Placa conversora A/D, Gage modelo CS-lite (conecta o aparelho de ultra-som ao computador);
- Sistema de varredura desenvolvido no Laboend.

O mesmo programa que controla a varredura exporta os dados para arquivos no formato ASCII. Esses arquivos serão finalmente lidos pelo programa que realizará o processamento.

3.3 Corpo de prova

Para se verificar a capacidade do programa em aumentar a resolução lateral do ensaio e melhorar a relação sinal-ruído nas imagens de b-scan, foi elaborado um corpo de prova conforme ilustrado na figura 3.2.



Figura 3.2 – Corpo de prova utilizado para validar o algoritmo desenvolvido

Esse corpo de prova atende a dois objetivos distintos. Os três furos que podem ser observados na face frontal (para fins de praticidade agora denominado de lado "a") se encontram a profundidades diferentes em relação à superfície (15, 30 e 45 mm), e objetivam comprovar que o programa é capaz de realizar a construção da abertura sintetizada para diversas profundidades, ao mesmo tempo em que também comprova que a resolução da técnica é independente da profundidade da descontinuidade investigada (ver subitem (a) do item 2.7.3 deste trabalho).

Foram feitos testes de reconstrução com a aquisição dos dados (varredura) sendo realizada tanto pela face superior quanto pela face inferior do corpo de prova. Foram

adotados diâmetros diferentes para as três descontinuidades (1, 2 e 5 mm de diâmetro) para que se verificasse a capacidade do programa em focalizar descontinuidades com respostas em amplitude distintas.

Essas varreduras foram realizadas nas condições listadas na Tabela 3.1. O campo *"média"* da tabela se refere ao fato de na varredura ter sido feita uma média de três aquisições consecutivas para se determinar a resposta de um único ponto.

	Superficie	Média	Número de pontos	Número de a-scans	Distância entre	Distância do transd.
		(S/N)	por a-scan	por imagem	aquisições (mm)	à superfície (mm)
1	Superior	S	1064	201	0,5	40
2	Superior	S	1064	201	0,5	30
3	Inferior	S	1064	201	0,5	30
4	Inferior	Ν	1064	201	0,5	30
5	Superior	Ν	1200	255	0,46	58
6	Superior	S	1200	255	0,46	58
7	Superior	S	1200	221	0,5	48
8	Superior	Ν	1200	221	0,5	48
9	Superior	Ν	1200	221	0,5	38
10	Superior	S	1200	221	0,5	38
11	Superior	S	1200	221	0,5	32
12	Superior	Ν	1200	221	0,5	32
13	Superior	Ν	1200	221	0,5	19
14	Superior	S	1200	221	0,5	19
15	Inferior	Ν	1200	221	0,5	56
16	Inferior	S	1200	221	0,5	56
17	Inferior	S	1200	221	0,5	47
18	Inferior	Ν	1200	221	0,5	47
19	Inferior	Ν	1200	221	0,5	35
20	Inferior	S	1200	221	0,5	35
21	Inferior	Ν	1200	221	0,5	25
22	Inferior	S	1200	221	0,5	25

Tabela 3.1 – Detalhes das varreduras realizadas no lado "a" do corpo de prova

Um exemplo típico das imagens obtidas por essas varreduras pode ser visto na Figura 3.3, que representa uma imagem b-scan do sinal não processado da varredura nº 4 da Tabela 3.1. Nessa figura pode ser observado como defeitos de pequena dimensão (1, 2 e 5 mm de diâmetro) parecem maiores devido à divergência do feixe no campo distante.



Figura 3.3 – Imagem de b-scan dos defeitos usinados no lado "a" do corpo de prova.

O segundo objetivo deste corpo de prova está representado pelos três pares de furos de 2mm de diâmetro que podem ser visualizados na face posterior do corpo de prova (para fins de praticidade agora denominada de lado "b" do corpo de prova). Essas descontinuidades foram introduzidas com espaçamento crescente entre os pares, de forma a se investigar a capacidade do algoritmo em resolver os ecos provenientes de cada descontinuidade individualmente. As varreduras para esse teste também foram realizadas pela face superior e pela face inferior do corpo de prova, conforme detalhado na Tabela 3.2.

	Superf.	Média	Número de pontos	Número de a-scans	Distância entre	Distância do transd.
	(sup/inf)	(S/N)	por a-scan	por imagem	aquisições (mm)	à superfície (mm)
23	Superior	N	1200	211	0,5	58
24	Superior	S	1200	211	0,5	58
25	Superior	Ν	1200	221	0,5	48
26	Superior	S	1200	221	0,5	48
27	Superior	Ν	1200	221	0,5	38
28	Superior	S	1200	221	0,5	38
29	Superior	S	1200	221	0,5	32
30	Superior	Ν	1200	221	0,5	32
31	Superior	Ν	1200	221	0,5	19
32	Superior	S	1200	221	0,5	19
33	Inferior	S	1200	221	0,5	56
34	Inferior	Ν	1200	221	0,5	56
35	Inferior	Ν	1200	221	0,5	47
36	Inferior	S	1200	221	0,5	47
37	Inferior	S	1200	221	0,5	35
38	Inferior	Ν	1200	221	0,5	35
39	Inferior	S	1200	221	0,5	25
40	Inferior	Ν	1200	221	0,5	25

Tabela 3.2 – Detalhes das varreduras realizadas no lado "b" do corpo de prova

Um exemplo típico das imagens obtidas por essas varreduras pode ser visto na Figura 3.4, que representa uma imagem b-scan do sinal não processado da varredura nº 8 da Tabela 3.2. Nessa figura pode ser observado como os defeitos não podem ser visualmente separados, devido à baixa resolução do feixe sônico no campo distante.



Figura 3.4 – Imagem de b-scan dos defeitos usinados no lado "b" do corpo de prova.

Todas as varreduras, tanto do lado "a" quanto do lado "b", foram executadas com uma freqüência de aquisição de 40 MHz.

Os arquivos das varreduras foram alterados para a realização de alguns testes no processamento executado pelo algoritmo desenvolvido. Em um desses testes o número de aquisições ao longo do corpo de prova foi diminuído, ou seja, aumentou-se a distância entre as aquisições. Dessa forma procurou se determinar o limite de aplicação do SAFT para os defeitos usinados no corpo de prova. Nesse caso se adaptou os arquivos das varreduras já existentes, utilizando-se, por exemplo, somente os espectros ímpares para simular uma distância entre aquisições duas vezes maior do que a original. Nos testes também foi alterado o número de pontos por espectro, simulando uma diminuição na freqüência de aquisição.

3.4. O algoritmo de SAFT

O algoritmo de SAFT foi implementado em uma linguagem de computação técnica, dentro do ambiente do programa Matlab®, versão 6.1.

A interface criada para o usuário do programa pode ser visualizada na figura 3.5. A base do algoritmo desenvolvido segue o que foi descrito no item 2.7 deste trabalho. Algumas modificações foram depois introduzidas no algoritmo, de forma a tentar melhorar a relação sinal-ruído nas imagens de b-scan processadas. Essas modificações serão descritas posteriormente.



Figura 3.5 - Interface do programa com o usuário

O programa é iniciado introduzindo-se as informações a respeito do transdutor utilizado. Um arquivo em formato ASCII chamado H2K.dat foi criado para facilitar a entrada desses dados, nessa ordem:

- (a) Freqüência central do transdutor;
- (b) Diâmetro do transdutor;
- (c) Comprimento do campo próximo;
- (d) Distância do transdutor à peça;
- (e) Velocidade do som no material a ser investigado;
- (f) Espessura do material a ser investigado;
- (g) Ângulo de divergência do feixe no campo distante;
- (h) Largura do feixe no ponto focal;
- (i) Distância do transdutor ao ponto emissor; e
- (j) Distância do ponto emissor à superfície da peça.

Das variáveis acima descritas, as enunciadas nos itens (d), (e) e (f) podem ser alteradas pelo usuário. Todas as outras variáveis são ratificadas através de cálculos pelo próprio programa. Caso venha a ser utilizado outro transdutor, deve ser criado um arquivo de dados semelhante com as informações a respeito do novo transdutor.

Em uma etapa seguinte devem ser inseridos os dados com as informações da varredura. Esses dados estarão contidos também em um arquivo em formato ASCII, e deverão conter as seguintes informações, nessa ordem:

- (a) Número de pontos por a-scan;
- (b) Número de passos no eixo X;
- (c) Número de passos no eixo Y;
- (d) Distância entre passos no eixo X;
- (e) Distância entre passos no eixo Y;
- (f) Freqüência de aquisição dos dados.

Esse mesmo arquivo conterá todos os espectros obtidos durante a varredura, que serão então lidos pelo programa e organizados em uma matriz tridimensional.

A próxima etapa do programa é localizar a superfície da peça, isto é, localizar em que ponto dos espectros lidos se encontra o pulso que representa o eco refletido pela superfície da peça. A precisa localização da superfície é essencial para o processamento posterior.

O programa oferece a opção de se visualizar as curvas de interação. Uma vez selecionado qual o espectro e qual a profundidade de interesse (selecionando-se com o "mouse"), essas curvas são desenhadas de forma a tornar visível a posição nos espectros adjacentes que serão interagidos pelo algoritmo com o ponto central. Essa opção foi criada somente para se verificar a capacidade do programa em determinar a posição correta nos espectros adjacentes dos pontos a serem interagidos.

O trecho principal do programa, que realiza a interação dos espectros, está transcrito a seguir. O caracter "%" que precede a linha indica um comentário da etapa que está sendo executada no programa.

A primeira parte do algoritmo cria uma matriz que armazena todas as posições dos espectros adjacentes que serão consultadas durante o processamento. Esse cálculo é feito separadamente de forma a ganhar tempo no processamento posterior.

```
% cria matriz com as posicoes relativas nos espectros laterais
mat pos = zeros(num p a scan+pr,aperture);
for ii=pos sup:num p a scan+pr
                                             % da posição da superfície até o fim do espectro
  for jj=1:n spec(ii)
    pos c = ii - pos sup;
                                             % profundidade do ponto em relacao a superficie
    pos c = pos c*delta 1./2;
                                             % converte para mm abaixo da superficie
    pos c emissor = pos c+d e s proc;
                                             % profundidade em relacao ao ponto emissor
    pos_1 = missor = sqrt((jj*step_x)^2+(pos_c_emissor)^2);
                                             % calcula a posicao no espectro lateral em mm
    pos_l = round((pos_l_emissor-d_e_s_proc)*2./delta_l+pos_sup);
                                          % determina o ponto equivalente no espectro lateral
    mat pos(ii,jj)=pos 1;
  end
end
```

A segunda parte do algoritmo realiza a interação entre os espectros. Essa interação é feita para cada ponto do a-scan separadamente. O programa verifica se existe janela a ser sintetizada para aquela profundidade, e qual o tamanho da mesma. Ele então soma o valor do ponto investigado aos dos espectros que estão contidos na janela, nas profundidades determinadas pela primeira parte do algoritmo.

```
% realiza a interação dos pontos dos espectros
for n=1:n b proc
                                                       % para todos os B-Scans
  for i=1:n a b scan
                                                      % para todos os A-Scans
                                                      % dentro do intervalo de interesse
    for jj=pi0:pif
       if jj<=num p a scan
         if n spec(jj-pos sup+pr)>0
                                                      % se existe abertura a ser sintetizada
            for kk=1:n spec(jj-pos sup+pr)
                                                      % dentro da abertura sintetizada
              pos l=mat pos(jj,kk);
                                                      % determina a posicao lateral
              if pos l<=num p a scan
                if i>kk
                  c_proc(n,i,jj)=c_proc(n,i,jj)+c_scan(n,i-kk,pos_l); % soma o espectro anterior
                end
                if i<=n_a_b_scan-kk
                  c proc(n,i,jj)=c proc(n,i,jj)+c scan(n,i+kk,pos 1);% soma o espectro posterior
                end
              end
            end
            c proc(n,i,jj)=c proc(n,i,jj)./(2*n spec(jj-pos sup+pr)+1);
         end
       end
    end
  end
end
```

O SAFT linear, conforme descrito na literatura existente, se restringe ao que está exposto no algoritmo acima. Não existe, contudo, nenhuma fonte na literatura que exponha tão claramente o algoritmo que tenha sido realizado nos seus respectivos experimentos, e as etapas seguidas pelo mesmo.

O que pode ser observado no SAFT linear básico é que todos os espectros que pertencem à janela sintetizada são somados ao espectro central com o mesmo peso. Conforme já foi demonstrado no item 3.1 deste trabalho, onde se tratou da determinação da geometria do feixe sônico, quando a descontinuidade não está localizada exatamente abaixo do transdutor ela será excitada com uma energia menor, o que gerará uma menor amplitude no eco refletido pela mesma. Dessa forma espera-se que os espectros laterais tragam consigo a informação referente à descontinuidade em uma menor intensidade.

Foram criados, portanto, dois novos algoritmos para a realização do SAFT. Ambos atribuem pesos decrescentes aos espectros mais externos (figura 3.6), mas o primeiro decresce o peso linearmente, enquanto o segundo decresce segundo uma trajetória parabólica (que se assemelha mais à queda de intensidade do feixe do centro para as bordas do mesmo).

Esses três algoritmos, que podem ser denominados de Linear Simples, Linear Ponderado e Linear Ponderado Parabólico, foram testados e comparados.



Figura 3.6 – Curvas representando os pesos decrescentes atribuídos aos espectros mais externos.

3.5. Procedimento experimental

Os algoritmos de SAFT desenvolvidos foram aplicados às imagens de b-scan separadamente. Foram testadas diversas alterações ao programa original. Algumas dessas modificações objetivam reduzir o tempo de processamento das imagens de b-scan, enquanto outras objetivam melhorar a qualidade da imagem processada final. Essas imagens processadas foram comparadas com as imagens originais (não processadas) e com o corpo de prova que deu origem às mesmas, para que então fosse determinada a capacidade do programa em melhorar o dimensionamento das descontinuidades e aumentar a relação sinal-ruído.

Os teste foram executados em um microcomputador com processador Intel Pentium III ®, de 650MHz, com 256 MB de memória RAM.

4.1. A Abertura Sintetizada

Para o processamento eficiente dos espectros se torna de grande importância a precisa determinação das posições nos espectros adjacentes que correspondem ao ponto central sendo investigado (posições que integram a janela sintetizada).

De modo a se confirmar a eficiência da determinação desses pontos, foi criada uma opção de visualização dentro do programa que traça a curva hiperbólica teórica esperada para qualquer ponto desejado (ver figura 2.13). A figura 4.1 traz uma série de hipérboles traçadas ao longo da profundidade em uma imagem b-scan da varredura do corpo de prova. Uma hipérbole maior significa que um maior número de espectros (sinais a-scan) carregam informações que serão interagidas através do somatório coerente no processamento.



Figura 4.1 – Aberturas sintetizadas em função da profundidade - distância entre aquisições de 0,5mm

A figura 4.1 corresponde a uma varredura realizada com distância entre aquisições de 0,5mm no lado "a" do corpo de prova descrito no item 3.3 deste trabalho. Pode ser observado que a janela teórica pode compreender mais de 100 espectros adjacentes consecutivos, o que na prática não é esperado que ocorra. Por isso o programa oferece a opção de limitar o número máximo de espectros que irá compor a janela.

Essa mesma reconstrução pode ser observada na figura 4.2. Essa imagem de b-scan, porém, corresponderia a uma varredura realizada com distância entre aquisições de 2,5mm.



Figura 4.2 – Aberturas sintetizadas em função da profundidade - distância entre aquisições de 2,5mm

A concordância dessas curvas teóricas com os resultados obtidos pelas varreduras pode ser vista nas figuras 4.3 e 4.4. Na figura 4.3 as curvas foram traçadas ligeiramente deslocadas em relação aos pontos que correspondem ao centro dos defeitos, de forma a facilitar a visualização. Na figura 4.4 o detalhe do defeito central foi ampliado.



Figura 4.3 – Curvas traçadas próximo aos defeitos



Figura 4.4 – Detalhe da curva adjacente ao defeito central

Pode ser visto pela análise da figura 4.4 que somente o ponto central da imagem do defeito experimentará uma interação construtiva no processamento realizado pelo algoritmo. Nas figuras 4.5 e 4.6 estão ilustradas as janelas traçadas para pontos que não contém o defeito, ou seja, se encontram deslocados da posição central da hipérbole.



Figura 4.5 - Curvas traçadas fora do centro do defeito



Figura 4.6 – Detalhe da curva traçada fora do centro do defeito

Uma vez demonstrada a capacidade do programa em determinar a abertura sintetizada e traçar as curvas de interação, foram realizados os testes de reconstrução com os dados obtidos pelas varreduras detalhadas no item 3.3 deste trabalho. Alguns dos resultados obtidos estão demonstrados a seguir.

4.2. Corpo de Prova – Lado A

Diversos testes de reconstrução das descontinuidades do lado "a" do corpo de prova foram realizados. Diversas modificações foram testadas de forma a tentar melhorar o resultado obtido, e essas tentativas serão descritas a seguir. Todo o processamento descrito nos próximos itens se refere ao algoritmo linear, exceto onde outro algoritmo é explicitamente citado.

Todas as modificações introduzidas foram testadas no processamento de dois arquivos de dados similares. Esses arquivos se diferenciam somente no fato de a aquisição de um deles ter sido executada realizando-se a média de três aquisições consecutivas para se determinar a resposta de um determinado ponto da varredura, enquanto o segundo era obtido pela leitura direta da resposta do transdutor para cada ponto da varredura.

Com a realização da média entre espectros para o primeiro arquivo de dados (varredura número 11 da tabela 3.1) espera-se obter espectros com nível de ruído mais baixo, e conseqüentemente imagens de b-scan mais nítidas serão geradas. Para a varredura sem a realização de média (varredura número 12 da tabela 3.1), o que se obtém são espectros com o conteúdo de ruído mais elevado em amplitude, e conseqüentemente imagens de b-scan menos nítidas.

As modificações testadas foram as seguintes:

(a) Alteração do ângulo de divergência do feixe no campo distante:

O ângulo de divergência do feixe é ditado pelas características do transdutor (ver item 3.1 ou apêndice A deste trabalho). Ele é definido tomando como base um valor arbitrário de intensidade (por exemplo, 10% da intensidade do centro do feixe).

O programa naturalmente tenta sintetizar a janela com base nesse ângulo, mas o mesmo pode ser modificado de forma a considerar uma maior ou menor abertura do feixe. Dessa forma o programa sintetizará janelas maiores ou menores, respectivamente.

A imagem de b-scan obtida pela varredura 11 e a imagem processada obtida para a mesma podem ser vistas nas figuras 4.7 e 4.8, respectivamente.





A imagem da figura 4.8 foi obtida através de um processamento que utilizou a abertura total do feixe sônico calculada pelo programa (10,3°), não tendo sido imposta nenhuma limitação ao número de espectros a serem interagidos (tamanho máximo da janela).

Os defeitos reconstruídos pelo processamento, apesar de estarem nitidamente marcados, apresentam uma baixa amplitude. Um dos possíveis motivos para a baixa amplitude na reconstrução pode ser a baixa amplitude dos ecos na imagem b-scan original. Esse e outros fatores que afetam a amplitude dos ecos reconstruídos serão discutidos posteriormente.

As imagens obtidas pelo processamento executado para ângulos maiores (13° e 15°) resultaram em amplitudes ainda menores nos ecos reconstruídos. Isso decorre do fato de também estarem sendo interagidos espectros mais distantes do espectro central (e portanto mais distantes do defeito). Como esses espectros carregam pouca ou nenhuma "informação" do defeito, o resultado é uma baixa amplitude no eco reconstruído.

Quando o processamento é executado para ângulos menores (9° e 7°), somente os espectros mais próximos ao espectro central são interagidos. Como esses espectros possuem ecos provenientes dos defeitos com maior amplitude, o resultado final será uma imagem b-scan reconstruída com os defeitos mais nitidamente marcados. Isso pode ser visto na imagem da figura 4.9, que ilustra o processamento que foi realizado com um ângulo de divergência de 7°, ao invés do ângulo de 10,3° que fora inicialmente calculado pelo programa.

Pode ser observado na figura 4.9, contudo, que a resolução lateral dos defeitos reconstruídos diminui, ou seja, os defeitos aparecem maiores do que na imagem processada utilizando-se todo o ângulo do feixe.

O tempo requerido pelo programa para processar cada imagem de b-scan foi relativamente elevado (540 segundos). A redução no ângulo de divergência utilizado pra o processamento resultou em imagens com qualidade comparável à obtida para o ângulo completo, com exceção da pequena diferença na resolução lateral descrita acima, e incorre em um menor tempo de processamento (375 segundos para o ângulo de 7°).



Figura 4.9 – Imagem obtida pelo processamento utilizando ângulo de divergência de 7°, ao invés de 10,3° - varredura 11

(b) Alteração da abertura máxima a ser sintetizada:

A largura da abertura sintetizada é dependente da profundidade do ponto do espectro que está sendo estudado (ver figura 4.1 e 4.2). Para as profundidades maiores aberturas contendo até 100 espectros podem vir a ser sintetizadas.

Para se verificar o efeito causado pelo aumento das janelas sintetizadas foi criado um pequeno programa dentro do ambiente do Matlab®. Esse programa lê um espectro obtido pelo transdutor ultra-sônico e o soma a um determinado nível de ruído gerado aleatoriamente. Isso é feito uma centena de vezes, de forma que no final se obtém cem espectros distintos entre si pelo ruído. Ele inicia, então, um processo de interação desses espectros ruidosos, realizando ao mesmo tempo uma comparação do sinal interagido com o sinal inicial, que não contém ruído. O gráfico obtido por essa comparação pode ser visto na figura 4.10.



Figura 4.10 - Correlação obtida com o aumento do número de interações

Pode ser observado na figura 4.10 que o ruído que foi introduzido nos espectros teve sua influencia reduzida muito rapidamente nas primeiras vinte interações executadas pelo programa. A partir da vigésima interação a velocidade com que a influência do ruído é diminuída é bastante reduzida, embora essa região ainda seja responsável por oitenta por cento do tempo de processamento total. O que se observa aqui pode ser estendido ao algoritmo de SAFT.

A figura 4.11 contém a imagem obtida pelo processamento executado ao se impor uma limitação da janela máxima a ser sintetizada de 20 espectros (varredura 11). Essa limitação afeta mais significativamente as reconstruções realizadas a maiores profundidades, onde seriam sintetizadas as maiores janelas. Pode ser observada novamente uma pequena redução na resolução lateral dos defeitos reconstruídos a maiores profundidades. Ressalta-se, contudo, que a amplitude dos ecos dos defeitos reconstruídos são maiores do que os obtidos sem a limitação ao tamanho da janela. O tempo requerido pelo programa para processar cada imagem de b-scan foi de 360 segundos, uma redução significativa quando comparado ao tempo de processamento utilizando-se a janela completa (540 segundos).



janela máxima de 20 espectros – varredura 11

O algoritmo de SAFT também foi testado aliando-se as duas alterações sugeridas nos itens (a) e (b), ou seja, reduzindo a ângulo de divergência utilizado no processamento e impondo uma janela máxima a ser sintetizada. O resultado obtido para esse processamento pode ser visto nas figuras 4.12 e 4.13 abaixo (varreduras 11 e 12, respectivamente). Os resultados para as duas varreduras são comparáveis, e os processamentos foram realizados no tempo de 320 segundos para ambos. É perceptível uma pequena redução na resolução lateral, de forma semelhante ao que já havia sido destacado quando o ângulo e a janela haviam sido alterados separadamente. Novamente, contudo, a amplitude dos ecos reconstruídos supera a obtida para o processamento com ângulo completo e sem limitação de tamanho de janela.







Figura 4.13 – Imagem do processamento aliando-se um ângulo de divergência menor (7,0°) a um limite na janela máxima (20 espectros) – varredura 12

(c) Alteração da distância entre aquisições:

As varreduras utilizadas nesse trabalho foram realizadas com uma distância entre aquisições muito pequena (0,5 mm nas varreduras 11 e 12). Como o algoritmo de SAFT se baseia no fato da descontinuidade ser "enxergada" diversas vezes, a cada instante em um ponto diferente da varredura, uma distância pequena entre aquisições favorecerá a reconstrução dos defeitos.

Dependendo da aplicação prática em que o algoritmo for empregado, contudo, nem sempre se conseguirá realizar uma varredura com distâncias tão reduzidas. Dessa forma a reconstrução realizada pelo algoritmo foi testada para distâncias entre aquisições maiores (1,0 mm; 1,5 mm; 2,0 mm; e 3,0 mm). Essas distâncias foram testadas nas varreduras 11 e 12, e nas seguintes situações:

 (a) sendo utilizado o ângulo completo de divergência e sem limitação no tamanho da janela máxima a ser sintetizada (de agora em diante denominado de processamento completo); e

(b) sendo utilizado um ângulo reduzido de divergência $(7,0^{\circ})$ e limitando-se a janela máxima a ser sintetizada em 20 espectros (de agora em diante denominado de **processamento reduzido**).

Conforme já havia sido descrito anteriormente, não foram executadas novas varreduras para se obter as distâncias entre aquisições citadas, mas apenas se adaptou os arquivos de dados já existentes (por exemplo, trabalhando apenas com os espectros ímpares para simular a distância de 1,0 mm).

A figura 4.14 ilustra a imagem de b-scan não processada para a distância entre aquisições de 2,0 mm (varredura 11). A imagem que resulta do **processamento completo** dessa varredura pode ser vista na figura 4.15. Os defeitos ainda são visíveis após o processamento, apesar da redução do número de interações que são executadas. A imagem resultante do **processamento reduzido** novamente apresenta maiores amplitudes dos ecos dos defeitos, facilitando sua visualização. Os resultados obtidos para a varredura 12 são semelhantes aos obtidos para a varredura 11.

O tempo de processamento da imagem da figura 4.15 foi de 36 segundos, enquanto o tempo do processamento reduzido foi de 24 segundos.



aquisições de 2,0 mm – varredura 11


Para a distância entre aquisições de 3,0 mm a imagem processada ficou muito deteriorada, indicando um limite real à aplicação do algoritmo. No estudo de aplicações específicas para o algoritmo deve se determinar quais as dimensões dos defeitos que se pretende investigar, de forma a se determinar a distância máxima entre aquisições que pode ser empregada.

(d) Alteração do número de pontos por espectro:

O número de pontos por espectro da varredura está relacionado à freqüência de aquisição dos dados (ver item 2.5 deste trabalho). O sistema de varredura utilizado realiza aquisições com uma freqüência de 40 Mhz. Para a espessura do corpo de prova utilizado essa freqüência resultou em espectros com cerca 1200 pontos, um número relativamente elevado e que prolonga o tempo de processamento do algoritmo.

Foram realizados testes com o algoritmo, onde se executou um pré-processamento que reduzia o número de pontos por espectro, simulando freqüências de aquisição inferiores. Foram processados então espectros com 1000, 800, 600 e 400 pontos.

Para os espectros com 1000, 800 e 600 pontos não se percebe qualquer alteração nas imagens processadas para esses espectros quando comparados aos espectros originais. Isso foi válido tanto para as imagens resultantes de **processamento completo** quanto para as imagens do **processamento reduzido**, para ambas as varreduras (11 e 12). Os defeitos reconstruídos nas imagens obtidas para o processamento dos espectros com 400 pontos apresentaram uma amplitude reduzida, tornando sua visualização difícil (Figura 4.16). O limite à aplicação desse pré-processamento, de forma semelhante ao aumento da distância entre aquisições, deve ser determinado de acordo com a aplicação em que será empregado o algoritmo.

O tempo de processamento para o espectro com 600 pontos foi de 260 segundos e 150 segundos, para o processamento completo e reduzido respectivamente.



Figura 4.16 – Imagem de b-scan resultante de processamento reduzido para espectros com 400 pontos – varredura 11

(e) Pré-processamento para aumentar amplitude dos ecos das descontinuidades:

Todas as imagens obtidas pelos processamentos citados anteriormente sofreram com a baixa amplitude dos ecos dos defeitos reconstruídos. Isso se deve, principalmente, à baixa amplitude dos ecos dos defeitos nas imagens originais das varreduras. Uma maneira possível de reduzir isso seria no próprio momento da varredura, aumentando-se o ganho imposto ao sinal do transdutor.

Um efeito semelhante pode ser obtido realizando-se um pré-processamento dos sinais da seguinte forma: todos os pontos do sinal que estiverem acima de um determinado valor limite arbitrário serão reduzidos até esse valor limite. O espectro experimentará um aumento relativo dos ecos de amplitude mais baixa, de forma semelhante ao ganho que seria imposto durante a aquisição dos sinais.

Esse aumento incidirá sobre o eco proveniente das descontinuidades, bem como sobre o ruído contido no espectro. Como o algoritmo de SAFT é capaz de reduzir com muita eficiência o nível de ruído contido no sinal, ganhos relativamente elevados podem ser impostos aos espectros.

A figura 4.17 contém uma imagem de b-scan não processada onde foi aplicado esse pré-processamento. Nesse caso específico foi imposto como limite máximo o valor correspondente a 20% do maior valor do espectro inicial. Todos os valores que superavam em módulo esse limite foram reduzidos até esse valor.



Figura 4.17 – Imagem de b-scan não processada - pré-processamento com limite a 20% do valor máximo inicial – varredura 11

A figura 4.18 contém a imagem resultante do **processamento completo** da imagem da figura 4.17. Pode ser percebido que o ruído foi efetivamente reduzido a níveis semelhantes aos obtidos no processamento das imagens que não experimentam esse ganho. Os ecos reconstruídos dos defeitos experimentaram um aumento significativo nas suas amplitudes, o que tornou a visualização dos mesmos mais fácil. O resultado obtido no **processamento reduzido** dessa imagem foi ligeiramente inferior, o que evidencia que para níveis tão elevados de ruído não se deve limitar tão acentuadamente o número de interações.



com limite a 20% do valor máximo inicial - varredura 11

Para a varredura 12, que contém naturalmente um maior nível de ruído em seus espectros, o resultado foi semelhante (figura 4.19).



com limite a 20% do valor máximo inicial – varredura 12

(f) Pós-processamento para aumentar amplitude dos ecos das descontinuidades:

O mesmo tipo de pré-processamento que foi aplicado aos espectros antes deles serem processados pelo SAFT pode ser empregado nas imagens finais obtidas pelo algoritmo. Esse pós-processamento possui a vantagem de modificar apenas o modo de visualização das imagens processadas, sem alterar a qualidade dos dados iniciais. Ele não exige, também, que todo o processamento seja repetido após ser estabelecido um novo limite superior, como no caso anterior.

O ganho nesse caso será imposto de forma semelhante ao anterior (determinando-se um valor limite), e procurará tirar proveito do fato do nível de ruído dos espectros já ter sido reduzido Na figura 4.20 pode ser vista uma imagem de b-scan com **processamento completo**, onde está sendo imposto um limite de 20%, semelhante ao das figuras 4.18 e 4.19.



Figura 4.20 – Imagem de b-scan processada - pós-processamento com limite a 20% do valor máximo inicial – varredura 11

A imagem obtida pelo **processamento reduzido** possui uma qualidade inferior, de forma semelhante ao obtido quando se impõe o ganho anteriormente ao processamento.

Os resultados obtidos pela varredura 12 são semelhantes. Nessas imagens os problemas encontrados devido ao ruído apareçam em maior escala, o que evidencia a necessidade do processamento completo sempre que a qualidade da imagem for alterada pelos processos de aumento de ganho descritos nos itens (e) e (f).

(g) Alteração nos algoritmos de SAFT:

Conforme já citado no item 3.4 deste trabalho, no processamento realizado pelo algoritmo linear simples todos os espectros que pertencem à janela sintetizada são somados ao espectro central com o mesmo peso. Foram desenvolvidos, portanto, dois novos algoritmos para a realização do SAFT, os quais atribuem pesos decrescentes aos espectros mais externos (figura 3.7). No primeiro o peso decresce linearmente, enquanto que no segundo o peso decresce segundo uma trajetória parabólica.

Esses três algoritmos foram denominados então como Linear Simples, Linear Ponderado e Linear Ponderado Parabólico. Todos os resultados expostos até o momento se referem ao algoritmo Linear Simples. Para esses novos algoritmos somente foi utilizado o **processamento completo**.

A imagem da figura 4.21 foi obtida pelo processamento realizado com o algoritmo Linear Ponderado, em condições semelhantes àquelas adotadas para a imagem da figura 4.20. A reconstrução dos defeitos por esse algoritmo gerou espectros com ecos relativos aos defeitos com amplitude significativamente superior aos obtidos pelo algoritmo Linear Simples.

De forma semelhante, a figura 4.22 ilustra o processamento realizado pelo algoritmo Linear Ponderado Parabólico para a mesma situação descrita para as figuras 4.20 e 4.21. Além do benefício citado quando foi aplicado o algoritmo Linear Ponderado, esse algoritmo ainda demonstrou ter uma resolução lateral ligeiramente superior ao anterior.



Figura 4.21 – Imagem de b-scan processada - pós-processamento com limite a 20% do valor máximo inicial – varredura 11; algoritmo Linear Ponderado



Figura 4.22 – Imagem de b-scan processada - pós-processamento com limite a 20% do valor máximo inicial – varredura 11; algoritmo Linear Ponderado Parabólico

4.3. Corpo de Prova – Lado B

A resolução máxima teórica do algoritmo de SAFT é dependente somente do diâmetro do transdutor que está sendo utilizado, conforme definido no item 2.7.3(a) deste trabalho. Como o transdutor utilizado para executar as varreduras (H2K da Krautkramer) possui um diâmetro de 10 mm, a resolução máxima teórica da técnica será de 5 mm.

Ao se avaliar as imagens de b-scan obtidas pelo processamento realizado pelo algoritmo desenvolvido, percebemos que a resolução obtida está próxima à teórica. Isso pode ser evidenciado na figura 4.23, que traz uma imagem ampliada de um dos defeitos reconstruídos pelo algoritmo Linear Simples de SAFT.



A escala horizontal da imagem representa o número do espectro. Como essa varredura foi executada com uma distância entre aquisições de 0,5 mm, a resolução teórica seria representada por uma abertura equivalente a 10 espectros. Pode se observar que o defeito reconstruído é ligeiramente maior do que a citada abertura de 10 espectros.

O corpo de prova em seu lado "b" está constituído por três pares de furos. O primeiro par foi construído com um espaçamento de 7mm, o segundo 5mm, e o terceiro 3mm. O objetivo desse lado do corpo de prova é testar a capacidade do algoritmo em resolver os furos.

A figura 4.24 contém a imagem de b-scan não processada referente à varredura 29 (ver item 3.3 deste trabalho). Pode ser visto que nenhum dos pares de furos pode ser resolvido por uma varredura convencional, mesmo que essa tenha sido realizada com uma distância pequena entre aquisições (0,5 mm).



Figura 4.24 – Imagem de b-scan não processada referente à varredura 29

Na imagem acima os pares de furos estão localizados da esquerda para a direita em ordem decrescente de espaçamento. Na figura 4.25 pode ser vista a imagem de b-scan obtida pelo processamento da imagem da figura 4.24. Foi utilizado o algoritmo Linear Simples, com **processamento completo**. Na figura 4.26 pode ser vista a imagem para o mesmo processamento, porém tendo sido realizado um pré-processamento para aumentar a amplitude dos ecos provenientes dos defeitos.



Figura 4.25 – Imagem de b-scan processada referente à varredura 29 algoritmo Linear Simples – processamento completo



algoritmo Linear Simples – processamento completo e pré-processamento

Nas imagens processadas obtidas pode se ver que o programa efetivamente foi capaz de resolver os furos que distanciavam 7 mm, e que os furos que distanciavam 5 mm já não conseguem ser resolvidos. Esses e os furos que distanciam 3 mm aparecem na imagem como um defeito único. Os resultados obtidos pelos outros algoritmos ponderados foram semelhantes.

Na figura 4.27 pode ser vista a imagem b-scan não processada para a varredura 37 (ver item 3.3 deste trabalho). Mais uma vez pode ser visto que nenhum dos pares de furos pode ser resolvido pela varredura convencional.

Na figura 4.28 pode ser vista a imagem de b-scan obtida pelo processamento da imagem da figura 4.27. Novamente foi utilizado o algoritmo Linear Simples, com **processamento completo**.



Figura 4.27 - Imagem de b-scan não processada referente à varredura 37



Na imagem processada obtida pode se ver que o programa foi capaz de resolver os furos que distanciavam 7 mm. Como a resposta em amplitude dos ecos provenientes dos defeitos foi muito superior na varredura executada por esse lado do corpo de prova, o programa foi capaz de resolver melhor os furos que distam 5 mm, chegando mesmo a quase resolver os furos que distam 3 mm. Os resultados obtidos pelos outros algoritmos ponderados foram semelhantes.

Foi também estudada a implementação das modificações sugeridas durante a apresentação dos resultados obtidos para as varreduras executadas no lado "a" do corpo de prova.

Para a varredura 29 foram testadas as situações listadas na tabela 4.1. As imagens correspondentes aos processamentos realizados nas colunas (a), (b), (c) e (d) podem ser vistas nas figuras 4.29, 4.30, 4.31 e 4.32, respectivamente.

	(a)	(b)	(c)	(d)
Passo	1,5 mm	2,0 mm	2,0 mm	2,0 mm
Ângulo	9,0°	9,0°	7,0°	7,0°
Janela Máxima	40	40	20	20
N° de pontos	600	600	600	400
Pré-processamento	20%	20%	20%	20%
Tempo de Processamento	35 seg	18,5 seg	14,8 seg	9,4 seg

Tabela 4.1 - Modificações testadas

Pode ser visto na figura 4.29 que o processamento foi capaz de resolver os furos que distam 7 mm, apesar de terem sido adotadas tantas medidas com o propósito de diminuir o tempo de processamento, a saber: a distância entre aquisições foi triplicada, o ângulo adotado no processamento foi reduzido de 10,3° para 9,0°, a janela máxima foi limitada a 40 espectros, e o número de pontos por espectro foi reduzido à metade. Foi aplicado um pré-processamento que limitou o valor máximo em amplitude a 20% do valor inicial. O tempo de processamento resultante foi de 35 segundos.



propostas na coluna (a) da tabela 4.1



Para o processamento realizado segundo a coluna (b), além de todas as medidas restritivas já apontadas na coluna (a) da tabela 4.1, foi adotada uma distância entre aquisições de 2,0 mm, superior à anterior. Mesmo assim o programa foi capaz de mais uma vez resolver os furos que distam 7 mm (figura 4.30). O tempo para esse processamento foi de 18,5 segundos, enquanto que o tempo para o processamento segundo a coluna (c) foi de 14,8 segundos, tendo sido adotado um ângulo de divergência menor (7°) e uma janela máxima menor (20 espectros). De forma semelhante ao processamento anterior, o programa foi capaz de resolver os citados furos (figura 4.31).

Medida mais restritiva foi adotada no processamento segundo a coluna (d), onde o número de pontos por espectro foi mais uma vez reduzido, dessa vez à terça parte do tamanho original, reduzindo assim o tempo de processamento para 9,4 segundos. Mesmo assim os furos ainda foram resolvidos pelo programa (figura 4.32).



Figura 4.32 – Imagem processada segundo as modificações propostas na coluna (d) da tabela 4.1

A capacidade do programa em resolver os citados furos é ressaltada quando se avalia a imagem não processada, como a da figura 4.33, que contém a imagem de b-scan não processada que originou a imagem da figura 4.32.



Figura 4.33 – Imagem não processada que gerou a imagem da figura 4.22

Medidas tão restritivas, contudo, não são bem sucedidas quando aplicadas às imagens da varredura 37. Embora o **processamento completo** da varredura 37 tenha gerado melhores resultados, em virtude da maior amplitude dos ecos provenientes dos furos, as medidas restritivas relacionadas na tabela 4.1 não são bem toleradas nesse caso. Isso ocorre porque as janelas sintetizadas para esse caso são menores, visto que a varredura executada pela face inferior aproxima os furos do ponto emissor.

O principal fator limitante nesse caso foi a distância entre aquisições. Uma reconstrução razoável foi obtida somente quando a distância entre aquisições foi limitada a 1 mm, mantendo-se todas as outras medidas citadas na coluna (a) da tabela 4.1 (figura 4.34).



Figura 4.34 – Imagem processada segundo a coluna (a) da tabela 4.1, porém com distância entre aquisições de 1mm

Dessa forma procurou se demonstrar que é necessário um estudo específico da aplicação em que o algoritmo será empregado. De outra forma não poderão ser adotadas medidas que diminuam o custo computacional, sem que seja mantida a confiabilidade da técnica.

5.1. O Algoritmo de SAFT

O algoritmo de SAFT desenvolvido demonstrou ser capaz de realizar as tarefas para as quais foi desenvolvido, tendo sido eficiente na eliminação do ruído contido nos espectros, além de possibilitar uma grande melhora no dimensionamento das descontinuidades.

A redução no ângulo de divergência utilizado no processamento e a limitação no tamanho máximo da janela a ser sintetizada se mostraram medidas eficientes na redução do tempo de processamento. Essas medidas serão úteis caso se pretenda desenvolver um algoritmo que realize o processamento por SAFT em tempo real.

Uma grande economia em custo computacional também foi obtida através da redução no número de pontos por espectro. A utilização dessa medida, contudo, deve ser estudada de acordo com a aplicação em que será empregado o processamento por SAFT. Esse estudo também deve envolver a análise da distância máxima entre aquisições que pode ser utilizada, sem que se comprometa a reconstrução dos defeitos pelo SAFT. É recomendável que seja feito um corpo de prova representativo da aplicação para esse estudo.

O pré-processamento para o aumento da amplitude relativa dos ecos provenientes de descontinuidades foi bem sucedido, gerando imagens processadas com boa qualidade. A única limitação à sua aplicação é que o mesmo altera os dados originais, além de exigir um novo processamento a cada vez que seu limite for redefinido. Uma alternativa é o emprego de ganhos maiores a serem impostos ao sinal do transdutor durante a varredura. Mesmo que a relação sinal-ruído seja inicialmente reduzida, o processamento pelo SAFT deverá ser capaz de gerar imagens de boa qualidade.

O pós-processamento que visa melhorar a visualização dos ecos provenientes das descontinuidades não possui limitação à sua aplicação, visto que não altera os dados originais e não exige um novo processamento a cada vez que seu limite for redefinido. Por

tudo isso ele acabou se tornando uma opção permanente dentro dos programas desenvolvidos.

O algoritmo Linear Ponderado Parabólico produziu um pequeno ganho na resolução lateral e na amplitude dos ecos refletidos pelas descontinuidades. A sua aplicação não incorre em aumento do tempo de processamento, e por isso se torna recomendável. A aplicação do pré e do pós-processamento descritos anteriormente, contudo, resultou em ganhos maiores na qualidade da imagem obtida.

5.2. Trabalhos Futuros

Esse trabalho estudou a aplicação do algoritmo de SAFT no processamento de imagens de b-scan obtidas por um transdutor normal, de imersão. Os principais fatores que afetam a qualidade das imagens obtidas foram aqui discutidos, e diversas sugestões foram feitas de forma a melhorar a capacidade do algoritmo em dimensionar descontinuidades e aumentar a relação sinal-ruído, sem incorrer em um grande custo computacional.

Uma etapa posterior ao trabalho aqui desenvolvido deverá ser a aplicação do algoritmo de SAFT a transdutores angulares. Os trabalhos mais recentes em SAFT tem estudado ainda a associação dessa técnica à técnica de inspeção denominada TOFD ("Time Of Flight Diffraction"). Nos dois casos o que se procura é estender os benefícios do SAFT aos métodos mais difundidos de inspeção de juntas soldadas.

- [1] American Society for Nondestructive Testing, Nondestructive Testing Handbook, 2^{a.}
 edição, Vol. 7, USA, 1991
- [2] Santin, J.L., Ultra-som: Técnica e Aplicação, Rio de Janeiro, Qualitymark Ed., 1996.
- [3] Mason W.P., "Sonic and Ultrasonic: Early History and Applications", *IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics*, Vol.SU-23, n°4, pp 224-231, july 1976.
- [4] Silk M.G., "Changes in ultrasonic defect location and sizing", *NDT International*, Vol. 20, nº1, pp 9-13, july 1976.
- [5] Silk M.G., "The transfer of ultrasonic energy in the diffraction technique for crack sizing", *Ultrasonics*, pp 113-121, may 1979.
- [6] Schlengermann U., "Determination of crack depth using ultrasonics An overlook", *NDTnet*, Vol.2,n°5, may 1997.
- [7] Murthy R., Bilgutay N.M., Xing Li, "Temporal and Spatial Spectral Features of Bscan Images", *Ultrasonics Symposium 1991*, pp 799-802.
- [8] Slesenger T.A., Hesketh G.B., "Ultrasonic Defect Positioning by Non-linear Squares Curve Fitting", National Nondestructive Testing Centre, England.
- [9] Paradis L., Serruys Y., Saglio R., "Ultrasonic Signal Processing for Thickness Measurement and Detection of Near-surface Defects", *Materials Evaluation*, 44, pp 1344-1349, october 1986.

- [10] Paradis L., Serruys Y., Saglio R., "A Time-of-flight Method for Crack Evaluation Using Focused Ultrasonic Probes", *Materials Evaluation*, 44, pp 568-571, april 1986.
- [11] Charlesworth J.P., Lidington B.H., Silk M.G., "Defect Sizing using Ultrasonic Flaw Diffraction", Europäische Vortragstagung Zerstörungfreie Materialprüfung, Mainz, 24-26.4.1978.
- [12] Mak D.K., "Ultrasonic methods for measuring crack location, crack height and crack angle", *Ultrasonics*, pp 223-226, september 1985.
- [13] Zgonc K et al, "Crack sizing using a neural network classifier trained with data obtained from finite element models", *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Vol.14.
- [14] Mitidiero, C.H.A., "Ensaio ultra-sônico com composição espectral", tese de M.Sc., PPGEMM/UFRGS, Porto Alegre, 1996.
- [15] Silk M.G., "Benefits of signal processing in ultrasonic inspection", *Insight*, Vol.36, n°10, pp 776-781, october 1994.
- [16] Ihara I., Jen C.K., "C-scan imaging in molten zinc by focused ultrasonic waves", J. Acoust. Soc. Am., 107 (2), pp 1042-1044, february 2000.
- [17] Fish P., "Physics and instrumentation of Diagnostic Medical Ultrasound", England, John Wiley & Sons, 1990.
- [18] Elbern A.W., Guimarães L., " Synthetic Aperture Focusing Technique for Image Restauration", NDT.net, Vol.5, nº8, august 2000.

- [19] Hands G., "Automated NDT Advantages and Disadvantages", http://www.ultrasonics.de/article/hands/hands.htm.
- [20] K.G. Beauchamp, C.K. Yuen, *Digital methods for signal analysis*, London, George Allen & Unwin, 1979.
- [21] Kazys R., Svilainis L., "Analysis of adaptive imaging algorithms for ultrasonic nondestructive testing", Ultrasonics.
- [22] Krüger, S.E., Análise Espectral de Ecos e Sinal Retroespalhado Ultra-sônicos Aplicada a Detecção de Danos por Hidrogênio em Aço, tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1996.
- [23] Perez G.B., Detecção de Micro-danos Induzidos por Hidrogênio através de Análise Espectral Ultra-sônica, tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1996.
- [24] Singh G.P., Udpa S., "The role of digital signal processing in NDT", NDT International, Vol.19, n°3, pp 125-131, june 1986.
- [25] Birx D., Schroder A., "The application of signal analysis techniques to tissue characterization and boundary determination with ultrasonics", Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol.14.
- [26] Rebello J.M.A., Detecção de Defeitos por Análise Freqüêncial de Sinais Ultrasônicos, palestra referente ao Concurso para Professor Titular do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola de Engenharia da UFRJ, Rio de Janeiro, 1993.
- [27] 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.

- [28] Hundt E.E., Trautenberg E.A., "Digital processing of ultrasonic data by deconvolution", IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics, Vol.SU-27, n°5, pp 249-252, september 1980.
- [29] Zhao J. et al, "Investigation of block filtering and deconvolution for the improvement of lateral resolution and flaw sizing accuracy in ultrasonic testing", Ultrasonics 1995, Vol.33, n°3, pp 187-194.
- [30] Martinez O. et al, "Application of Digital Signal Processing Techniques to Synthetic Aperture Focusing Technique Images", Sensors and Actuators, 76, pp 448-456, 1999.
- [31] Duncan P.J. *et al*, "C-scan image enhancement by digital frequency domain block filtering", Insight, Vol.37, n°1, january 1995.
- [32] Siqueira M.H.S., Inspeção em Grandes Distâncias Utilizando Ondas Ultra-sônicas Guiadas e Inteligência Artificial, Exame de Qualificação para obtenção do grau de Doutor, COPPE/UFRJ, 1999.
- [33] Takadoya M., Yabe Y., "An artificial intelligence technique to characterize surfacebreaking cracks", Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol.14.
- [34] Brown L.M., DeNale R., "Knowledge-based NDE system", Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol.14.
- [35] Papadakis E.P., Mack R.T., "Will Artificial and Human Intelligence Compete in NDT", Materials Evaluation, pp 570-572, may 1997.
- [36] Schmitz V., Müller W., Schäfer G., "Synthetic Aperture Focusing Technique: State of the Art", Acoustic Imaging, Vol. 19, pp 545-551, 1992.

- [37] Schmitz V., "Nondestructive Acoustic Imaging Techniques", Fraunhofer Institute for Nondestructive Testing, Saarbrücken Cargèse, Corse April 26-May 8, 1999.
- [38] Doctor S.R., Hall T.E., Reid L.D., "SAFT the evolution of a signal processing technology for ultrasonic testing", NDT International, Vol.19, n°3, june 1986.
- [39] Ylitalo J.T., Ermert H., "Ultrasound Synthetic Aperture Imaging: Monostatic approach", IEEE Transaction on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, Vol.41, n°3, may 1994.
- [40] Howard, P.J., Chiao R.Y., "Ultrasonic Maximum Aperture SAFT Imaging", Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol.14.
- [41] Masri W. et al, "Synthetic Aperture Focusing Technique Using the Envelope Function for Ultrasonic Imaging", Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol.14.
- [42] Shandiz H.T., Gaydecki P., "A New SAFT Method in Ultrasonic Imaging at Very Low Frequency by Using Pulse Echo Method", NDT.net, Vol.4, nº11, november 1999.
- [43] Shandiz H.T., Gaydecki P., "Low Frequency Ultrasonic Images Using Time Domain SAFT in Pitch Catch Method", NDT.net, Vol.4, nº11, november 1999.
- [44] Busse L.J., "Three-Dimensional Imaging Using a Frequency-Domain Synthetic Aperture Focusing Technique", IEEE Transaction on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, Vol.39, n°2, pp 241-255, march 1992.
- [45] Langenberg K.J. *et al*, "Synthetic Aperture Focusing Technique Signal Processing", NDT International, Vol.19, n°3, june 1986.

- [46] Schickert M., "Towards SAFT Imaging in Ultrasonic Inspection of Concrete", NDT.net, Vol.2, nº4, april 1997.
- [47] Pitkänen J. *et al*, "Evaluation of Ultrasonics Indications by Using PC-based Synthetic Aperture Focusing Technique", NDT.net, Vol. 2, n°1, january 1997.
- [48] Burr E. *et al*, "Application of a Modified SAFT-Algorithm on Synthetic B-scans of Coarse Grained Materials", NDT.net, Vol.3, n°2, february 1998.
- [49] Lévesque D. *et al*, "Improved Performance of Laser-ultrasonic F-SAFT Imaging", Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol.18, 1999.
- [50] Blouin A. *et al*, "SAFT Data Processing Applied to Laser-ultrasonic Inspection", ", Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol.17, 1998.
- [51] Mayer K. et al, "Three-dimensional Imaing System Based on Fourier Transform Synthetic Aperture Focusing Technique", Ultrasonics, Vol.28, pp 241-255, july 1990.
- [52] Osetrov A.V., "Non-linear Algorithms Based on SAFT Ideas for Reconstruction of Flaws", Ultrasonics, Vol.38, pp 739-744, 2000.
- [53] Yamani A., "Three-Dimensional Imaging Using a New Synthetic Aperture Focusing Technique", IEEE Transaction on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, Vol.44, nº4, pp 943-947, july 1997.
- [54] Schmitz V., Chacklov S., Müller W., "Experience with Synthetic Aperture Focusing Technique in the Field", Ultrasonics, Vol.38, pp 731-738, 2000.

- [55] Johnson J.A., Barna B.A., "The Effects of Surface Mapping Corrections with Synthetic Aperture Focusing Techniques on Ultrasonic Imaging", IEEE Transaction on Sonics and Ultrasonics, Vol. SU-30, nº5, pp 283-294, september 1983.
- [56] Ginzel E., "Ultrasonic Inspection 2: Training for Nondestructive Testing Variables Affecting Test Results", NDT.net, Vol.4, nº6, june 1999.
- [57] Weber S.A., Blake R.A., "Ultrasonic Image Reconstruction Utilizing a Full Volume Digitized Waveform Database"
- [58] McNab A., Cornwell I.H., "Visualisation of 3D Ultrasonic NDT Data", Insight, Vol.37, n°10, pp 814-818, october 1995.
- [59] Netzelman U. *et al*, "Volume Acquisition and Visualisation of High-Frequency Ultrasound Data", Acoustical Imaging, Vol.19, pp 553-557, 1992.
- [60] Lathi B.P., *Introduccion a la teoria ysistemas de comunicacion*, Mexico, Editorial Limusa, 1976.
- [61] Chiou C.P. et al, "Ultrasonic Signal-to-noise Ratio Enhancement Using Adaprive Filtering Technique", Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol.14.
- [62] Frankle R., Rose D.N., "Ultrasonic Techniques for Inspecting Multi-layer Composite Components", Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol.14.
- [63] Loureiro S.M., Reforço de Vasos de Pressão por Material Compósito de Matriz Polimérica, tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, março de 1999.

- [64] *Handbook of Polymer Composites for Engineers*, Woodhead Publishing Limited, England, 1994.
- [65] Silva I.C., Utilização da Técnica Ultra-sônica do tempo de percurso da onda difratada no dimensionamento de descontinuidades, tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1999.

O Ensaio Ultra-sônico

1. Características Gerais do Ultra-som

1.1 Princípios físicos do ultra-som

O teste ultra-sônico de materiais é feito com o emprego de ondas mecânicas ou acústicas colocadas no meio em inspeção [2]. 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 a que compõem executem um movimento de oscilação em torno da posição de equilíbrio, cuja amplitude do movimento será diminuída com o tempo, em decorrência da perda da energia adquirida pela onda. Se assumirmos que o meio em estudo é elástico, ou seja que as partículas que compõem não estão rigidamente ligadas, mas que podem oscilar em qualquer direção, então podemos classificar as ondas acústicas em três categorias [1,2]:

- Ondas longitudinais São ondas cujas partículas do meio vibram na mesma direção da propagação da onda.
- Ondas transversais Uma onda transversal é definida, quando as partículas do meio vibram na direção perpendicular ao de propagação. As ondas transversais são praticamente incapazes de se propagarem nos líquidos e gases, pela característica das ligações entre partículas, destes meios.
- Ondas Superficiais (tipo Rayleigh e tipo Creep)– São assim chamadas, pela característica de se propagar na superfície dos sólidos ou líquidos.
- Ondas de Lamb Consistem de uma vibração complexa das partículas ao longo da espessura de chapas muito finas (na ordem de um comprimento de onda).

A propagação de ondas ultra-sônicas segue as leis de propagação de ondas elásticas em meios contínuos, sendo aplicáveis os conceitos de comprimento de onda, ciclo, freqüência, amplitude, velocidade e atenuação, normalmente associados a essas leis [35]. A relação entre a velocidade do som, a freqüência e o comprimento de onda é dado pela equação

$$v = \lambda.f \tag{1}$$

onde v é a velocidade de propagação da onda no material

 λ é o comprimento de onda

f é a freqüência ultra-sônica

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

Inversamente, ocorre a deformação do cristal quando uma diferença de potencial elétrico é aplicada entre as duas faces opostas do cristal (efeito piezelétrico reverso). Uma corrente elétrica alternada gera vibrações mecânicas no cristal na freqüência correspondente à freqüência de excitação. Estes cristais são chamados de transdutores por transformar energia de um tipo em outro.

1.2 Comportamento das ondas sônicas

Quando as onda sônicas que percorrem um material atingem uma interface com um segundo material, parte da energia acústica incidente é refletida e parte é transmitida para o segundo meio. A característica que determina a quantidade de energia que é transmitida ou refletida é a impedância acústica dos materiais que compõem a interface.

A impedância acústica é definida como o produto da massa específica pela velocidade sônica do material

$$Z = \rho . v \tag{2}$$

onde Z é a impedância acústica

 ρ é a massa específica

v é a velocidade de propagação

A. Incidência normal

Quando o ângulo de incidência é 0°, o coeficiente de reflexão (R), que é a razão entre a intensidade do feixe refletido e a intensidade do feixe incidente, e o coeficiente de transmissão (T), que é a razão entre a intensidade do feixe transmitido e a intensidade do feixe incidente, são dados respectivamente por

$$R = \frac{I_r}{I_i} = \frac{(Z_2 - Z_1)^2}{(Z_2 + Z_1)^2}$$
(3)

$$T = \frac{I_t}{I_i} = \frac{4(Z_2 \cdot Z_1)}{(Z_2 \cdot Z_1)^2}$$
(4)

onde R é o coeficiente de reflexão

T é o coeficiente de transmissão

Ii é a intensidade do feixe incidente

 I_r é a intensidade do feixe refletido

 I_t é a intensidade do feixe transmitido

 Z_1 é a impedância acústica do meio 1

 Z_2 é a impedância acústica do meio 2

B. Incidência oblíqua

Quando a incidência do feixe sônico ocorre sob um ângulo diferente de zero (incidência norma), fenômenos de conversão de modo, refração e mudança de direção do feixe sônico precisam ser considerados. Essas mudanças dependem do ângulo de incidência e das velocidades sônicas dos feixes que deixam a interface no ponto de contato.

A lei geral que descreve o comportamento das ondas sônicas em interfaces é conhecida como lei de Snell,e pode ser expressa como

$$\frac{\operatorname{sen}\alpha}{\operatorname{sen}\beta} = \frac{v_1}{v_2} \tag{5}$$

sendo α o ângulo de incidência

 β o ângulo de reflexão ou refração

 v_1 a velocidade do som no meio 1

 v_2 a velocidade do som no meio 2

C. Atenuação

A intensidade do feixe sônico recebido por um transdutor é consideravelmente menor do que a intensidade inicial de transmissão. Os principais fatores responsáveis por esta perda de intensidade são classificados como: perdas por transmissão, efeitos de interferência e dispersão do feixe.

As perdas por transmissão incluem absorção, espalhamento e efeito da impedância acústica das interfaces. Os efeitos de interferência incluem a difração e outros efeitos que causam deslocamento de fase ou deslocamento da freqüência da onda. A dispersão do feixe envolve basicamente a transição de onda plana para onda cilíndrica ou esférica, dependendo da forma da face do cristal transdutor

1.3 O campo sônico

1.3.1 Princípio de Huygens

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 A1.



Figura A1. Sistema de ondas circulares, de comprimento de onda " λ ", provenientes dos pontos 1, 2 e 3.

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 relevante, entretanto ao afastarmos, as dimensões do cristal passam a ser irrelevantes no que diz respeito à forma do campo sônico.

1.3.2 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 (figura A2).

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.

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 freqüência sônica. As expressões a seguir são usadas para calcular o comprimento do campo próximo.

Cristal circular

$$N = \frac{D_{ef}^2 \cdot f}{4V} \tag{6}$$

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

$$N = 1.3 \frac{M_{ef}^2 \cdot f}{V} \tag{7}$$

onde:

N = Campo próximo

V = Velocidade da onda

f = Freqüência

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

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



Figura A2. Variação da intensidade da pressão sônica no campo próximo.

1.3.3 Campo distante

Após o 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. 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, chamamos então de campo distante ou zona de Fraunhofer (figura A3).

Morfologia do Feixe Sônico.



Figura A3. Regiões do feixe sônico: Campo próximo, zona de transição e campo distante.

1.3.4 Lóbulos laterais e divergência de feixe.

O campo gerado por um transdutor é composto de vários lóbulos, como podemos ver na figura A4. 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 A5). Este efeito é conseqüência da divergência do feixe sônico, após percorrido à 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 A6).


Figura A4. A intensidade do feixe traçado em coordenadas polares.



Figura A5. Coordenadas polares



Figura A6. Divergência do feixe sônico.

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

$$\beta = sen^{-1}(\frac{0.61\lambda}{a}) \tag{8}$$

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 (8). Para transdutores não circulares, o ângulo de divergência é mais precisamente encontrado experimentalmente.

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.

1.3.5 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 o 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 A7. 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 A8) e a 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 A9. O grau de focalização é determinado pela razão entre o comprimento do campo próximo (N) e o raio de curvatura R :

Focalização fraca: $2 \ge N / R > 0$ Focalização média: $2\pi \ge N / R > 2$ Focalização forte: $N / R > 2\pi$



Figura A7. a) A frente de onda e a forma do feixe de um transdutor de disco plano b) Transdutor focalizado em forma de esfera.



Figura A8. O raio "a" e o raio de curvatura "R" usado para calcular o grau de focalização usando um transdutor em forma de esfera.



Figura A9. a) Focalização fraca b) Focalização média c) Focalização forte.O grau de focalização é determinado pela razão entre o comprimento da Zona próxima (N) e o raio de curvatura (R).

Podemos notar que só é possível obter uma focalização do feixe ultra sônico no campo próximo, no começo do 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 comprimento da zona focal é ilustrado na figura A10. Existe uma expressão simples para a largura desta zona, que é mostrado na figura A10.



Figura 10. A zona focal.

Focalização não só diminui a largura do feixe ultra sônico, mas também aumenta a intensidade do feixe no foco, como resultado da concentração de potência do feixe dentro de uma área menor. Gráficos da intensidade axial contra a distância do transdutor, são mostrados na figura A11, Podemos perceber que a máxima intensidade não é no raio de curvatura, mas entre este ponto e o transdutor.



Figura A11. A variação de intensidade ao longo do feixe de transdutores focalizados para vários graus de focalização.

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 A12.



Figura A12. Focalização por a) lentes, b) geometria do transdutor, c) espelho côncavo.

2. Fatores que influenciam o ensaio por ultra-som

O ensaio ultra-sônico fornece informações a respeito de diversos aspectos do material, como: espessura, atenuação, forma, presença de defeitos e tamanho e orientação dos mesmos [1,37]. Esses resultados se baseiam em duas informações principais: a amplitude do sinal e o tempo de chegada do mesmo. O conteúdo em freqüência do sinal também fornece informações importantes, mas essas ainda são utilizadas em menor escala. Diversas são as variáveis, entretanto, que afetam os resultados obtidos pelo ensaio ultra-sônico.

Normalmente algumas considerações a respeito das condições do ensaio são feitas, e ao se realizarem os experimentos considera-se que as mudanças no tempo ou na amplitude são decorrentes de variações no parâmetro de interesse. Isso ocorre, por exemplo, quando se faz uma medida de espessura de um determinado corpo de prova, onde se considera que a velocidade de propagação do ultra-som no corpo seja a mesma do bloco utilizado para a calibração. Considera-se também que a temperatura do corpo e do bloco não sejam relevantes. Essas considerações podem afetar os resultados do teste.

As variáveis que influenciam os testes podem ser divididas em: performance do instrumento, performance do transdutor, variações no material e variações no defeito. Outro fator relevante para os resultados obtidos pela inspeção é o fator humano, que não será aqui discutido.

Variações no instrumento de medição (como nos amplificadores, mostradores, etc.) introduzirão erros que devem ser evitados através de checagens e manutenções periódicas. Imprecisões nos componentes do aparelho podem afetar o tempo, a amplitude e o conteúdo em freqüência do sinal ultra-sônico [2].

Assim como o aparelho, o transdutor deve ser freqüentemente checado e monitorado para que sejam detectadas quaisquer mudanças que afetem a confiabilidade do ensaio. Devem ser verificados itens como: freqüência dominante, comprimento do pulso, zona morta, campo próximo, relação sinal-ruído, perfil do feixe sônico, entre outros [2].

Entre as condições referentes ao material a ser examinado podem ser destacadas as condições da superfície (rugosidade, recobrimentos, acoplamento), a geometria e tamanho da peça examinada (diferenças entre a peça e o bloco de calibração, superfícies curvas), e a

estrutura interna do material (diferenças no tamanho de grão, na atenuação, no espalhamento).

Quatro fatores são importantes para a resposta obtida por um defeito: tamanho e geometria, localização em relação às superfícies próximas, orientação do eixo maior do defeito e tipo de descontinuidade e condição de reflexão. Todos esses fatores podem, separadamente ou em conjunto, influenciar a resposta obtida.

Cabe ressaltar que uma dificuldade inerente ao estudo do ultra-som em metais está relacionada à policristalinidade dos mesmos. A banda de freqüências útil para o teste ultrasônico de metais está compreendida entre 0,5 e 12 MHz, resultando em comprimentos de onda entre 11,9 e 0,5 mm aproximadamente para ondas longitudinais, e entre 6,5 e 0,3 mm para ondas transversais. Como esses comprimentos de onda são da mesma ordem de grandeza dos grãos que constituem o material, surge um ruído microestrutural no sinal obtido. Esse ruído diminui a razão sinal-ruído (Signal to Noise Ratio – SNR), diminuindo a qualidade dos resultados e dificultando a sua avaliação.

Como a atenuação aumenta com o aumento da freqüência, a escolha da freqüência a ser utilizada no ensaio é um compromisso entre a resolução requerida (capacidade de diferenciar objetos que estejam próximos; quanto maior a freqüência, maior a resolução) e a penetração necessária (que requer menores freqüências para maiores penetrações).

3. Métodos e técnicas principais de ensaio

3.1 Método Pulso-eco

Nesse método o transdutor emite pulsos de energia sônica em intervalos regulares. Se esses encontrarem uma superficie refletora, parte da energia é refletida e retorna ao transdutor, que converte as vibrações em energia elétrica. Tanto a quantidade de energia refletida quanto o tempo decorrido entre a transmissão e a recepção são medidos pelo aparelho [1,2].

Normalmente é utilizado apenas um transdutor, que cumpre alternadamente as funções de emissor e receptor (figura A13).



Figura A13 – Método pulso-eco

É o método mais utilizado, principalmente por ser de aplicação mais simples, exigindo poucos dispositivos ou equipamentos, e por requerer o acesso a apenas uma superfície.

O ensaio do tipo pulso eco possui 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.

3.2 Método por transparência

O método por transparência usa 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 está 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 consequentemente menor ou nulo será o sinal recebido pelo transdutor receptor (figura A14).



Figura A14. Técnica da transmissão Direta.

A transmissão direta pode ser utilizada para detecção de descontinuidades ou para caracterização de materiais e para medidas de espessura, especialmente para peças que são 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 ultra-sônico 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 e o tamanho do defeito;
- Os dois transdutores devem estar alinhados, e acoplados, 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.

3.3 MétodoTandem.

O método Tandem (figura A15) 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.

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 A15. Técnica Tandem. Utilizada normalmente em grandes espessuras, para detecção de defeitos perpendiculares à superfície da peça.

Diversos transdutores podem ser alinhados para receber o sinal transmitido, auxiliando a determinação da profundidade ideal para a detecção da descontinuidade.

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 A16(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:

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

Se a descontinuidade é planar (figura A16(b)), então o transdutor transmissor recebe reflexões tais que:

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



Figura A16. Teste ultra-sônico por técnica tandem para caracterização:a) de descontinuidades esféricas b) de descontinuidades planares.

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.

3.4 Método Delta.

A técnica delta foi desenvolvida para inspeção de descontinuidade em soldas. Opera com um transdutor angular como emissor e outro normal ou reto como receptor. O transdutor receptor posicionado normal a superfície do objeto de teste, detecta ondas espalhadas, conforme (figura A18).



Figura A18. Técnica Delta. Utilizada normalmente em grandes espessuras.

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 da 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 o 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.

3.5 Método por ressonância

Esse método baseia-se em que uma onda elástica entra em ressonância quando a espessura da peça é igual a um número inteiro de meios comprimentos de onda. O método utiliza um feixe contínuo, e a freqüência é variada até que a peça entre em ressonância. Isto é percebido pelo grande aumento na intensidade sônica neste momento.

3.6 Transdutor duplo cristal.

Transdutor duplo cristal, 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 (figura A19). 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 A19. (a) Esquema básico do cabeçote duplo cristal(b) Campo sônico no cabeçote duplo cristal.

O transdutor duplo cristal foi projetado para superar problemas encontrados no transdutor simples para a inspeção de materiais muito finos ou quando necessita detectar descontinuidades próximo a superfície. Quando o cristal piezelétrico é excitado, este vibra e gera uma onda elástica. A vibração do cristal tem uma duração finita. Durante este tempo, o cristal não pode atuar como receptor para o eco refletido. Isto é chamado de zona morta e pode estender-se por diversos milímetros dentro do objeto de teste para transdutores de baixa freqüência.

Em aplicações onde as descontinuidades estão localizadas em uma grande distância, a zona morta não é um problema. Para localização e caracterização 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.

3.7 TOFD – Tempo de Percurso da Onda Difratada ("Time of Flight Diffraction").

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 A20), esta diferença em tempo pode ser usada para localizar e dimensionar a trinca [4,5,10,11,15,65].

A figura (A20), ilustra um arranjo típico para TOFD. Dois transdutores, um emissor 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; (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 A20. a) Arranjo típico para TOFD. b) Modelo típico de pulsos de uma descontinuidade gerados pela técnica TOFD.

A figura (A21), é uma representação simplificada para a geometria do método TOFD, onde os transdutores são separados por uma distância 2S:



Figura A21. Geometria generalizada para o método do tempo de percurso da onda difratada.

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, repetitividade, e insensibilidade às condições da superfície de solda. A técnica do tempo de percurso da onda difratada é freqüentemente usada para dimensionar as descontinuidades 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.

3.8 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 descontinuidades. 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 controle significativo 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.

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.

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 são largamente utilizados para a formação de imagem ultrasônica em medicina, mas tem seu uso limitado em testes não destrutivos em engenharia, principalmente devido a complexidade e custo do sistema.

4. Mostradores de sinais

A digitalização do sinal aliada ao posicionamento automático do transdutor permite a aplicação de várias técnicas de reconstrução de imagens aplicada aos END. 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. Atualmente, no entanto, tem sido utilizada uma nova forma de visualização, que busca reconstruir os defeitos tridimensionalmente [1,2,16,37,54,57,58,59].

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 A21). O tamanho das descontinuidades pode ser estimado por comparação da altura do eco da descontinuidade com um outro refletor de tamanho conhecido. A localização da descontinuidade (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. O uso do mostrador tipo A não é limitado à detecção e caracterização de descontinuidades. Ele pode ser utilizado também para medição de espessuras, velocidade sônica, atenuação e geometria do feixe sônico.



Tempo

Figura A21. 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. O modo B-scan

pode ser entendido como uma seção transversal do material, produzida ao longo da linha de varredura, pela composição de diversos A-scans (figura A22). Indicações oriundas de interfaces internas (descontinuidades) também são mostradas em perfil, onde podem ser determinadas as dimensões e orientações destas.



Figura A22. 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.

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 A23). Os resultados são graficamente representados de forma a ilustrar uma vista em planta da peça, com a dimensão e posição das possíveis descontinuidades.



Figura A23. Exemplo do modo C-scan. A varredura do transdutor é bidirecional e a descontinuidade é representada numa escala de cores.

Os outros dois outros modos de apresentação de imagens comumente encontrados são a vista em perspectiva ou 3D e o D-scan. Este último é particularmente utilizado quando se trata de imagens de defeitos longitudinais em cordões de solda, pois permite o dimensionamento longitudinal do defeito e da sua altura na direção da espessura do material. O D-scan é a vista de uma seção longitudinal do material na direção de varredura, formando uma imagem que é perpendicular à obtida por um B-scan.