

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA MECÂNICA**

Roney Fonseca

**DETECÇÃO E ANÁLISE DE DEFEITOS EM SOLDAGEM
UTILIZANDO A TÉCNICA TOFD**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Ciências em Engenharia Mecânica.

Área de Concentração: Projeto e Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Sebastião Carlos Da Costa

**Dezembro de 2015
Itajubá - MG**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA MECÂNICA**

Roney Fonseca

**DETECÇÃO E ANÁLISE DE DEFEITOS EM SOLDAGEM
UTILIZANDO A TÉCNICA TOFD**

Dissertação aprovada por banca examinadora em 10 de Dezembro de 2015, conferindo o título de **Mestre em Ciências em Engenharia Mecânica.**

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Sebastião Carlos da Costa

Prof. Dr. Edmilson Otoni Corrêa

Prof. Dr. Luiz Fernando Teixeira Soares
Ribeiro

**Itajubá
2015**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
INSTITUTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**DETECÇÃO E ANÁLISE DE DEFEITOS EM
SOLDAGEM UTILIZANDO A TÉCNICA TOFD**

Autor: Roney Fonseca

Orientador: Sebastião Carlos da Costa

Itajubá, Dezembro de 2015

MG – Brasil

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
INSTITUTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

DETECÇÃO E ANÁLISE DE DEFEITOS EM
SOLDAGEM UTILIZANDO A TÉCNICA TOFD

Autor: **Roney Fonseca**

Orientador: **Sebastião Carlos da Costa**

Curso: **Mestrado de Engenharia Mecânica**

Área de Concentração: **Projeto e Fabricação**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Itajubá, Dezembro de 2015

MG – Brasil

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
INSTITUTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**DETECÇÃO E ANÁLISE DE DEFEITOS EM
SOLDAGEM UTILIZANDO A TÉCNICA TOFD**

Autor: **Roney Fonseca**

Orientador: **Sebastião Carlos da Costa**

Composição da Banca Examinadora:

Prof. Dr. Luiz Fernando Teixeira Soares Ribeiro – CONSULTOR TÉCNICO

Prof. Dr. Edmilson Otoni Corrêa – IEM/UNIFEI

Prof. Dr. Sebastião Carlos da Costa – IEPG/UNIFEI

Dedicatória

À minha família em especial a minha esposa e ao meu filho.

Agradecimentos

Ao meu orientador professor Dr. Sebastião Carlos da Costa, pelo conhecimento, ajuda e paciência.

A todos amigos (as) que me ajudaram nesta empreitada.

Ao professor Edmilson Otoni Corrêa pelo apoio e conselhos.

A todos os professores que participaram de minha formação na UNIFEI.

À CAPES pelo apoio financeiro que permitiu a realização deste trabalho.

Resumo

Fonseca, R. (2015), Detecção e Análise de Defeitos em Soldagem Utilizando a Técnica TOFD, Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá – MG.

A técnica TOFD – do inglês *Time of Flight Diffraction* – permite uma simplificação dos padrões tradicionais utilizados na detecção de defeitos se comparado aos métodos convencionais de inspeção por ultrassom. Em função da utilização de dois transdutores (emissor/receptor) cujas ondas se propagam de forma longitudinal, a difração das ondas permite a caracterização de defeitos internos de forma mais rápida e eficaz. Em função das ondas ultrassônicas serem emitidas longitudinalmente, a frequência do transdutor, bem como o ângulo de propagação dos sinais, influenciam no dimensionamento dos defeitos.

Para avaliar estas influências, este trabalho utilizou a ferramenta estatística do projeto e análise de experimentos (do inglês DOE – *Design of Experiments*) na detecção de pequenas e grandes descontinuidades em um corpo de prova de aço ao carbono AISI 1020 de 20 mm de espessura. Também, analisou-se a influência da simetria e assimetria na distância entre os transdutores para com as descontinuidades bem como um processamento digital dos sinais através da utilização de transformadas de Fourier e Hilbert.

Experimentos foram realizados com transdutores de 5 MHz e 10 MHz e ângulos de 45°, 60° e 70°. Os resultados obtidos mostraram que há variações significativas na combinação transdutor/ângulo de incidência para a detecção de defeitos de pequena e grande dimensão. Analisando a influência da distância entre os transdutores emissor e receptor, observou-se que não há necessidade de o par de transdutores estar simétrico ao defeito para que este seja detectado. Porém, a qualidade dos sinais ultrassônicos, influenciados pela presença de ruídos mostrou ser impactante nestas análises, afetando os coeficientes de correlação estatística nos resultados. Neste sentido, o processamento digital dos sinais pela eliminação de ruídos através de transformadas de Fourier e Hilbert indica ser um caminho interessante para futuras análises do sistema de inspeção.

Palavras-chave: Ensaios não Destrutivos, Ultrassom, TOFD, Defeitos em Soldagem.

Abstract

Fonseca, R. (2015), Detection and Analysis of Defects in Welding Using the TOFD Technique, Dissertation (Master in Mechanical Engineering), Institute of Mechanical Engineering, Federal University of Itajubá, Itajubá – MG, Brazil

The TOFD technique – Time of Flight Diffraction - allows a simplification of traditional patterns used in defect detection compared to conventional ultrasonic inspection methods. Depending on the use of two transducers (transmitter / receiver) whose waves propagate longitudinally, the diffraction of the waves allows the characterization of internal defects more quickly and effectively. Depending on the ultrasonic waves are emitted along the frequency of the transducer as well as the signals propagating angle influences the sizing of defects.

To evaluate these influences, this study used to design statistical tools and analysis of experiments (DOE - Design of Experiments) in small detection and large discontinuities in a steel specimen AISI 1020 carbon 20 mm thick. Also, it analyzed the influence of symmetry and asymmetry in the distance between the transducers towards the discontinuities and a digital signal processing by using Fourier transform, and Hilbert.

Experiments were carried out with transducers of 5 MHz and 10 MHz and angles of 45°, 60 ° and 70 °. The results showed that there are significant variations in the combination transducer / angle of incidence for the detection of small and large defects. Analyzing the influence of the distance between the transmitter and receiver transducers, it has been observed that there is no need for the pair of transducers being symmetrical to the defect so that it is detected. However, the quality of the ultrasonic signals influenced by the presence of noise in these tests was found to be striking, thus affecting the statistical correlation coefficients in the results. In this sense, the digital processing of the signals by removing noise by Fourier transform, and Hilbert indicate to be an interesting way for future analysis of the inspection system.

Keywords: Non Destructive Testing, Ultrasound, TOFD, Welding Defects

Sumário

Sumário	i
Lista de Figuras	iii
Lista de Quadros	v
Lista de Tabelas	v
Simbologia	vi
Letras Latinas	vii
Letras Gregas	viii
Abreviaturas e Siglas	viii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Objetivos	4
1.2. Motivações e possíveis contribuições	5
1.3. Estrutura do trabalho	5
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
2.1 Inspeção por ultrassom	6
2.2. Tipo de ondas ultrasônicas	8
2.2.1. Ondas longitudinais (Ondas de compressão)	8
2.2.2. Ondas transversais (Ondas de cisalhamento)	10
2.3. Inspeção automática por ultrassom	11
2.4. Técnica de inspeção TOFD.....	13
2.4.1 Defeitos padronizados	15
2.4.2 Fundamentação matemática para TOFD.....	16
2.5. Avanços na utilização da técnica TOFD.....	21
2.6. Técnicas de projetos e análise de experimentos	24
2.6.1. Início do planejamento de análise e experimento.....	25
2.6.2. Arranjo fatorial	27
3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	29
3.1. Adaptação do banco de ensaios para TOFD	29
3.2. Corpos de prova idealizados	32
3.3. Dimensionamento de um defeito simulado via TOFD.	33
3.4. Influência da frequência e ângulos de incidência na detecção de defeitos.	34

3.5. Inspeção de chapas superiores a 10 mm utilizando TOFD.....	34
3.6. Detecção de um defeito simulado com montagem assimétrica	36
3.7. Recomposição dos sinais TOFD utilizando transformadas de Fourier e Hilbert.....	37
3.7.1. Transformadas de Fourier	37
3.7.2. Transformadas de Hilbert	38
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	40
4.1. Dimensionamento de um defeito simulado via TOFD	40
4.2. Análise da inspeção de chapas superiores a 10 mm utilizando TOFD	43
4.2.1. Análise da influência sobre a determinação da profundidade do defeito.....	46
4.2.2. Análise da influência sobre a determinação do tamanho do defeito	49
4.2.3. Análise da influência sobre a determinação da espessura da peça	50
4.3. Análise da detecção de um defeito simulado com montagem assimétrica.....	51
4.4. Recomposição e análise dos sinais TOFD utilizando transformadas de Fourier.....	52
4.5. Recomposição e análise dos sinais TOFD utilizando transformadas de Hilbert.....	55
4.5.1. Sinais filtrados	58
5. CONCLUSÕES	62
5.1. Conclusões gerais	62
5.2. Sugestões de trabalhos futuros.....	63
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.	65
ANEXOS	69

Lista de Figuras

Figura 2.1 - Determinação da descontinuidade por pulso-eco	7
Figura 2.2 - Ondas longitudinais.	9
Figura 2.3 - Ondas transversais.	11
Figura 2.4 - Fases de inspeção automática por ultrassom.	12
Figura 2.5 - Técnica de inspeção TOFD.....	13
Figura 2.6 - Comparação entre ultrassom convencional e TOFD.....	14
Figura 2.7 - Sinais TOFD para alguns defeitos em soldagem padronizados.....	16
Figura 2.8 - Esquema do sistema de inspeção TOFD.....	17
Figura 2.9 - Espectro sonoro correspondente ao tempo de vôo dos diferentes componentes. .	19
Figura 2.10 - Representação da zona quase linear entre os dois transdutores para detectar a difração de uma descontinuidade.	20
Figura 2.11 - Espaçamento entre transdutores.....	21
Figura 2.12 - Decomposição de um sinal original e sua posterior determinação do fator de eficiência	22
Figura 2.13 - Gráfico de superfície de resposta para x_1, x_2	27
Figura 3.1 - Banco de testes utilizando TOFD	30
Figura 3.2 - Detalhamento do dispositivo de fixação e posicionamento dos transdutores.....	31
Figura 3.3 – Detalhes do corpo de prova idealizado e posicionamento dos furos	32
Figura 3.4 – Corpos de prova com defeitos padronizados e suas dimensões	32
Figura 3.5 – Inspeção TOFD no furo T12.....	33
Figura 3.6 – Ângulo de incidência dos transdutores.....	34

Figura 3.7 - Posicionamento dos transdutores simétrico e assimétrico.	36
Figura 3.8 – Fluxograma da EMD.....	39
Figura 4.1 – Sinal utilizando TOFD relativo a um defeito interno, 5MHz, cunha 70°	40
Figura 4.2 – Detalhes do modo de identificação dos sinais oriundos do TOFD.....	43
Figura 4.3 – Efeitos dos fatores nos erros de avaliação relativos:(a)profundidade do defeito; (b) dimensão do defeito; (c) espessura da peça.	46
Figura 4.4 – Superfície de resposta para o erro de profundidade considerando a interação entre o ângulo de cunha na detecção de um defeito pré-definido. Transdutor de 5MHz.	47
Figura 4.5 – Superfície de resposta para o erro de profundidade relativo a interação entre a frequência e ângulo da cunha. (a) defeito 3 mm; (b) defeito 6 mm.	47
Figura 4.6 – Espectros ultrasônicos simultâneos para transdutor de 5MHz: (a) furo 3 mm, espectro azul – 45°, espectro laranja – 70°; (b) furo 6 mm, espectro azul – 45°, espectro laranja – 70°.....	48
Figura 4.7 – Superfície de resposta para o erro de tamanho do defeito considerando a interação entre a frequência do transdutor; ângulo de cunha 70°	49
Figura 4.8 – Influência da interação entre a frequência do transdutor e o ângulo de cunha na determinação do erro de determinação da espessura da peça inspecionada.....	50
Figura 4.9 – Representação do defeito de forma simétrica e assimétrica com emissor próximo ao defeito.	51
Figura 4.10 – Representação do defeito de forma simétrica e assimétrica com receptor próximo ao defeito.....	51
Figura 4.11 – Sinais recompostos (a) 5 MHz e 45°; (b) 5 MHz e 60°; (c) 5 MHz e 70°.....	53
Figura 4.12 – Comparação entre os diferentes espectros ultrasônicos sob diferentes ângulos de emissão das ondas longitudinais.....	54
Figura 4.13 – Sinal típico de TOFD.....	55
Figura 4.14– Exemplo da aplicação da EMD.....	56
Figura 4.15 – Espectro de Hilbert.....	58
Figura 4.16 – Inspecção TOFD em uma chapa soldada, junta de topo, chanfro V, com defeito de uma trinca.....	59

Figura 4.17 – Sinal TOFD de um furo de 3 mm e sinal reconstituído através da EMD.....	59
Figura 4.18 – Sinal TOFD de uma trinca de 3 mm e sinal reconstituído através da EMD.....	60
Figura 4.19 – Transformadas de Hilbert para os sinais de TOFD do furo e trinca	61

Lista de Quadros

Quadro 2.1 - Características fundamentais do projeto e análise de experimentos.	26
--	----

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Característica sônica de alguns materiais.....	10
Tabela 3.1 - Especificação e características dos transdutores e aparelho.	31
Tabela 3.2 - Fatores experimentais e níveis.	35
Tabela 4.1- Resultados obtidos para análise da influência do ângulo e frequência dos transdutores para dois defeitos diferentes.....	44
Tabela 4.2 - Análise de variância dos resultados.....	45
Tabela 4.3 - Análise de variância dos resultados eliminando fatores pouco significativos.	45
Tabela 4.4 - Energia dos modos obtidos pela EMD para o furo de 3 mm.	60
Tabela 4.5 - Energia dos modos obtidos pela EMD para trinca de 3 mm.	60

Simbologia

Letras Latinas

f	Frequência
C	Velocidade do som
VL	Velocidade da onda longitudinal
VT	Velocidade da onda transversal
R ²	Ajuste do modelo matemático em relação ao modelo real
E	Transdutor emissor de ondas
R	Transdutor receptor de ondas
d	Distância da falha à superfície da peça
L	Comprimento da falha
P1	Caminho do som parte superior da falha
P2	Caminho do som parte superior da falha
P3	Caminho do som parte inferior da falha
P4	Caminho do som parte inferior da falha
tL	Tempo correspondente ao eco de entrada
t1	Tempo correspondente à parte superior do defeito
t2	Tempo correspondente à parte inferior do defeito
tgw	Tempo correspondente da parte inferior da peça
S	Distância entre os transdutores
H	Espessura da peça

Letras Gregas

λ	Comprimento de onda
β_i	Coefficientes a serem estimados
ε	Erro experimental.
α	Nível de significância para o Minitab
θ	Ângulo de incidência da onda

Abreviaturas e Siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	American Iron and Steel Institute
ANOVA	Análise de Variância
AWS	American Welding Society
BS	British Standard
DOE	Design of Experiments
END	Ensaio Não Destrutivo
IMF	Intrinsic Mode Functions
MHz	MegaHertz
TOFD	Time of Flight Diffraction
FFT	Fast Fourier Transform

Capítulo 1

1. INTRODUÇÃO

A inspeção não destrutiva por ultrassom tem se mostrado extremamente eficaz e razoavelmente econômica como meio efetivo de comprovação da qualidade, contribuindo de forma significativa e decisiva para a detecção e avaliação de descontinuidades internas em várias áreas da engenharia. O crescimento do teste por ultrassom acompanha em grande parte o desenvolvimento em eletrônica e posteriormente os computadores. Os primeiros trabalhos realizados na Europa e nos Estados Unidos, na década de 1930, demonstraram que as ondas sonoras de alta frequência refletem de modo previsível em defeitos ocultos ou extremidade de materiais, produzindo padrões de ecos distintos que podem ser exibidos na tela de um osciloscópio. O desenvolvimento do sonar durante a Segunda Guerra Mundial deu um novo impulso nas pesquisas sobre ultrassom. Em 1945, o pesquisador norte-americano Floyd Firestone patenteou um instrumento chamado Refletoscópio Supersônico, que é, normalmente, considerado o primeiro detector de defeito por ultrassom comercial que usava a técnica de pulso/eco comumente empregada atualmente.

Desde então, as leis da física que governam a propagação das ondas sonoras de alta frequência através de materiais sólidos têm sido utilizadas para detectar fissuras escondidas, lacunas, porosidades e outras descontinuidades internas em metais, compósitos, plásticos e cerâmica, assim como para a medição de espessura e análise das propriedades do material. O teste por ultrassom é um ensaio não destrutivo e seguro, e é um método de teste bem estabelecido em muitos processos indústrias de serviço, manufatura básica, especialmente em aplicações que envolvem soldas e metais estruturais Olympus NDT (2015).

Entretanto, a despeito de suas potencialidades, a técnica de inspeção ultrasônica exige conhecimentos apurados para sua perfeita utilização, sendo esta uma das dificuldades para uma melhor inserção deste método de inspeção para utilizações nas indústrias.

Várias técnicas de inspeção têm sido pesquisadas de forma muito intensa ultimamente no sentido de facilitar e ampliar a capacidade de utilização da técnica ultrasônica. Dentre estas, muitos trabalhos científicos se concentram no esforço de desenvolvimento de sistemas conjugados com análises computacionais que permitam uma melhor interpretação dos sinais ultrasônicos, os quais servem de base para a implementação de sistemas inteligentes, culminando com a implementação de sistemas de inspeção automáticos. De fato, a técnica de inspeção por ultrassom tem se revelado como uma área muito interessante para a utilização de análises baseadas no processamento de sinais, cujo objetivo final sempre é o de extrair informações adicionais que permitam uma melhor caracterização dos sinais ultrasônicos e sua inter-relação com os tipos de defeitos mais comumente presentes em estruturas, principalmente aquelas oriundas de juntas soldadas.

Entre as formas de processamento dos sinais digitais há muitas citações na literatura correlacionando o seu processamento através da utilização de redes neurais conjugados com reconhecimento de padrão (Moura, et. al, 2004), recomposição de sinais utilizando as transformadas de Hilbert (Chen, et. al, 2005), transformadas de Fourier e transformadas Wavelets (Moura, et. al., 2004) entre outras. O que se objetiva de forma genérica através destes trabalhos científicos é melhorar a qualidade dos sinais ultrasônicos pela eliminação de ruídos indesejáveis e desta forma permitir uma interpretação mais precisa dos resultados. Como consequência, pretende-se desenvolver uma forma de implementar sistemas que permitam inspeções automáticas, o qual ao interagir com o usuário ou profissional competente, possa auxiliá-los em inspeções executadas basicamente de forma on-line e com grande precisão e versatilidade na identificação e caracterização de defeitos ou falhas internas. Como resultado esperado sempre há a menção de que tais sistemas poderiam permitir uma agilidade no processamento das informações culminando com uma melhoria na confiabilidade dos resultados. Entretanto, a despeito de suas citadas vantagens e avanços que o processamento digital dos sinais ultrasônicos tem permitido até o momento, tal sistema ainda não logrou êxito completo. Como citam Moura et. al (2004), ainda há muito espaço para novos desenvolvimentos nesta área, principalmente no que se relaciona à decomposição dos sinais e suas posteriores análises.

Os métodos tradicionais de inspeção ultrasônica usam o tempo de percurso e a amplitude do som para localizar e dimensionar uma suposta falha interna nos materiais. Entretanto, para uma avaliação mais precisa dos defeitos, a amplitude nem sempre é

suficiente, já que pode ser influenciada não apenas pelo tamanho do refletor, mas também por vários fatores como rugosidade, transparência e orientação do defeito (Chen et. al., 2005). Para sobrepor estas limitações novas técnicas vêm sendo pesquisadas, desenvolvidas e inseridas entre os métodos de inspeção por ultrassom. Dentre estas técnicas se destaca a baseada no tempo da onda difratada e denominada de TOFD.

A utilização de técnicas baseadas na difração de ondas ultrasônicas tem sido pesquisada de forma intensa principalmente pela real possibilidade de que tal técnica denominada TOFD – do inglês *Time of Flight Diffraction* ou Tempo de Percurso Difrato – permite uma simplificação das inspeções ultrasônicas. Isto pode refletir em um primeiro instante na ampliação da capacidade de utilização da inspeção ultrasônica e, num segundo estágio, na extensão de seu campo de atuação. Entretanto, por ser uma técnica de inspeção relativamente recente, já que foi inicialmente introduzida em 1985 no Harwell Center (UK) como uma resposta a insistentes anseios no dimensionamento mais preciso de defeitos em vasos de reatores nucleares soldados (Riahi & Abolhasany, 2006) entre outros, observa-se que maiores estudos e desenvolvimentos a respeito dessa técnica se tornam necessários para permitir a ampliação de suas potencialidades.

A técnica TOFD baseia-se na interação das ondas ultrasônicas com as extremidades das descontinuidades. Desta interação resulta a emissão de ondas difratadas numa vasta gama de ângulos. A detecção de ondas difratadas torna possível estabelecer a presença de descontinuidades. O tempo de percurso dos sinais registrados incidentes nas extremidades do defeito permite a medida da altura da descontinuidade bem como o seu posicionamento, diferentemente dos métodos tradicionais que são muitas vezes afetados pela orientação não favorável das descontinuidades, podendo conduzir a desvios do feixe sônico. Em função de seu potencial, esta técnica tem permitido a substituição de métodos tradicionais de inspeção por Raios X ou inspeções ultrasônicas Tandem. A limitação do TOFD se dá na inspeção de chapas mais finas, já que nestas condições há superposição dos sinais e, conseqüentemente, dificuldades na interpretação dos sinais, diminuindo muito a precisão dos resultados. Entretanto, Baskaran et al. (2006) ressaltam que pesquisas têm se concentrado no sentido de sobrepor esta dificuldade observando-se uma predominância de trabalhos que avaliam a propagação das ondas transversais ao invés de ondas longitudinais, associado à utilização de transdutores na faixa de 4 a 8 MHz.

Pelo exposto fica claro a importância da técnica TOFD. Entretanto muitos aspectos desta técnica necessitam serem estudados. Neste trabalho, foi avaliada a influência da utilização de transdutores em diferentes níveis de frequência com propagação dos sinais em diferentes angulações na capacidade de detecção de defeitos previamente dimensionados. Para

tanto, utilizou-se como forma para orientações nas experimentações e análises, técnicas estatísticas baseadas no projeto e análise de experimentos (DOE – do inglês *Design of Experiments*). A razão para a utilização desta técnica se baseia na possibilidade de análises dos principais fatores bem como de suas interações, permitindo uma avaliação mais precisa dos resultados. Além disso, o DOE permite avaliar a qualidade dos resultados obtidos, o que pode ensejar a uma melhoria dos sinais através de um tratamento digital dos mesmos. Finalmente, uma investigação inicial do posicionamento dos transdutores em relação ao defeito também foi adicionada a este trabalho.

1.1 Objetivos

Entre os principais objetivos do trabalho, pode-se citar:

- apresentar a técnica TOFD, como uma ferramenta eficiente na detecção de defeitos internos e no seu dimensionamento;
- dimensionar, pela técnica (TOFD) refletores pré-fabricados com similaridade a porosidade, com profundidade e diâmetro conhecidos em um corpo de prova de aço AISI 1020;
- comparar os valores reais dos defeitos pré-fabricados, com os obtidos pelo (TOFD), analisando o erro percentual através de técnicas estatísticas, a influência da frequência dos transdutores e dos ângulos de propagação das ondas ultrasônicas na capacidade de avaliação de defeitos de pequena e grande dimensão, em condições que minimizem os erros de medição;
- determinar qual frequência de transdutor é mais adequada para detecção de pequenos e grandes defeitos;
- verificar se ângulo de cunha e, conseqüentemente, o ângulo de propagação das ondas longitudinais influencia na detecção dos defeitos? E qual cunha mais adequada para um pequeno e um grande defeito?
- analisar a influência da simetria na distância entre os transdutores emissor e receptor e sua capacidade de detecção dos defeitos;
- avaliar a aplicabilidade das transformadas de Fourier e Hilbert no tratamento dos sinais ultrasônicos pela eliminação de ruídos indesejáveis.

1.2 Motivação e possíveis contribuições

O presente trabalho foi motivado e justificado pela grande necessidade que tem as empresas do setor petrolífero, de energia, automobilístico, aeronáutico, entre outros, de mão de obra qualificada que permita uma atuação mais focada dentro dos níveis mais rígidos de inspeção impostos pelas agências de normatização internacionais. Como contribuição do presente trabalho, pretende-se avaliar a combinação mais adequada frequência/ângulo de propagação das ondas ultrasônicas e seus reflexos na capacidade de detecção de defeitos de pequena e grande dimensão através da técnica de inspeção TOFD. Além disso, o melhor acondicionamento dos sinais através de processamento digital dos mesmos permitirá avaliar comparativamente o potencial da utilização de transformadas de Fourier e Hilbert para esta finalidade. Finalmente, ao desenvolver conhecimentos específicos na área de ultrassom percebe-se que esta é, uma área carente de profissionais.

1.3 Estrutura do trabalho

Este trabalho de pesquisa está estruturado em 5 capítulos, sendo que o primeiro deles teve como função uma explanação sobre a importância da técnica de ultrassom TOFD. Dentre suas aplicações, procurou-se demonstrar a relevância da técnica e suas constantes pesquisas no meio acadêmico.

O capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica, a qual fornece uma visão geral de todas as ferramentas teóricas necessárias para o entendimento do trabalho: como os princípios básicos do ultrassom, tipos de ondas, transdutores, fundamentação teórica da técnica TOFD, filtragem dos sinais pela transformadas rápidas de Fourier e Hilbert. Aborda-se ainda, de forma superficial, técnicas estatísticas baseadas no DOE (do inglês - *Design of Experiments*)

O capítulo 3 descreve os materiais e equipamentos utilizados no trabalho, como também a forma que os sinais são adquiridos.

O capítulo 4 apresenta os resultados obtidos e as análises dos sinais adquiridos pelo TOFD, bem como as discussões pertinentes.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões deste trabalho e as sugestões para os trabalhos futuros.

Finalmente é apresentado as referências bibliográficas consultadas.

Capítulo 2

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será feita uma revisão da literatura no que concerne aos aspectos fundamentais da inspeção por ultrassom de forma genérica e, posteriormente, uma revisão da técnica TOFD objeto deste trabalho. Neste sentido, serão descritos os princípios do processo bem como os trabalhos e linhas de pesquisa mais recentes associados ao tema de estudo.

2.1 Inspeção por ultrassom

A rápida expansão tecnológica e dos processos industriais trouxe à indústria brasileira problemas de fornecimento de materiais, equipamentos e componentes com qualidade comprovada. A imposição de padrões resultou na necessidade premente de comprovação e certificação da qualidade, estimulando-se os processos de inspeção e verificação de matérias-primas e produtos acabados, qual afeta diretamente a segurança tanto o meio ambiente e os seres humanos (Lin & Her, 2014). Dentre os processos de análise, a inspeção não destrutiva por ultrassom, quando comparado a outros métodos não destrutivos, apresenta vantagens tais como elevado poder de penetração, o que torna possível a detecção de descontinuidades em grandes profundidades; alta precisão na determinação da posição e dimensionamento de descontinuidades, além de alta portabilidade (Andreucci, 2011). Por isso, tem se mostrado

extremamente eficaz e razoavelmente econômica como meio de se garantir qualidade, contribuindo de forma significativa e decisiva para a detecção e avaliação de discontinuidades internas em várias áreas da engenharia, com destaque principalmente para as juntas soldadas.

O princípio fundamental do ensaio por ultrassom está baseado na propriedade de reflexão das ondas sonoras ao incidirem em superfícies entre dois meios de diferentes características acústicas.

A energia ultrasônica é gerada a partir de um cristal piezoelétrico, associado a um conjunto eletromecânico denominado de transdutor ou cabeçote, ligado através de um cabo coaxial ao aparelho de teste. O transdutor é acoplado diretamente, na maioria dos casos, sobre a superfície de ensaio, sendo necessário o uso de líquido acoplante, tais como água, óleo, glicerina e outros, que permitem a transmissão da energia sônica gerada para o meio em inspeção.

O método que utiliza somente um transdutor ultrasônico, emitindo e recebendo as ondas ultrasônicas, denomina-se de método pulso-eco, pois a emissão se caracteriza de forma pulsada. Este método é o mais comumente utilizado. No caso da utilização de dois transdutores, um emitindo e o outro recebendo, caracteriza-se o método de transparência; neste caso as ondas são geradas e recebidas de maneira contínua.

As discontinuidades internas no material são acusticamente consideradas como regiões refletoras da energia sônica. Desta forma, as ondas refletidas na direção do transdutor poderão ser recebidas pelo mesmo (caso do método pulso-eco), induzindo um sinal elétrico que é amplificado e indicado na tela do aparelho de teste, em forma de eco. A posição do eco na tela, assim como a sua altura, depende da distância da discontinuidade ao transdutor e de sua dimensão, conforme mostrado na Figura 2.1.

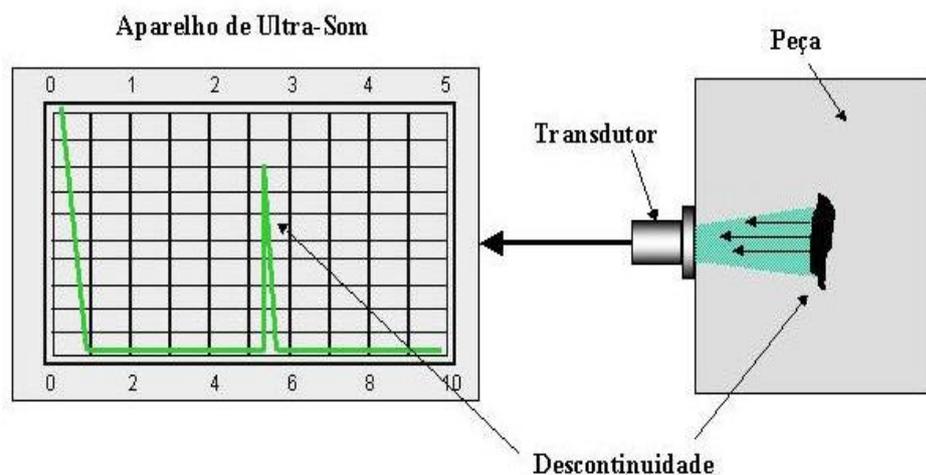


Figura 2.1: Determinação da descontinuidade via análise ultrasônica pulso-eco. Fonte:

Andreucci (2011)

Os transdutores ou cabeçotes utilizados podem ser normais (emissor de ondas longitudinais) ou angulares (emissor de ondas transversais) e normalmente operam em faixas de frequências de 0,5 MHz a 10 MHz. A escolha do transdutor ideal dependerá do tipo de aplicação. No caso dos transdutores angulares, geralmente são utilizados quando não existe acesso direto sobre a região de inspeção (caso de juntas soldadas e peças com entalhes) ou para complementação do ensaio.

2.2 Tipos de ondas ultrasônicas

Fundamentalmente, ultrassom não é diferente do som audível, ambos são simplesmente movimentos em uma substância. Caso se imagine que esta substância seja composta de pequenas partículas de matéria.

2.2.1 Ondas longitudinais (ondas de compressão)

O movimento das partículas de massa na substância é propagado de uma certa maneira e direção. Resulta um trem de onda mecânica, seja como uma onda longitudinal ou como uma onda transversal. Uma onda longitudinal é obtida quando, em um corpo de ensaio, as partículas de massa próximas à superfície são impulsionadas perpendicularmente à mesma. O primeiro plano de partículas é defletido e transfere sua energia cinética para os próximos planos de partículas, e passam a oscilar. Desta maneira, todo o meio elástico vibra em mesma direção de propagação da onda (longitudinal). Se as interligações de todas as partículas fossem positivas, todos os planos seriam defletidos ao mesmo tempo, isto é, seus movimentos estariam em fases iguais. Entretanto, desde que os átomos estejam interligados elasticamente, os próximos planos de partículas de massa ficarão retardados. Nas distâncias iguais existem compressões de planos de partículas de massa. Entre eles, encontram-se zonas diluídas com grandes distâncias entre os planos de partículas. As distâncias entre duas zonas de compressão determinam o comprimento de onda (λ). As zonas de compressão e de diluição movem-se através do corpo de prova com certa velocidade, que é a velocidade longitudinal (Figura 2.2). Esta velocidade do som é uma constante de material, isto é, ela difere de acordo com o material no qual a onda é propagada, conforme se pode observar na Tabela 2.1.

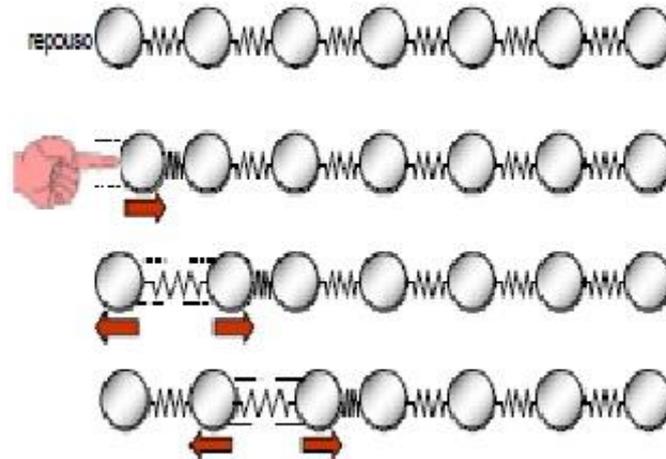


Figura 2.2: Ondas longitudinais. Fonte: Andreucci (2011).

Observando-se os movimentos de uma onda, existe além do comprimento de onda e a velocidade do som, um elemento mais interessante: a frequência. A frequência indica o número de vibrações por segundo efetuado por cada partícula de massa. A escolha da frequência adequada é muito importante no ensaio ultrasônico. A correlação matemática dos três elementos definidos, ou seja, comprimento de onda (λ), velocidade do som (v) e frequência (f) é:

$$v = f \cdot \lambda \quad (2.1)$$

Como a velocidade do som é uma constante do material, a escolha de certa frequência define o comprimento da onda ultrasônica.

O conhecimento do comprimento de onda é de significativa importância, pois se relaciona diretamente com o tamanho do defeito a ser detectado. Em geral, o menor diâmetro de uma descontinuidade a ser detectada no material deve ser da ordem de $\lambda/2$. Assim, se inspecionar um material de velocidade de propagação de 5920 m/s com uma frequência de 1 MHz, a mínima descontinuidade que poderemos detectar será de aproximadamente 2,96 mm de diâmetro.

Tabela 2. 1: Características sônicas de alguns materiais.

Material	Densidade	Velocidade Longitudinal	Velocidade Transversal	Impedância Acústica
	g/cm ³	m/s	m/s	g/cm ² .s
Alumínio	2,7	6300	3080	169.10 ⁴
Aço	7,7	5900	3230	450.10 ⁴
Ferro Fundido	-	4600	2160	-
Cobre	8,9	4700	2260	418.10 ⁴
Níquel	8,8	5630	2960	495.10 ⁴
Borracha Sintética	1,2	2300	-	27,6.10 ⁴
Ar	0,0012	330	-	0.00398.10 ⁴
Água	1,0	1483,1	-	15.10 ⁴

2.2.2 Ondas transversais (ondas de cisalhamento)

Uma onda transversal é gerada quando as partículas do meio vibram na direção perpendicular a de propagação. Neste caso se observa que os planos de partículas mantêm-se na mesma distância um do outro, movendo-se apenas verticalmente, como mostra a Figura 2.3.

As partículas oscilam na direção transversal à direção de propagação, podendo ser transmitidas somente a sólidos. As ondas transversais são praticamente incapazes de se propagarem nos líquidos e gases em virtude das características das ligações entre partículas destes meios. O comprimento de onda é a distância entre dois ‘vales’ ou dois ‘picos’. A velocidade com a qual o pico e o vale se movem através do corpo é a velocidade (v_t) da onda transversal.



Figura 2.3: Ondas transversais. Fonte: Olympus (2012).

2.3 Inspeção automática por ultrassom

A demanda por testes ultrassônicos tem crescido nos últimos anos e com isto também os pré-requisitos técnicos para alcançar as novas exigências do mercado. Desta forma novas possibilidades de aplicações têm surgido e com isto novos desafios no gerenciamento de dados têm sido buscados.

Dentre as dificuldades encontradas pelas técnicas de inspeção por ultrassom, destaca-se aquelas relacionadas às interpretações dos sinais. Nos sistemas ditos convencionais a capacidade de processamento dos dados (sinais pulso-eco) fica condicionado à habilidade do operador para a interpretação de seus resultados, as quais se revelam tarefas extremamente complexas (Cornwell & McNab, 1999). Alternativas têm sido procuradas para a realização de análises automáticas. Sob este ponto de vista, pesquisas mais recentes do processo de inspeção mostram uma aproximação constante com técnicas da inteligência artificial na correlação dos sinais ultrassônicos com os tipos de defeitos, caracterizando-os tanto na localização quanto no dimensionamento. Entre as técnicas mais utilizadas destacam-se os sistemas especialistas baseado no conhecimento, as redes neurais, sistemas fuzzy ou até mesmo os sistemas orientados a objetos conforme citado em Hoopgood (1990) e Sadoun (2001).

Para que sistemas de inspeção automática possam ser desenvolvidos é fundamental caracterizar as etapas de uma inspeção. Um sistema típico de inspeção obedece uma sequência rígida, ou seja, a inspeção é realizada sobre um corpo de prova no qual a energia ultrassônica é aplicada e a interação desta energia com o corpo de prova é armazenado pelo

sensor (transdutor) conforme é mostrado na Figura 2.4. O sinal advindo do sensor é medido pelo sistema de aquisição, sendo este sinal processado e disponibilizado em uma forma adequada para interpretação. Segundo Jarmulak (2001), o estágio de interpretação envolve as fases de detecção, classificação e caracterização. Na fase de detecção, as parcelas dos dados que contêm indicações de um defeito são selecionados. Isto pode ser feito, por exemplo, através de diferenças de amplitudes dos sinais. Na fase de classificação, os defeitos são predefinidos de acordo com algumas categorias, por exemplo, diferenciação entre defeitos planares e defeitos esféricos. Na fase de caracterização, os prováveis defeitos são determinados de acordo com suas características. Usualmente, a fase de caracterização permite dimensionar o defeito, o qual juntamente com a classificação fornece informações a respeito da severidade da falha encontrada. Finalmente, a combinação de informações permite a elaboração de um diagnóstico da inspeção em curso.

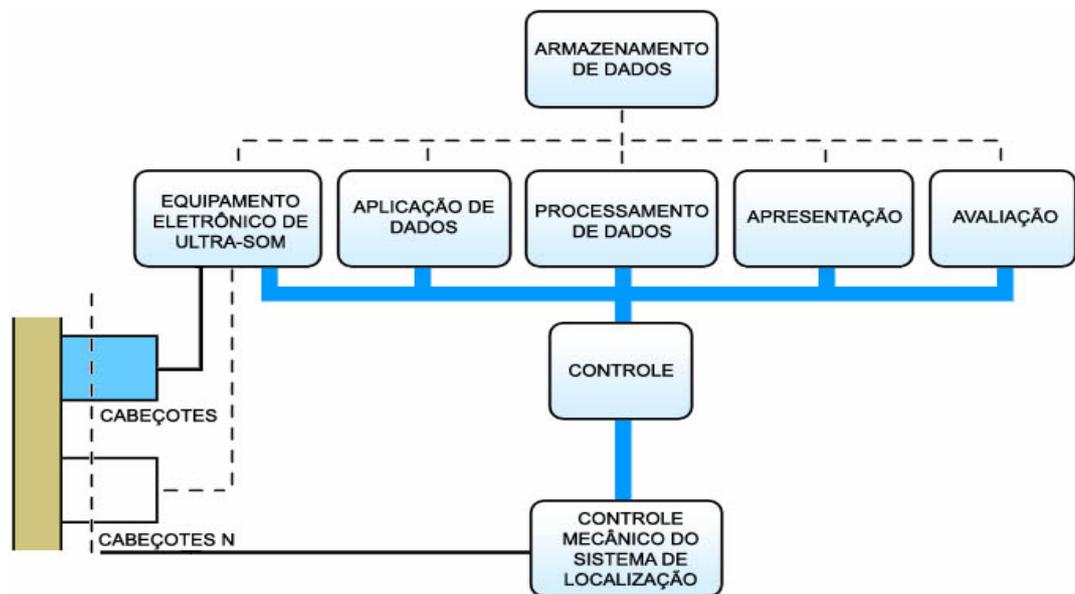


Figura 2.4: Fases de inspeção automática por ultrassom. Fonte: Barbian (2004).

Inspeções automáticas por ultrassom utilizando técnicas de inteligência artificial têm sido observadas em diversas áreas como descreve Rajagopalan et al. (1997). Para citar alguns avanços, Jarmulak (2001) utilizou sistemas baseados em casos (CBR) para a interpretação de dados em inspeção ultrassônica. Tal sistema tem sido aplicado em inspeções periódicas de trilhos na malha ferroviária alemã. Cornwell (1999), por sua vez, propôs uma forma de análise integrando sistemas especialistas e lógicas fuzzy. Siqueira (2001) utilizou redes neurais aplicados a análises ultrassônicas em inspeções de grandes distâncias. Mais recentemente, tem se procurado ampliar a busca por sistemas automáticos utilizando novas técnicas de inspeção. Dentre estas técnicas uma das mais difundidas é a técnica TOFD a qual permite uma

simplificação no modo de inspeção, facilitando a sua implementação em sistemas automáticos como destaca Moura et. al. (2004).

2.4 Técnica de inspeção TOFD

A técnica de inspeção TOFD – *Time of Flight Diffraction* – é uma técnica de inspeção recente que permite, através da utilização de dois transdutores de mesma frequência e dispostos simetricamente em relação ao local de inspeção emitindo ondas longitudinais com angulação para determinar a presença e dimensionamento de descontinuidades através da análise do tempo de percurso difratado.

A técnica TOFD baseia-se na interação das ondas ultrasônicas com as extremidades das descontinuidades. Desta interação resulta a emissão de ondas difratadas numa vasta gama de ângulos. A detecção de ondas difratadas torna possível estabelecer a presença de descontinuidades conforme mostrado na Figura 2.5. O tempo de percurso dos sinais registrados incidentes nas extremidades do defeito permite a medida da altura da descontinuidade e, conseqüentemente, o seu dimensionamento, pelo fato que a onda será difratada ao impactar com a descontinuidade, fazendo com que a mesma vibre com a mesma frequência da onda incidente. Assim, diferentemente dos métodos tradicionais qual a onda é refletida pelo sinal da descontinuidade e muitas vezes estes sinais, são afetados pela orientação não favorável das descontinuidades conduzindo a desvios do feixe ultrasônico.

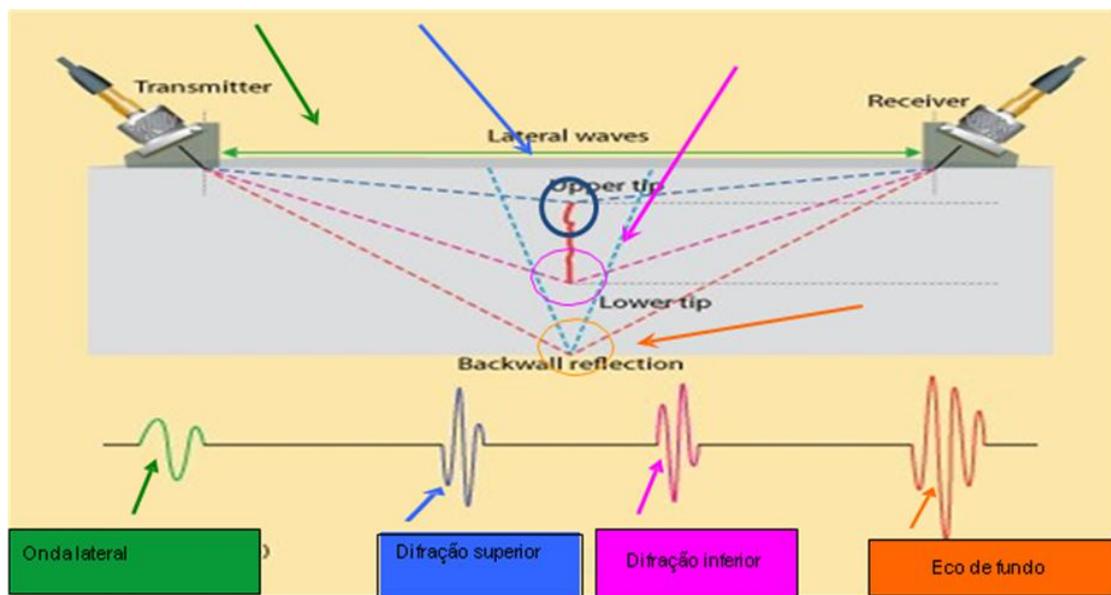


Figura 2.5: Técnica de inspeção TOFD.

Ao se comparar a técnica convencional de ultrassom com a técnica TOFD, Figura 2.6, percebe-se que nesta os sinais difratados nos extremos do defeito podem ser facilmente captados pelo transdutor receptor que comparados com os sinais das ondas laterais e eco de fundo permite determinar o dimensionamento do defeito e sua localização independentemente da amplitude do sinal. Já no ultrassom convencional, a forma de detecção do tamanho do defeito se baseia na amplitude do sinal exigindo para isto ângulos ótimos de reflexão de tal forma a garantir que o sinal ao se propagar atinja o defeito de forma perpendicular (Wassink & Dijkstra, 2008).

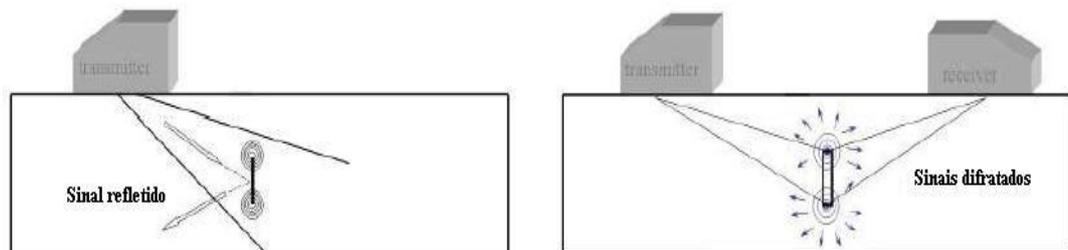


Figura 2.6: Comparação entre ultrassom convencional e TOFD.

Fonte: Wassink & Dijkstra, (2008).

A técnica TOFD tem mostrado uma aplicabilidade interessante na inspeção de chapas a partir de 10 mm. Para inspeções em chapas mais finas, o campo próximo dos transdutores não permite uma inspeção mais precisa. Entretanto, algumas pesquisas têm mostrado a possibilidade de expandir a sua aplicabilidade para estas limitações utilizando para isto análises baseadas nas ondas transversais, ou ainda, através da combinação da técnica TOFD com a técnica convencional de pulso-eco (Baskaran et. al, 2006). Nesta mesma linha, a aquisição e processamento digital de sinais para sua posterior recomposição eliminando ruídos indesejáveis têm permitido avanços consideráveis no sentido de superar estas dificuldades. Murayama et. al. (2002) demonstraram ser a transformada de Lamb uma forma efetiva de análises destes sinais ultrasônicos relacionados à inspeção de chapas finas.

A utilização de técnicas baseadas na difração de ondas ultrasônicas tem despertado o interesse nas pesquisas principalmente pela real possibilidade de que tal técnica permite uma simplificação das inspeções ultrasônicas (Bossuat et.al, 2006). Isto pode refletir, em um primeiro instante, na ampliação da capacidade de utilização da inspeção ultrasônica e, num segundo estágio, na extensão de seu campo de atuação. Entretanto, o seu potencial de utilização no meio industrial tem sido reconhecido como de grande importância, como citam Goujon (2006) e Lavender (2012) ao se comparar este método com outras técnicas de END tais como radiografia e partículas magnéticas. Porém, por ser uma técnica de inspeção

relativamente recente, já que foi inicialmente introduzida em 1985 no Harwell Center (UK) como uma resposta a insistentes anseios no dimensionamento mais preciso de defeitos internos em vasos de reatores nucleares soldados, como uma alternativa à radiografia, que afeta a saúde dos profissionais que executam o trabalho, bem como o meio ambiente. A técnica TOFD, como qualquer outra técnica requer mão de obra qualificada e aparelhos eficientes, para ser aplicada de maneira concisa, a fim de alcançar os objetivos teóricos de alta probabilidade de detecção para uma baixa taxa de falsas indicações e um dimensionamento exato dos dados adquiridos para a comprovação dos sinais (Verkooijen & Mclay, 2010).

Entre as principais vantagens da utilização da técnica TOFD, pode-se destacar:

- grande probabilidade de detecção de falhas de forma mais simples e rápida sem a necessidade de avaliação da amplitude do sinal (Quirk, 1999), baixa taxa de "chamada falsa" portabilidade, baixo custo e a elevada precisão intrínseca no dimensionamento de descontinuidades, especialmente na profundidade, revelou Goujon (2006);
- apresenta boa precisão no dimensionamento e localização de falhas internas;
- é uma técnica viável para inspeções automáticas, permitindo, através de análises computacionais, avaliar rapidamente a presença de sinais e sua classificação;
- apresenta uma aplicação muito eficiente na inspeção de paredes espessas de vasos de pressão.

Entretanto, a técnica TOFD apresenta algumas limitações, como por exemplo:

- não permite inspeções eficientes para espessuras inferiores a 10 mm, muito embora, como descrito anteriormente, novos desenvolvimentos têm mostrado resultados promissores na combinação mista da técnica TOFD com pulso-eco.
- para a técnica TOFD, o fator de ganho tem que ser muito alto, o qual gera um eco de fundo muito intenso, não sendo desta forma muito aplicável em materiais com granulação grosseira;
- apresenta dificuldade na interpretação dos sinais exigindo operadores eficientes (Quirk, 1999);
- exige transdutores especiais e normalmente de pequeno diâmetro.

2.4.1 Defeitos padronizados

A aplicabilidade da técnica TOFD na detecção de defeitos permite verificar com certa facilidade a presença de defeitos internos. Entretanto, a identificação do tipo de defeito depende do formato do espectro ultrassônico difratado, o qual assume diferentes formas. O que

se percebe é que cada tipo de defeito apresenta um espectro característico e a sua padronização facilita a sua interpretação. A norma inglesa British Standard BS 7706 (1993) estabelece diretrizes para detectar, localizar e dimensionar falhas. Para tanto, normatizou uma série de defeitos característicos e o espectro TOFD ultrasônico correspondente. A Figura 2.7 apresenta alguns destes defeitos mais importantes e o perfil A-scan típico esperado.

A grande vantagem na padronização dos espectros típicos oriundos da inspeção TOFD reside no fato de que a partir de inspeções aleatórias pode-se adquirir os sinais ultrasônicos e, posteriormente, processá-los digitalmente e analisá-los através de uma ferramenta adequada, de tal forma a permitir a identificação de padrões classificatórios. Este se constitui no passo inicial no sentido de desenvolver sistemas automáticos de inspeção.

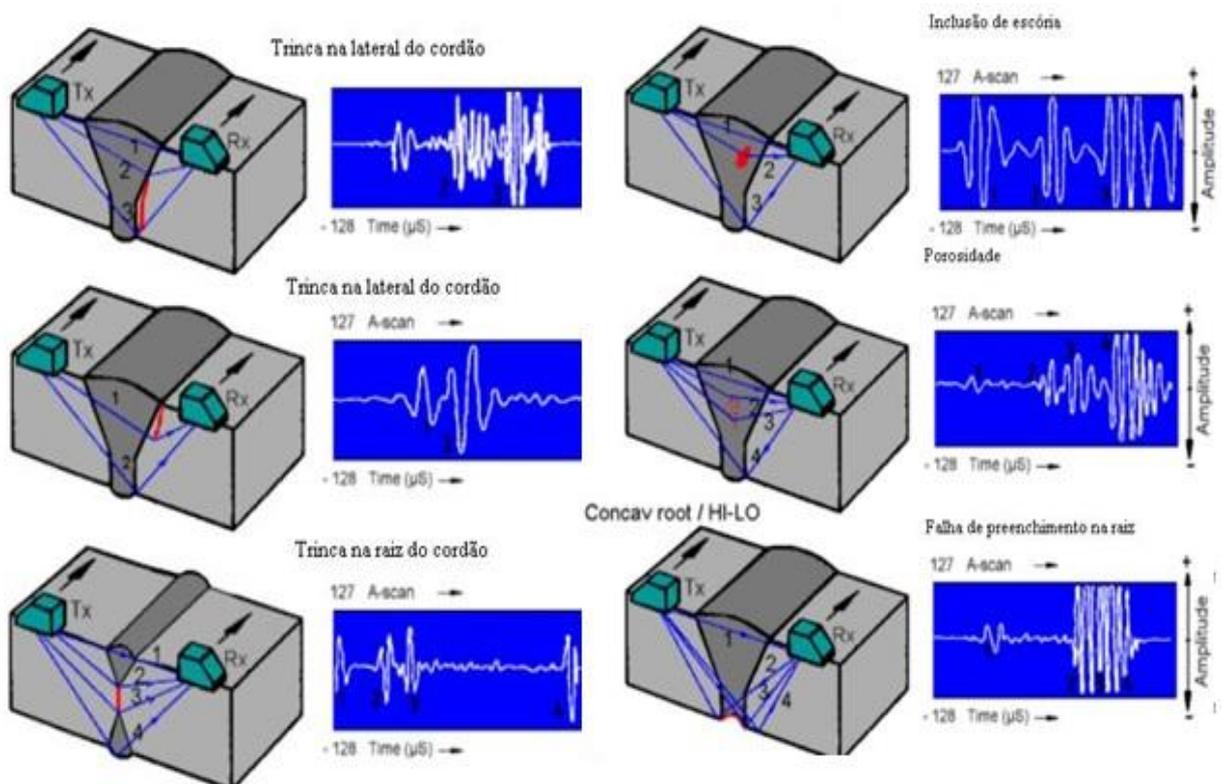


Figura 2.7: Sinais TOFD para alguns defeitos em soldagem padronizados.

Fonte: BS7706 (1993)

2.4.2 Fundamentação matemática TOFD

Para o detalhamento da localização de defeitos via a utilização da técnica TOFD, suponha-se o esquema mostrado na Figura 2.8, em que há a presença de um transdutor emissor e outro transdutor receptor. Tomando-se a presença de uma falha interna, localizada a

uma distância “d” da superfície da peça e com um tamanho L, e com os correspondentes caminhos dos sons da parte superior da falha (P1 + P2) e da parte inferior do defeito (P3 + P4).

Considerando o espectro de ondas sonoras representado pela Figura 2.9, é possível estabelecer os tempos percorridos pelo som até atingir o defeito. Desta forma, o tempo t_L é o correspondente ao eco de entrada e o tempo t_1 é o tempo de vôo corresponde à parte superior do defeito, e o tempo t_2 o correspondente ao tempo de vôo da parte inferior do defeito e t_{gw} o tempo de vôo da parte inferior da peça.

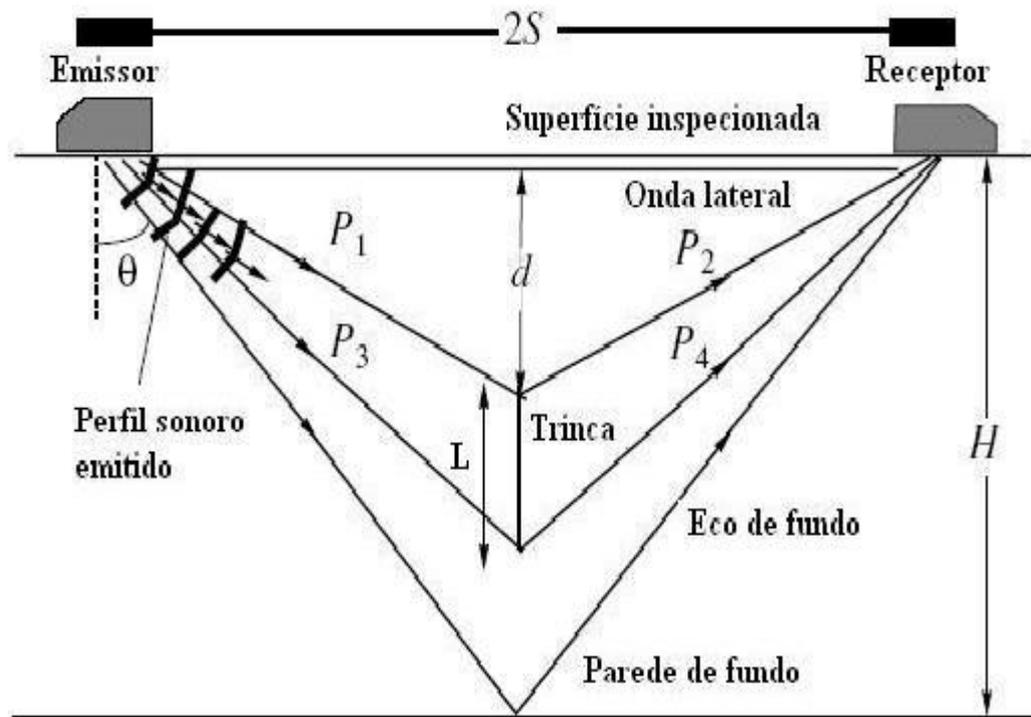


Figura 2.8: Esquema do sistema de inspeção TOFD.

Baseado no aspecto geométrico do caminho percorrido pelo som, o primeiro sinal correspondente à onda lateral na superfície da peça pode ser determinado pela equação (2.2).

$$t_L = \frac{2S}{C} \quad (2.2)$$

O tempo de vôo correspondente à parte superior do defeito pode ser determinado pela equação (2.3):

$$t_1 = \frac{2\sqrt{S^2 + d^2}}{C} \quad (2.3)$$

O tempo de vôo correspondente à parte inferior do defeito pode ser determinado pela equação (2.4):

$$t_2 = \frac{2\sqrt{S^2 + (d + L)^2}}{C} \quad (2.4)$$

Finalmente, o tempo de vôo correspondente ao eco de fundo pode ser determinado pela equação (2.5), onde H é a espessura da peça inspecionada:

$$t_{gw} = \frac{2\sqrt{S^2 + H^2}}{C} \quad (2.5)$$

Fazendo um rearranjo nas equações anteriores, é possível calcular a profundidade (d) do defeito, o seu tamanho (L), a espessura da peça (H) e a distância entre os transdutores (S). Desta forma, a profundidade do defeito pode ser determinada pela equação (2.6):

$$d = \frac{\sqrt{C^2 t_1^2 - 4S^2}}{2} \quad (2.6)$$

O tamanho do defeito pode ser determinado pela equação (2.7):

$$L = \frac{\sqrt{C^2 t_2^2 - 4S^2}}{2} - d \quad (2.7)$$

A espessura da peça pode ser determinada a partir da equação (2.5) e se expressa pela relação apresentada na equação (2.8):

$$H = \frac{\sqrt{C^2 t_{gw}^2 - \frac{S^2}{2}}}{2} \quad (2.8)$$

A distância entre os transdutores pode ser determinada pela equação (2.9):

$$S = \frac{C \cdot t_L}{2} \quad (2.9)$$

Com base no equacionamento previamente descrito, é possível, a partir do registro dos tempos de percurso dos sinais, determinar a localização e o dimensionamento do defeito.

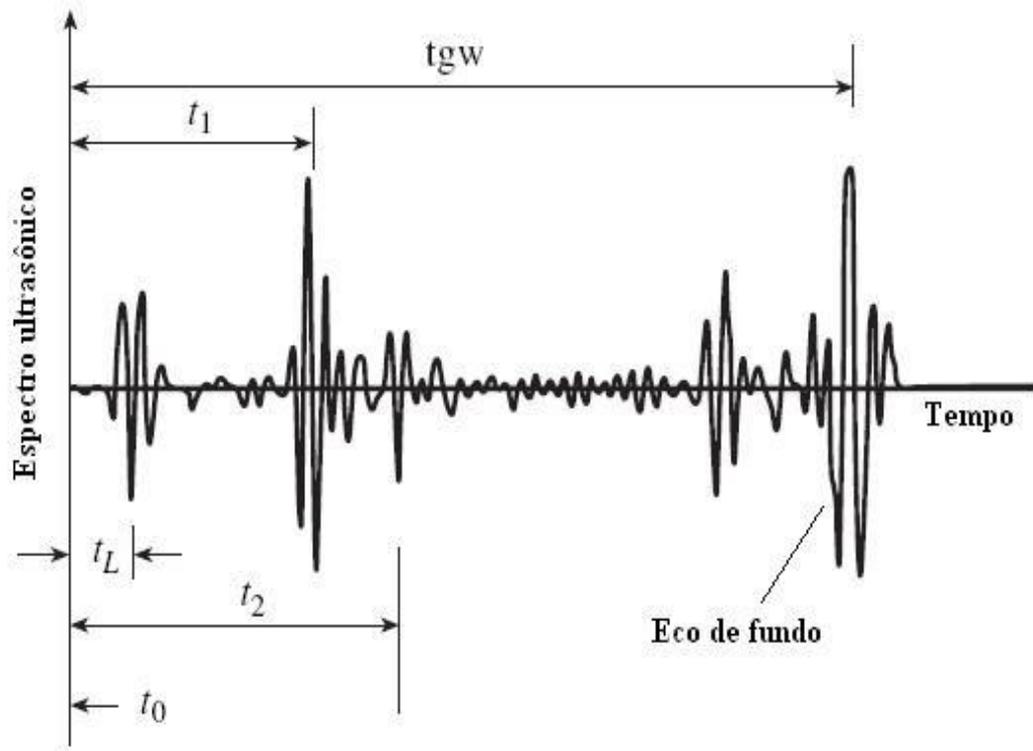


Figura 2.9: Espectro sonoro correspondente ao tempo de vôo dos diferentes componentes.

Fonte: Charlesworth & Temple (2001).

Uma aplicação real utilizando o aparato experimental baseado neste trabalho será descrito no próximo capítulo demonstrando a ferramenta que será utilizada para as avaliações posteriores.

Como complemento, (Charlesworth & Temple, 2001) estudaram a influência do desalinhamento dos transdutores na detecção e dimensionamento de defeitos. Barros & Caldeira (2009) demonstraram conforme mostrado na Figura 2.10 que o percurso difratado para detecção do defeito será mínimo com relação ao posicionamento simétrico dos transdutores. Afirmaram ainda, que há possibilidade de se detectar o defeito com o posicionamento assimétrico, em relação ao seu centro. Porém neste caso o tempo de percurso do som será maior.

Pontos equidistântes entre as sondas

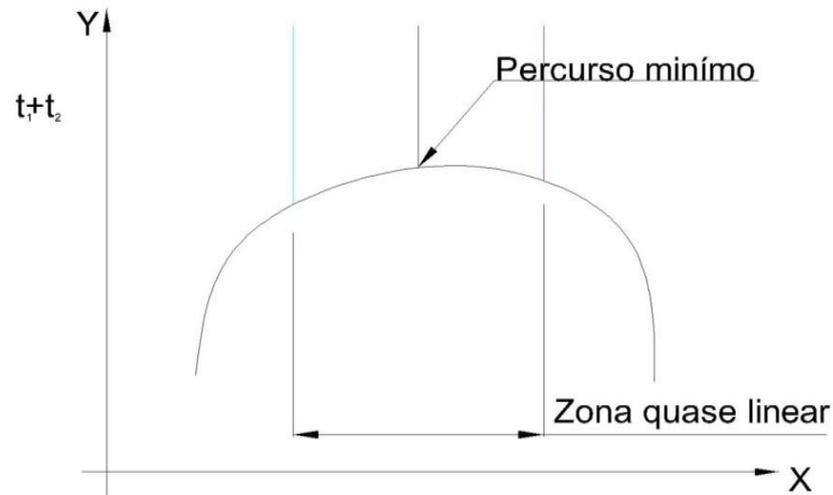


Figura 2.10: Representação da zona quase linear entre os dois transdutores para detectar a difração de uma descontinuidade.

Como informação complementar, Absolute NDE (2015) estabelece uma diretriz para a disposição dos transdutores emissor e receptor em relação ao defeito a ser inspecionado, conforme Figura 2.11. Os autores afirmam que transdutores que utilizam o TOFD devem possuir alta sensibilidade e grande banda larga. O uso de transdutores de alta frequência (até 20 MHz) pode reduzir a extensão da zona morta logo abaixo da superfície, mas a condição de superfície da peça, a atenuação do som e do ruído e as falhas esperadas devem ser avaliadas cuidadosamente antes de se selecionar frequências muito altas. Além disso, separação de sonda e frequência central são fatores que limitam a detecção de falhas próximas à superfície. Os autores afirmam que como regra geral, o foco é fixado em 66% da espessura da peça para se obter uma boa cobertura da solda. A separação da sonda é então calculada a partir da seguinte equação

$$2 \left[\left(\frac{2}{3} H \right) \text{tg} \theta \right] \quad (2.10)$$

Onde: (H) - é a espessura da peça; θ - é o ângulo de incidência da onda

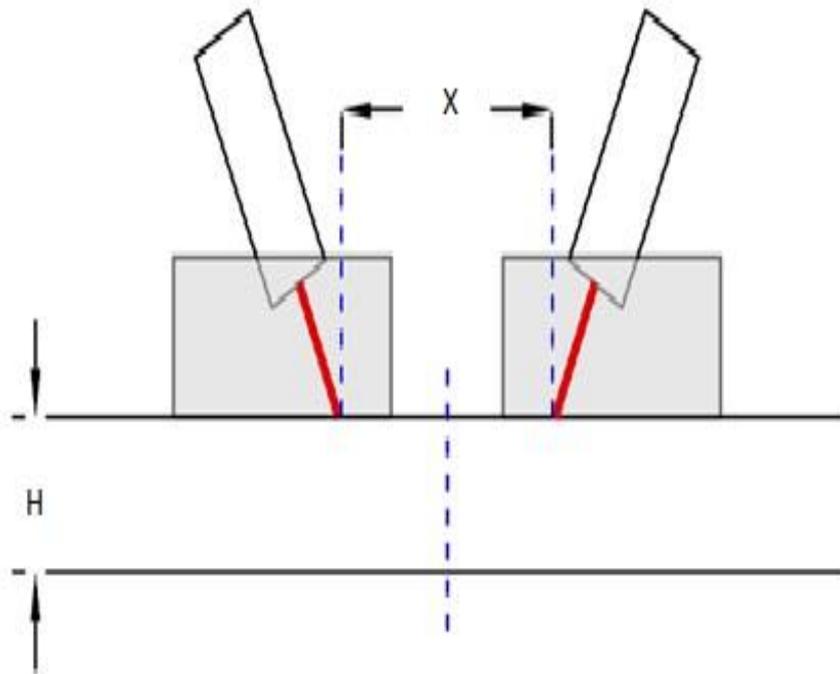


Figura 2.11: Espaçamento entre transdutores. Fonte: Absolute (2012).

2.5 Avanços na utilização da técnica TOFD

A técnica TOFD, por ser mais recente e reconhecidamente com potencial para aplicações industriais, normalmente desperta interesse no sentido de melhor compreendê-la e, assim, expandir a sua capacidade de utilização (Shekhar et. al., 2007). Neste sentido, observa-se o desenvolvimento de pesquisas com foco em vários aspectos associados à técnica. Grande parte destas pesquisas tem se centrado na análise dos sinais difratados de forma a permitir uma melhor caracterização das discontinuidades. Isto se deve ao fato de que na técnica TOFD os sinais ultrassônicos correspondentes a uma determinada falha são adquiridos junto com sinais não relevantes causados por ruídos, alteração granulométrica do material, ondas laterais e eco de fundo (Gang & Chi, 2008; Yang et al., 2004; Chen et. al, 1999). Estes sinais, associados ao alto ganho necessário para caracterizar os sinais de falha, tornam difíceis sua interpretação, afetando desta forma a precisão na localização e dimensionamento dos defeitos (Shekhar et. al, 2007). Portanto, o processamento digital dos sinais tem sido a forma utilizada no sentido de decomposição dos sinais, eliminação dos ruídos indesejáveis e posterior recomposição e classificação conforme normatizações estabelecidas por institutos internacionais como, por exemplo, a norma BS 7706 (1993) em que alguns padrões são mostrados na Figura 2.12. A seguir, vários trabalhos relacionados a diferentes técnicas utilizadas no processamento de sinais serão brevemente comentadas.

Gang & Chi (2008) utilizaram modelos multi-gaussianos e uma aproximação da teoria de Kirchhoff para simular sinais ultrasônicos e, posteriormente, analisá-los no formato A-Scan, aplicados na caracterização de trincas em juntas soldadas. Para tanto, os autores utilizaram o conceito de fator de eficiência correspondente aos sinais ultrasônicos, os quais podem ser determinados a partir da transformada inversa de Fourier, permitindo a avaliação da energia associada a um determinado sinal. A Figura 2.12 mostra o eco de fundo de uma chapa de alumínio de 20 mm e o correspondente fator de eficiência. Segundo os autores, a aplicação de modelos simulados permitiu um melhor entendimento da forma de propagação dos sinais e gerou uma melhoria da resolução na previsão dos defeitos, aumentando a rapidez e precisão na detecção dos defeitos. Na mesma linha de pesquisa Cepel et. al (2007) também estudaram modelos simulados e a aplicação de técnicas estatísticas como ferramenta auxiliar na decomposição dos diferentes sinais.

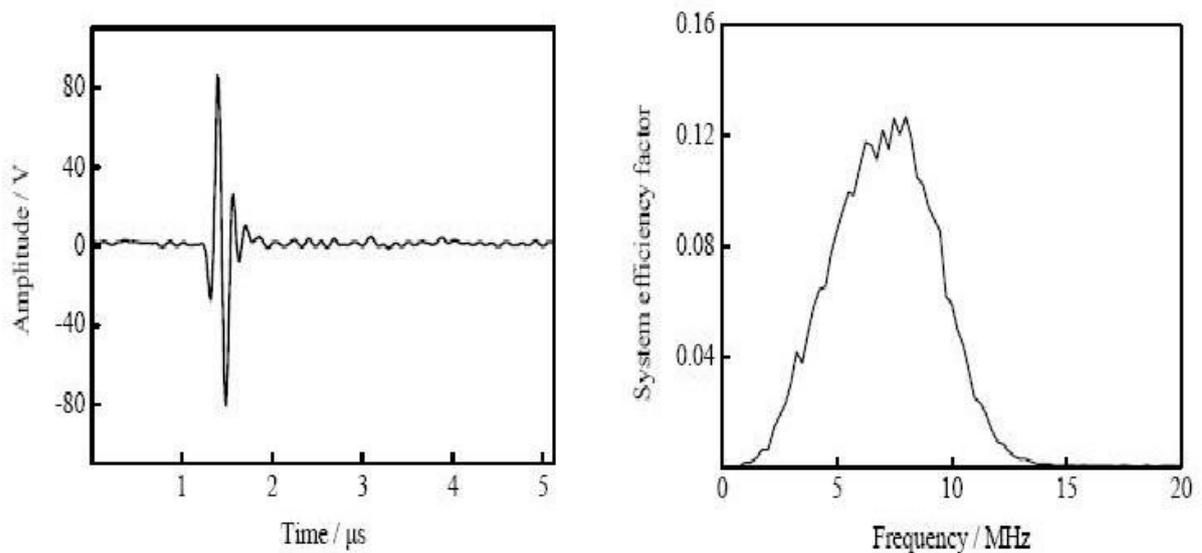


Figura 2.12: Decomposição de um sinal original e sua posterior determinação do fator de eficiência. Fonte: Cepel et. al (2007).

Riahi & Abolhasany (2006) descrevem um procedimento completo para se modelar matematicamente os sinais obtidos da técnica TOFD, bem como estabelecem alguns pressupostos extremamente úteis no sentido de aplicar esta técnica de forma eficaz. Os autores compararam ainda os resultados obtidos pela técnica TOFD com técnicas convencionais de inspeção, e concluíram que a primeira é muito mais efetiva em determinar a presença de defeitos. Entretanto, reconhecem que a aplicação efetiva da técnica exige o processamento dos sinais, o que nem sempre está disponível. Além disso, como os sinais correspondentes à onda lateral e eco de fundo são muito intensos, os sinais difratados na parte

superior e inferior da falha exigem a utilização de fator de ganho mais intenso, fazendo com que muitos sinais indesejáveis sejam também absorvidos. Desta forma, o material a ser inspecionado necessita apresentar uma granulação mais refinada para que os resultados possam ser mais confiáveis sem provocar distorções na interpretação dos sinais, o que exige também aparato experimental mais sensível.

Considerando ainda as diversas formas de análises dos sinais ultrasônicos, Moura et al. (2004) utilizaram uma combinação mista de reconhecimento de padrão conjugado com redes neurais para classificação dos diversos tipos de sinais característicos de defeitos em soldagem. A utilização desta metodologia foi aplicada com sucesso na identificação e posterior classificação dos defeitos.

No intuito de classificar defeitos oriundos da utilização da técnica TOFD, Shekhar et. al. (2007) descrevem uma metodologia combinada de processamento digital de sinais, lógica fuzzy e redes neurais, cuja aplicação em alguns defeitos típicos de soldagem permitiram avaliá-los com relativo sucesso. Tais metodologias são derivadas de aplicações anteriores em detecção e classificação de defeitos em ultrassom convencional, conforme descrito por Masnata & Sunseri (1996) e Llata et al. (2001). Por outro lado, Correia et. al. (2007) com o intuito de atingir os mesmos objetivos na classificação de defeitos associados ao TOFD, utilizaram processamento de sinais baseados na transformada de *Wavelets*, e posterior caracterização dos sinais adquiridos correspondentes aos defeitos através de análises utilizando discriminantes lineares de **Fisher**.

Em função da complexidade dos sinais ultrasônicos gerados e pela dinâmica dos mesmos quando gerados pela utilização do TOFD, métodos de modelamentos matemáticos têm um vasto campo de aplicação na inspeção ultrasônica. Neste sentido, Chen et. al. (2005) afirmam que a técnica de identificação de sinais é usada para melhorar a resolução do tempo de percurso do sinal TOFD, permitindo o dimensionamento e a localização dos defeitos com a mesma precisão. Ressaltam que o sinal ultrasônico necessita ser decomposto em várias funções para que, através de seleções mais significativas, possa ser recomposto em um novo sinal considerando a frequência e a energia. Este sinal reconstituído tem uma melhor relação sinal ruído, o que possibilita melhorar sensivelmente a informação relativa ao defeito. Para sua implementação, os autores utilizaram em suas pesquisas transformadas de Hilbert que possibilitaram reduzir áreas de imprecisão de medidas (áreas cegas) para 2,5 mm abaixo da superfície. Citam ainda os autores que as transformadas de Fourier e transformadas de *Wavelets* também poderiam ser utilizadas para o mesmo objetivo. Santos, (2010) conseguiu determinar o envelhecimento dos compostos utilizados em usinas nucleares através das transformadas rápidas de Fourier, invertendo o tempo para frequência. Por apresentar

resultados promissores, este trabalho optou por fazer uma investigação da análise de sinais utilizando transformadas de Hilbert bem como FFT.

2.6 Técnica de projetos e análise de experimentos

O planejamento de experimentos DOE é definido como “uma abordagem sistemática e rigorosa para a resolução de problemas de engenharia, que aplica princípios e técnicas na fase de coletas de dados de modo a assegurar a geração de conclusões de engenharia válida, defensável e suportáveis” (NIST, 2000).

Dentre as técnicas de análise de experimentos, destaca-se o DOE. É um método que economiza recursos ao identificar as variáveis que mais influem no processo realizando um número mínimo de experimentos. Desta forma, obtém-se maior desempenho do processo, minimizando a variabilidade e os custos envolvidos. Este processo foi elaborado para determinar, entre vários fatores, qual é o mais influente no processo. (Antony et al, 1998) cita o DOE como uma das técnicas mais importantes para otimizar os parâmetros de qualidade e processo, bem como os recursos de uma empresa.

O DOE calcula o erro experimental do estudo realizado. Caso seja maior do que 15% são possíveis que um ou mais dos seguintes fatores tenham acontecido Antony et al (1998):

- Mais de uma variável atua no experimento;
- Falta de bloqueio das variáveis que não influenciam no processo;
- Falta de calibração nos equipamentos ou uso de equipamentos não confiáveis.

Solana & Ocaña (1997) desenvolveram modelos matemáticos para explicar os principais mecanismos físicos que têm surgido na penetração de soldagem laser. Outros modelos também têm sido aplicados para avaliar as características mecânicas de máquinas e equipamentos eletrônicos.

Gunaraj & Murugan (2000) desenvolveram trabalhos nesta área, como o desenvolvimento de modelos matemáticos na previsão e otimização do volume de um cordão de solda para um processo de arco submerso utilizando a metodologia de superfície de resposta com precisão de aproximadamente 98% de confiabilidade. Esses mesmos autores também desenvolveram modelos matemáticos para verificar a influência dos parâmetros no formato da ZTA.

O planejamento experimental, baseado nos fundamentos estatísticos é uma poderosa ferramenta para se chegar as condições otimizadas de um processo. A determinação da

influência de uma ou mais variáveis sobre outras de interesse, pode ser um grande problema para os experimentadores. Assim, a condução adequada dos experimentos, de acordo com o planejamento elaborado, garante o sucesso do problema em estudo. Durante a sua realização, deve-se estar atento para detectar as anormalidades ocorridas, além de documentá-las para posterior análise, quando, então, serão estimados os fatores incluídos no modelo utilizando métodos estatísticos adequados, culminando na inferência, interpretação, discussão dos resultados, além da recomendação de melhorias, quando necessário.

Uma vez selecionados os fatores e seus respectivos níveis, gera-se uma combinação desses fatores sob a forma de arranjos experimentais. Para a área industrial, normalmente procura-se extrair o máximo de informações sobre a influência dos fatores de entrada, pois estas são as variáveis que controlam o processo, sobre as respostas (fatores de saída) ou variáveis de interesse. Esse procedimento é feito com o menor número possível de observações, visando à diminuição de custo e a maximização da rapidez.

2.6.1 Início do planejamento de análise e experimentos

Um projeto de análise de experimentos geralmente segue os seguintes passos:

1. Definição do objetivo do experimento, ou seja, o que se pretende analisar para gerar dados confiáveis e respostas apropriadas;
2. Seleção da resposta;
3. Seleção das variáveis do processo;
4. Determinação dos níveis de cada fator;
5. Escolha do projeto de experimento adequado;
6. Planejamento do experimento que consiste em selecionar a matriz experimental com os fatores e níveis escolhidos;
7. Execução;
8. Análise e interpretação dos resultados.

Uma vez selecionados os fatores e seus respectivos níveis, gera-se uma combinação desses fatores sob a forma de arranjos experimentais. Um resumo das principais ferramentas utilizadas no planejamento de experimentos é mostrado no *Quadro 2.1*.

O arranjo mais comum é o fatorial completo, para o qual o número de experimentos é igual ao número de níveis experimentais, elevado ao número de fatores. Fatoriais completos cobrem todo o espaço experimental. Entretanto, devido ao seu crescimento exponencial, arranjos com grande número de fatores podem tornar um processo de experimentação

inviável. Para esses casos se houver pouco interesse nas interações, pode-se negligenciá-las, gerando-se frações do experimento completo sem comprometer, entretanto, a detecção da presença de fatores influentes (Montgomery & Runger, 2003).

Quadro 2.1 - Características fundamentais do projeto e análise de experimentos.

Projeto experimental	Vantagens	Desvantagens	Aplicações
Fatorial Completo 2^k	Permite a varredura completa da região de estudo, pois utiliza todos os fatores e respectivos níveis.	Não identifica variação intermediária, pois só trabalha em dois níveis (-1,+1). Necessita de um alto número de corridas para problemas com grande número de parâmetros.	Processos em que já se tem um prévio domínio e onde a realização das corridas não demandam maior tempo ou custo
Fatorial Fracionado $2^{(k-1)}$	Permite uma pré-análise do processo com um número reduzido de corridas.	Não promove a varredura completa da região experimental.	Processos onde se deseja um pré-conhecimento e onde a literatura é limitada. Corridas que demandam maior tempo ou custo
Taguchi	Permite a análise de um processo com muitos parâmetros de entrada com um número extremamente reduzido de experimentos.	Fornece uma idéia do processo, porém pode apresentar modelos matemáticos não confiáveis.	Processos onde há pouco ou quase nenhum conhecimento prévio de comportamento. Processos com alta dispersão ou que as corridas demandem alto custo ou tempo
Metodologia de Superfície de Resposta	Permite a verificação de variações intermediárias do processo	Pode apresentar erros na extrapolação dos pontos estrela, já que são realizadas poucas corridas nestes níveis.	Otimização de processos, principalmente bem conhecidos e com baixa dispersão.

Fonte: Adaptado de NILO JÚNIOR (2003).

2.6.2 Arranjo fatorial

A metodologia de superfície de resposta (MSR) é um agrupamento de ferramentas matemáticas e estatísticas para avaliar a influência entre as respostas e os parâmetros, com objetivo de otimizar essas respostas (Montgomery, 1991). Neste contexto na grande maioria dos problemas de MSR, não se conhece a relação entre os fatores de entrada e saída. Desta forma, um fatorial fracionado deve ser escolhido com o objetivo de determinar os parâmetros mais influentes no processo. Em seguida em cima dos resultados obtidos, um arranjo fatorial completo é gerado com o intuito de determinar se existe curvatura para as respostas escolhidas. Esta relação deve ser aproximada usando, geralmente, polinômios de primeira ordem mostrado pela seguinte equação:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \varepsilon$$

Onde y – Resposta de interesse; x_i – Parâmetros independentes; β_i – Coeficientes a serem estimados; k – Número de parâmetros independentes; ε – Erro experimental.

A Figura 2.13 representa graficamente o MSR

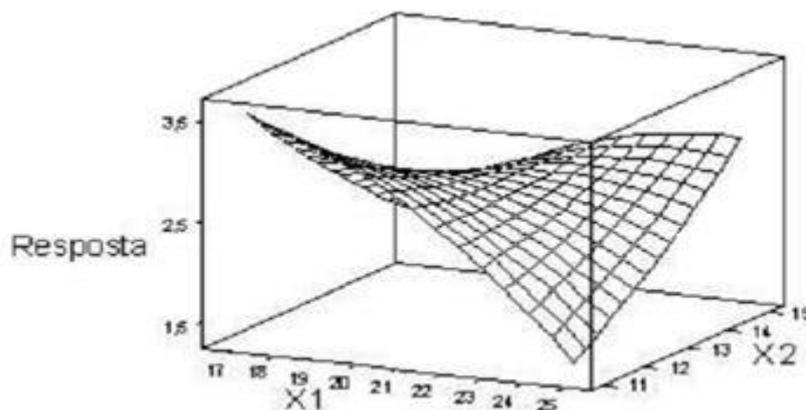


Figura 2.13: Gráfico de superfície de resposta para x_1 , x_2 (NILO JUNIOR, 2003).

Segundo Montgomery (1991), a grande maioria dos problemas de MSR, não se conhece a relação entre os fatores de entrada e saída. Portanto, esta relação deve ser aproximada usando, geralmente, polinômios de primeira ordem, ou, se o processo é relativamente próximo ao ótimo, um polinômio de segunda ordem.

Para avaliar a significância do modelo escolhido como também quais entre os termos do modelo são significativos e quais podem ser removidos utiliza-se a ANOVA. O ajuste dos

modelos é representado pelo coeficiente de determinação (R^2), que representa o percentual de variação na resposta explicada pelo modelo construído. Quanto maior o valor de R^2 mais explicativo é o modelo, melhor o modelo que se ajusta a amostra. Neste contexto, outras análises também são importantes como o teste de falta de ajuste (Lack-of-fit > 0,05) e a análise de resíduos que segundo Montgomery (1991), devem ser normais, aleatórios e não correlacionados.

Como uma das principais técnicas do Projeto e Análise de Experimentos, a Metodologia de Superfície de Resposta tem sido utilizada com frequência por vários pesquisadores, contribuindo para a otimização e para um melhor entendimento dos fenômenos que caracterizam os mais diversos processos de fabricação.

Capítulo 3

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Este capítulo descreve as etapas do procedimento experimental, material e softwares, conjugadas com a utilização de um aparelho de ultrassom, cabeçotes, corpos de prova, além do planejamento experimental desenvolvido para detecção de defeitos pré-fabricados via TOFD. Para a avaliação da influência da frequência e dos ângulos de propagação das ondas ultrassônicas foi utilizado um método estatístico baseado no DOE visando analisar os efeitos principais destas variáveis na capacidade de detecção de defeitos. Este trabalho busca ainda avaliar a possibilidade de detecção de defeitos variando as distâncias dos transdutores emissor/receptor com relação ao centro do defeito. Por fim, foi utilizado o processamento digital de sinais através de transformadas de Fourier e Hilbert para filtragem dos sinais ultrassônicos via TOFD, visando eliminar a presença de ruídos e, por conseguinte, a qualidade na previsão do posicionamento dos defeitos.

3.1 Adaptação do banco de ensaios para TOFD

Para o desenvolvimento do trabalho utilizou-se um equipamento denominado USLT 2000, marca Krautkramer, que é constituído por um computador capaz de visualizar os sinais ultrassônicos por intermédio de interface I/O. A Figura 3.1 mostra detalhes do equipamento utilizado.



Figura 3.1: Banco de testes utilizando TOFD.

Entretanto, os sinais gerados por este aparelho se constituem em sinais analógicos e, para a sua conversão para o modo digital foi utilizado um software denominado Ultraworks. Desta forma, os sinais foram gravados especificamente formato de texto (arquivo txt) para posterior conversão e reconstituição em softwares como por exemplo, o software Matlab.

Adaptando o sistema USLT para o modo TOFD, alguns ajustes se fizeram necessários. Os transdutores utilizados são distintos sendo um emissor e outro receptor, e são dispostos de forma simétrica em relação à região a ser inspecionada. Para tanto, utilizou-se de uma haste que permite o posicionamento correto dos transdutores. Estes transdutores emitem ondas longitudinais utilizando cunhas de acordo com o ângulo desejado. Para este trabalho, três tipos de cunhas foram utilizadas, ou seja, cunhas com ângulos de 45° , 60° e 70° . Os transdutores utilizados apresentavam frequências de 5 MHz e 10 MHz.

A Tabela 3.1 mostra os detalhes de especificação e características dos transdutores e cunhas.

Tabela 3.1: Especificação e características dos transdutores e aparelho.

Transdutores		
Frequência	Especificação	Características
5 MHz	C543	Panametrics SN628248 - 0,25 mm
10 MHz	C563	Panametrics SN633676 - 3 mm
Cunhas		
Ângulo do feixe	Especificação	Características
45°	ST1-45L-IHC	Olympus - 45° Onda Longitudinais
60°	ST1-60L-IHC	Olympus - 60° Onda Longitudinais
70°	ST1-70L-IHC	Olympus - 70° Onda Longitudinais
Acessórios e Computador		
Notebook 4GB, 250MB - Análises		Usado no processamento sinais
Hand-Scanner e cabos coaxiais		Olympus - Usado na montagem

A Figura 3.2 mostra um detalhamento do dispositivo de fixação e posicionamento dos transdutores para execução da inspeção TOFD aplicado a um defeito simulado localizado na parte central de uma chapa de aço carbono AISI 1020 de 20 mm de espessura.

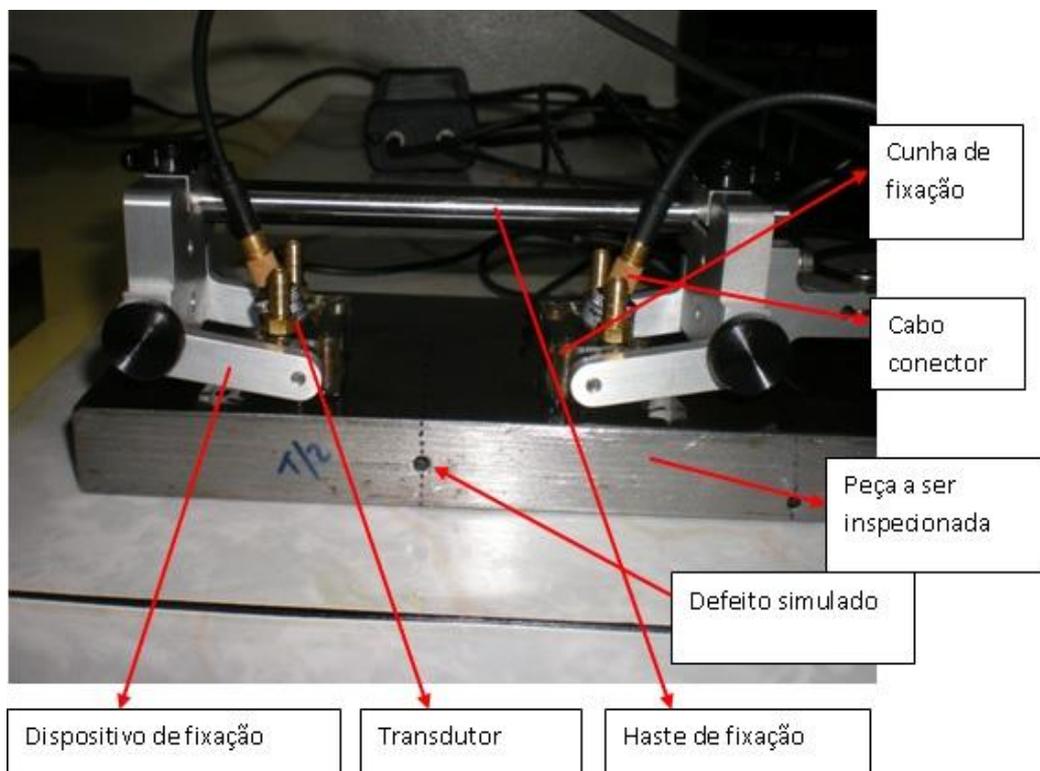


Figura 3.2: Detalhamento do dispositivo de fixação e posicionamento dos transdutores.

3.2 Corpos de prova idealizados

Dentre os defeitos comumente vistos na área de inspeção em soldas se destaca a presença de porosidades oriundas principalmente da retenção de gases, durante o processo de soldagem. Em virtude da dificuldade em se obter poros padronizados que pudesse servir de referência, procurou-se idealizar um corpo de prova com uma série de furos pré-dimensionados, os quais têm o objetivo fundamental de simular uma situação muito próxima à de ocorrência de porosidades.

No sentido de simular alguns defeitos, as Figura 3.3 e 3.4 mostram os detalhes dos corpos de provas confeccionados com a localização dos furos. Procurou-se inserir diferentes posicionamentos com o intuito de melhor avaliar a capacidade de detecção dos supostos defeitos via TOFD.

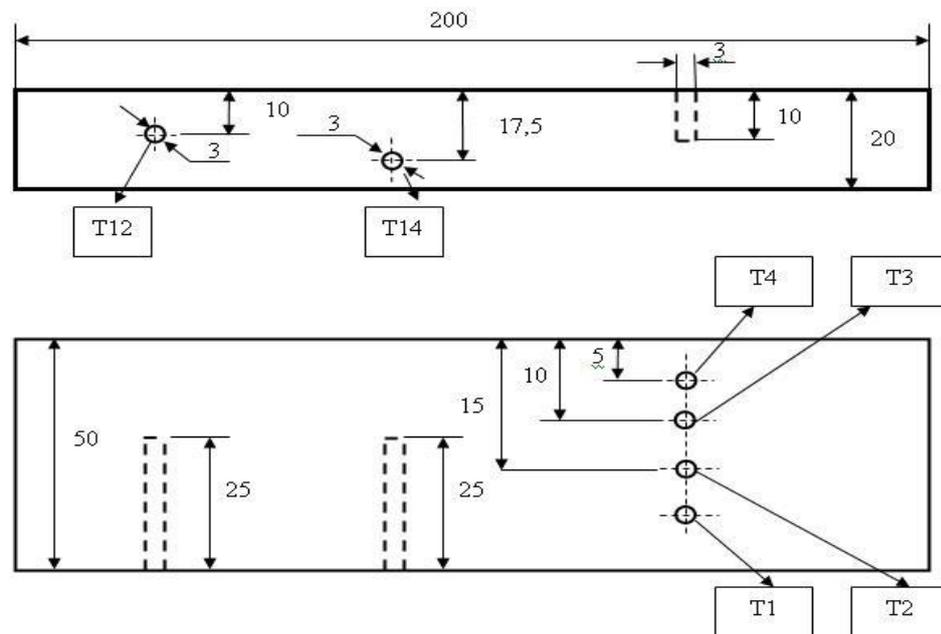


Figura 3.3: Detalhes do corpo de prova idealizado e posicionamento dos furos.

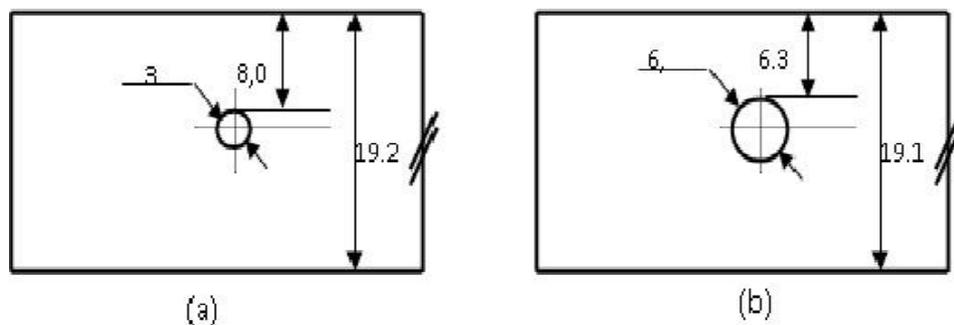


Figura 3.4: Corpos de prova com defeitos padronizados e suas dimensões.

3.2 Dimensionamento de um defeito simulado via TOFD

Para caracterizar o dimensionamento de um defeito utilizando a técnica TOFD, os transdutores foram posicionados em relação ao furo pré-determinado mantendo uma distância de 64 mm de afastamento, conforme Figura 3.5, utilizando como acoplante óleo multiviscoso.

As medições foram executadas em duas posições diferentes.

- Na posição 2, os transdutores foram posicionados na parte sem ocorrência de furo (sem defeito), para efeitos de calibração do ganho de ensaio, o qual foi de 64 dB, usando a amplitude de resposta do eco de fundo.
- Na posição 1, os transdutores foram dispostos na parte correspondente ao furo T12.

Para a montagem dos transdutores, quer sejam de 5 MHz ou 10 MHz, foram utilizadas cunhas que permitiram impor uma angulação predefinida para as ondas longitudinais. Tais cunhas com ângulo de 45°, 60° e 70° foram utilizados para avaliar a influência destes ângulos na localização dos defeitos.

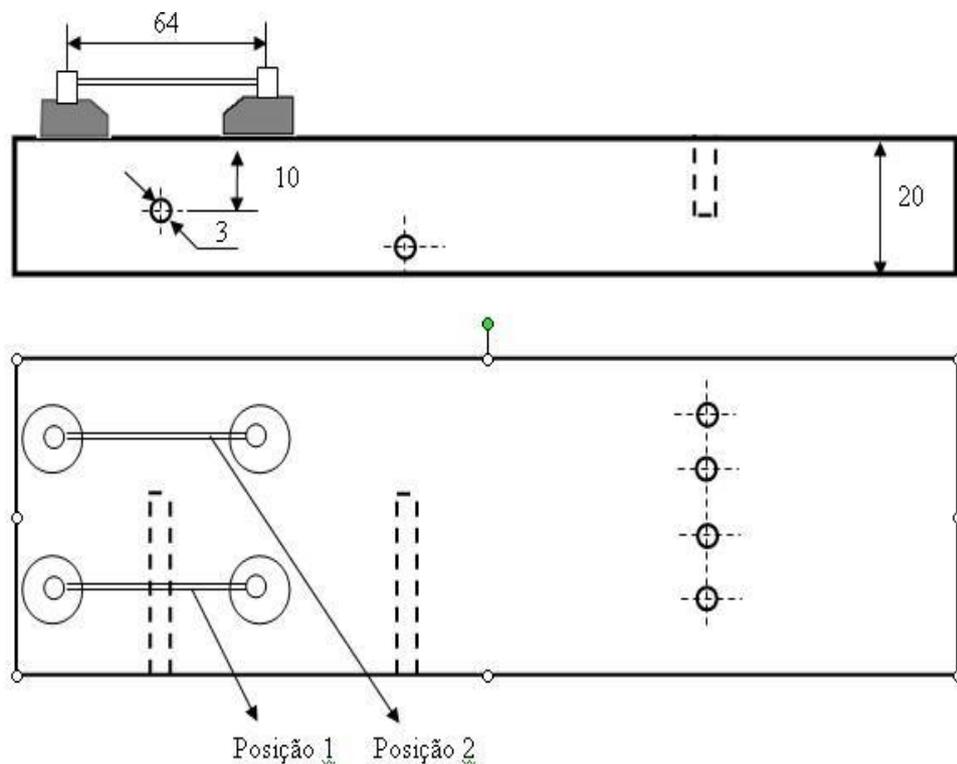


Figura 3.5: Inspeção TOFD no furo T12.

3.4 Influência da frequência e ângulos de incidência na detecção de defeitos

Com base no procedimento descrito anteriormente e na capacidade e adaptação do sistema de medição USLT 2000, os testes foram realizados. Mas, normalmente há grandes dúvidas com relação à utilização de nível de frequência de transdutores e ângulos de cunhas na capacidade de detecção de defeitos e sua localização, bem como de sua dimensão associados à aplicabilidade da técnica TOFD. A Figura 3.6 mostra uma ilustração esquemática de como os transdutores, com ângulos de 45° e 60° , se propagam em uma determinada peça a ser inspecionada. Obviamente a angulação influencia na capacidade de detecção de diferentes defeitos tanto no que concerne a sua dimensão quanto na sua localização.

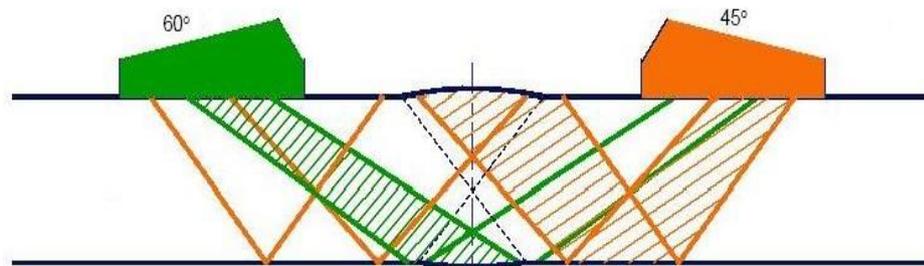


Figura 3.6: Ângulo de incidência dos transdutores.

3.5 Inspeção de chapas superiores a 10 mm utilizando TOFD

A utilização da técnica TOFD para a inspeção de chapas com espessuras acima de 10 mm mostra ser, de acordo com citações na literatura, uma técnica viável. Entretanto, não há uma indicação clara da influência da frequência dos transdutores, tampouco dos ângulos das cunhas na capacidade de detecção de defeitos. Portanto, para se ampliar as análises a respeito destas influências, procurou-se fazer uma avaliação da atuação da frequência dos transdutores com diferentes ângulos de incidência. Considerando tais aspectos, nota-se que estudos que procurem analisar a ação dos ângulos de propagação das ondas longitudinais e frequência dos transdutores na localização de defeitos tornam-se muito oportuno. Este trabalho procurou realizar estudos; e, foram avaliados corpos de prova com defeitos pré-definidos caracterizados pela inserção de furos de diâmetros 3 mm e 6 mm (pequeno e grande defeito respectivamente) localizados no centro de uma peça de aço carbono ABNT 1020 e com 19,2 mm de espessura, os furos têm a finalidade de representar o defeito de um poro. A Figura 3.4 (a) e (b) mostra os

detalhes de localização e dimensões dos furos. Os testes foram realizados com os transdutores de 5 MHz e 10 MHz com ângulos de cunha de 45°, 60° e 70° para detecção destes defeitos.

Para validar as medições, utilizou-se a técnica estatística e análise de experimentos DOE através de um planejamento simplificado baseado em superfícies de respostas, com metodologia similar à descrita por Davim et. al. (2008). Como software de apoio Minitab versão 14. A Tabela 3.2 mostra os fatores experimentais e respectivos níveis utilizados. Considerando todas as combinações dos fatores, foram realizados 12 experimentos. Como procedimento experimental, os transdutores foram dispostos com um afastamento de 64 mm fixados por uma haste e conectados às respectivas cunhas. Foram utilizadas cunhas com os mesmos ângulos para cada medição e como acoplante utilizou-se óleo multiviscoso no contato das cunhas com a peça.

Como resultado, de acordo com defeito inspecionado na Figura 4.1, foi determinado a localização da profundidade do defeito (d), o tamanho do defeito (L) e a espessura da peça (H), valores estes derivados do tempo de percurso das medições. Para o transdutor de 5 MHz utilizou-se um ganho de 64 dB, e para o de 10 MHz um ganho de 70 dB. Na caracterização dos sinais ultrassônicos e correspondentes medidas dos tempos de vôo procuraram-se determinar os valores de eco da parte superior, inferior e fundo na condição de máxima amplitude medida no flanco do sinal.

Determinando o tempo de vôo, os valores dimensionais foram avaliados conforme procedimento descrito no item 2.6. Partindo dos resultados obtidos, foram determinados os erros relativos aos percentuais correspondentes à profundidade do defeito (Erro_d%), ao tamanho do defeito (Erro_L%) e à espessura da peça (Erro_H%). Como objetivo para a determinação da influência dos fatores nas respostas, a condição de minimização dos erros foi imposta como condição ideal.

Tabela 3.2: Fatores experimentais e níveis.

Fatores	Notação	Unidades	Níveis		
			1	2	3
Diâmetro defeito	Diam	mm	3	6	-
Frequência transdutor	F	MHz	5	10	-
Ângulo cunha	Ang	°	45	60	70

3.6 Detecção de um defeito simulado com montagem assimétrica

As análises complementares variando a distância entre os transdutores merecem ser adequadamente estudadas.

Para executar a medição, dois pares de transdutores com frequência de 5 MHz e 10 MHz foram utilizados, e a inspeção ocorreu no furo designado por T12, conforme figura 3.3, localizado a uma profundidade de aproximadamente 10 mm em uma chapa de aço carbono AISI 1020 de 20 mm de espessura.

Nesse experimento, foram avaliadas três montagens com os transdutores [E] e [R], conforme a Figura 3.7.

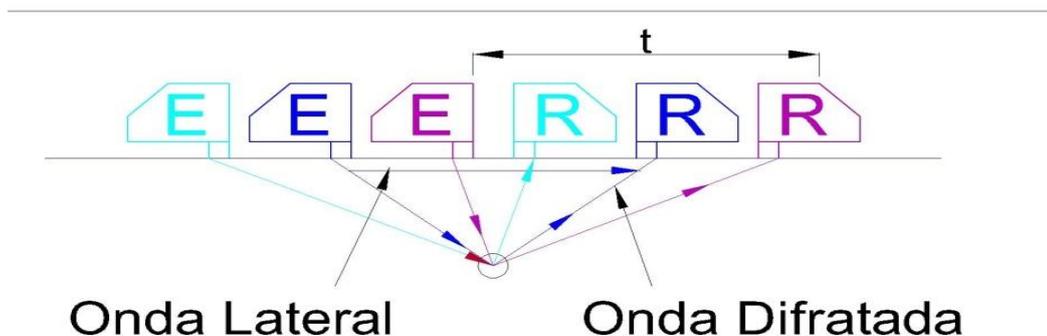


Figura 3.7: Posicionamento dos transdutores simétrico e assimétrico.

- O primeiro experimento, representado pela cor azul conforme a Figura 3.7, no qual $(t_1 + t_2)$ é mínimo, os transdutores foram posicionados simetricamente em relação ao furo T12, mantendo uma distância de 64 mm de afastamento, em que o percurso é o mínimo possível.
- O segundo, representado pela cor roxa conforme a Figura 3.7, os transdutores foram posicionados assimetricamente em relação ao furo T12, mantendo uma distância de 64 mm de afastamento, mas demonstrando os transdutores deslocados para a direita do defeito com o cabeçote [E] próximo do defeito.
- Já o terceiro experimento, representado pela cor verde conforme a Figura 3.7, os transdutores foram posicionados assimetricamente em relação ao furo T12,

mantendo uma distância de 64 mm de afastamento, com o posicionamento deslocado para esquerda do defeito com o cabeçote [R] próximo do defeito.

Foram executadas medições em três posições diferentes, ou seja, comparando a detecção do defeito no mesmo espectro com a montagem simétrica e assimétrica. Na montagem simétrica, sendo caracterizada pela cor azul, e na montagem assimétrica sendo caracterizada pelas cores roxa e verde.

Para a montagem dos transdutores, quer sejam de 5 MHz ou 10 MHz, foram utilizadas cunhas de 45°, 60° e 70° que permitiam impor uma angulação predefinida para as ondas longitudinais na localização do defeito.

3.7 Composição e análise dos sinais TOFD utilizando transformadas de Fourier e Hilbert

Tendo em vista as dificuldades de visualização dos sinais ultrasônicos utilizando a medida do tempo de percurso do som, por causa dos ruídos e sobreposição dos sinais, estes fatores são decorrentes da emissão dos pulsos sônicos, que percorrem o material em um curto espaço de tempo e retornam ao cristal para sua recomposição, provocam a sobreposição de sinais, pois os ecos ficam muito próximos e de difícil interpretação. Com isso, notou-se a necessidade de buscar uma técnica alternativa, capaz de recompor os sinais sobrepostos e com ruídos. Esta técnica não mais visualizaria os sinais ultrasônicos pelo domínio no tempo, mas sim no domínio da frequência, o que acarretou em um novo formato de sinal.

3.7.1 Transformadas de Fourier

Para isso foi utilizada as transformadas rápidas de Fourier. Como nosso equipamento não tem a capacidade de efetuar automaticamente estas transformações, fez-se necessário executar o processamento digital dos sinais ultrasônicos, houve a necessidade de se desenvolver uma metodologia que permitisse a digitalização dos sinais oriundos do sistema USLT 2000. Para isto, utilizou-se de um software ultraworks que permite a decomposição do sinal analógico em valores numéricos, os quais podem ser gravados em arquivos no formato “txt” e que permitem ser reconstituído em software como o Matlab, utilizado como software de apoio neste trabalho.

3.7.2 Transformadas de Hilbert

O eco de ultrassom consiste, basicamente, num tipo de sinal não-linear e não estacionário. Isso limita a utilização de técnicas estatísticas e análises de Fourier. Contudo, novas técnicas de distribuições tempo-frequência, estatísticas de ordens elevadas e wavelets têm sido investigadas na busca por soluções a essas limitações.

Na busca de uma localização precisa do tempo e frequência, existe a decomposição empírica dos modos (EMD – *Empirical Mode Decomposition*), que oferece uma técnica alternativa para o processamento de séries temporais. Diferentemente das metodologias usuais, a EMD não é definida através de transformações que utilizam integrais, mas por um algoritmo que é totalmente ditado pelos dados disponíveis. De posse dos dados processados através do EMD, pode-se utilizar, então, o espectro de Hilbert para detectar a difração do tempo de voo das ondas e, conseqüentemente, a profundidade e o tamanho do defeito na soldagem.

Primeiramente, o sinal gerado pelo TOFD é decomposto através da EMD, quando são obtidas diversas funções com modos intrínsecos (IMF – *Intrinsic Mode Function*). Dessa decomposição, são selecionados apenas alguns modos significativos, com base nas informações de energia e frequência, para reconstruir o sinal. As informações relativas aos defeitos são realçadas nesse sinal reconstruído, uma vez que ruídos e outras informações irrelevantes são ignorados. Finalmente, utiliza-se a transformada de Hilbert para identificar o tempo de chegada do sinal.

IMF é uma função que satisfaz duas condições:

- para volume de dados, a quantidade de picos e de cruzamentos em zero devem ser iguais, ou no máximo diferentes por apenas um;
- para qualquer ponto, o valor médio da faixa definida por um máximo e mínimo locais é zero.

A primeira condição é similar ao requisito tradicional de faixa estreita para processo Gaussiano estacionário. Já a segunda, consiste em nova idéia de modificar a necessidade de um requisito global de estacionaridade para um requisito local. Assim, o princípio da EMD é considerar oscilações em um nível altamente local. Se for analisada a evolução de um sinal $x(t)$ entre dois extremos, é possível definir uma parte local de alta frequência $h(t)$ que corresponde à oscilação, terminando em dois mínimos consecutivos, passando pelo máximo existente entre eles. Para completar o algoritmo, é necessário identificar a parte (local) correspondente à baixa frequência $m(t)$, assim como designada tendência local. Com isso, o sinal é definido por:

$$x(t) = h(t) + m(t) \quad (3.1)$$

Um algoritmo eficiente para a EMD é resumido no fluxograma da Figura 3.7. Assim, aplicando o algoritmo, o sinal estudado é representado por:

$$x(t) = \sum_{i=1}^n c_i + r_n \quad (3.2)$$

onde c_i são as IMFs encontradas, n é a quantidade de modos empíricos obtidos e r_n é o resíduo da decomposição.

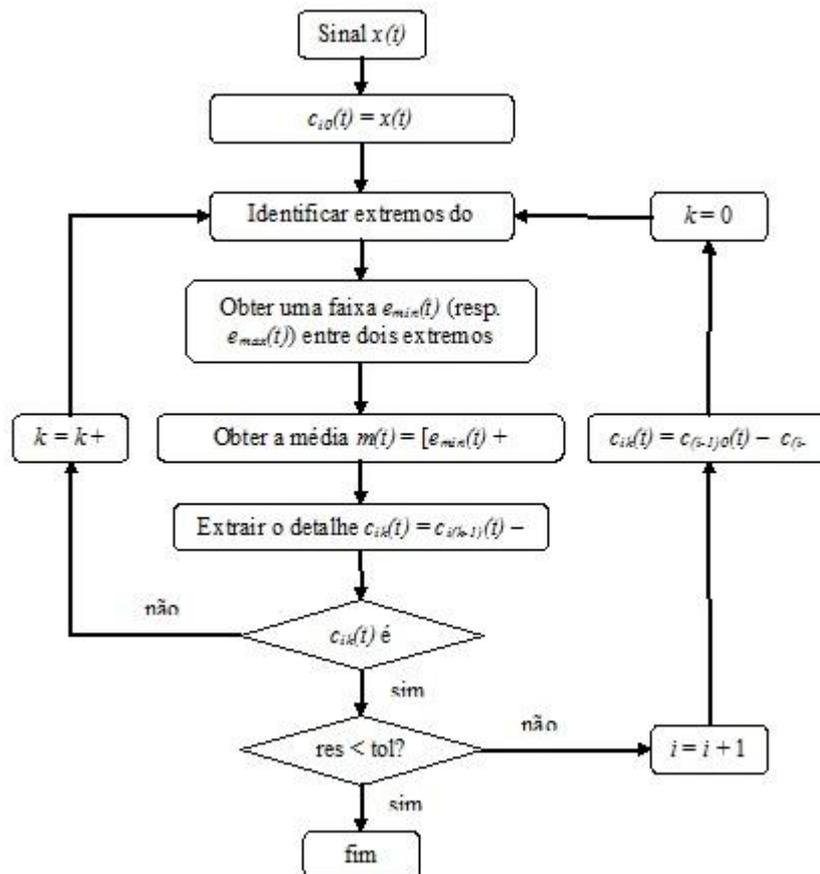


Figura 3.8: Fluxograma da EMD

Capítulo 4

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Dimensionamento de um defeito simulado via TOFD

Com o ensaio feito no corpo de prova referente à Figura 3.3, foi possível detectar e dimensionar o defeito com uma precisão satisfatória, conforme demonstram os cálculos a seguir.

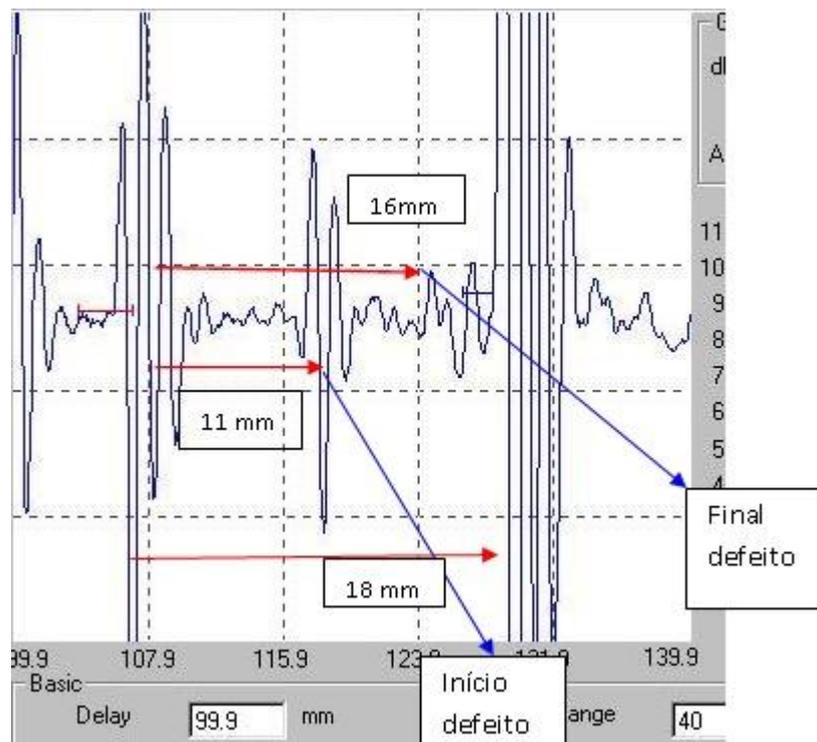


Figura 4.1: Sinal utilizando TOFD relativo a um defeito interno, 5 MHz, cunha 70°.

Como se percebe nos sinais da Figura 4.1, há entre o eco de entrada e o eco de fundo os sinais referentes ao início e final do defeito. O equipamento USLT2000 permite avaliar, através da utilização de marcadores, o caminho do som percorrido entre cada pico de sinal, sendo eles de 11 mm e 16 mm. Considerando que a velocidade do som no aço carbono que é de 5920 m/s, pode-se determinar o tempo do som para estas correspondentes distâncias conforme segue.

Para o início do defeito (11 mm) tem-se:

$$t_1 = \frac{11}{5,92} * 2 = 3,71 \mu\text{s} \text{ (deve-se considerar o tempo de ida e de volta do som)}$$

Para o final do defeito (16 mm) tem-se:

$$t_2 = \frac{16}{5,92} * 2 = 5,40 \mu\text{s}$$

Para o eco de fundo (s), tem-se:

$$t_{gw} = \frac{18}{5,92} * 2 = 6,08 \mu\text{s}$$

A distância entre os transdutores é de: $s = 64 \text{ mm}$

A profundidade do defeito pode ser avaliada utilizando-se a equação (2.6):

$$d = \frac{\sqrt{C^2 t_1^2 - 4S^2}}{2} = \frac{\sqrt{5,92^2 \cdot 10^{12} 3,71^2 \cdot 10^{-12} - 4 \cdot 6,4^2}}{2} = 8,9 \text{ mm}$$

O diâmetro do defeito pode ser determinado pela equação (2.7) como segue:

$$L = \frac{\sqrt{C^2 t_2^2 - 4S^2}}{2} - d = \frac{\sqrt{5,92^2 \cdot 10^{12} 5,40^2 \cdot 10^{-12} - 4 \cdot 6,4^2}}{2} - 8,9$$

$$L = 5,74 \text{ mm}$$

A espessura da peça pode ser determinada pela equação (2.8):

$$H = \frac{\sqrt{C^2 t_{gw}^2 - \frac{S^2}{2}}}{2} = \frac{\sqrt{5,92^2 6,08^2 - \frac{6,4^2}{2}}}{2}$$

$$H = 17,85 \text{ mm}$$

Considerando os resultados obtidos, nota-se que houve um erro relativo percentual em relação aos valores de referenciais do defeito simulado. Com relação à profundidade do defeito, e como este possui diâmetro pré-definido de 3 mm e se encontra no centro da chapa, pode-se considerar que a parte superior do furo corresponde a uma profundidade de 8,5 mm. Como a profundidade avaliada foi de 8,9 mm, isto corresponde a um erro de aproximadamente 5%.

No caso do diâmetro do defeito, o valor medido através da técnica TOFD foi de 5,74 mm para um valor real de 3 mm, o que corresponde a um erro muito alto (aprox. 90%). Com relação à espessura da peça, o valor avaliado foi de 17,85 mm para uma chapa real de 20 mm, correspondendo a um erro de aproximadamente 12%. Ao analisar esses resultados, percebe-se que a provável discrepância nos erros obtidos possa ser originada da medição.

Os sinais obtidos são muito sensíveis ao posicionamento dos transdutores, sendo que existe a necessidade de se tomar o cuidado no correto ajuste de distância entre os transdutores, os mesmo tem de estar bem acoplados, ou seja, a falta de acoplante entre a sapata e o corpo de prova, pode interferir na aquisição dos sinais correspondentes à parte superior e inferior do defeito, bem como as ondas laterais e de fundo da peça. O que torna a tarefa muito difícil de ser executada.

Portanto, como orientação para identificação correta destas ondas, a Figura 4.2 mostra que, com relação à onda lateral e parte inferior do defeito, o primeiro pico do sinal é positivo; com relação à parte superior do defeito e eco de fundo da peça o primeiro pico é negativo; o procedimento correto para medição dos tempos t_1 , t_2 , t_L e t_{gw} , os mesmos devem corresponder à condição na qual se obtém a máxima amplitude do sinal.

Para facilitar a avaliação correta de um defeito, o sistema USLT 2000 permite a avaliação dos sinais em algumas posições específicas, tais como o flanco e o pico da onda ultrasônica.

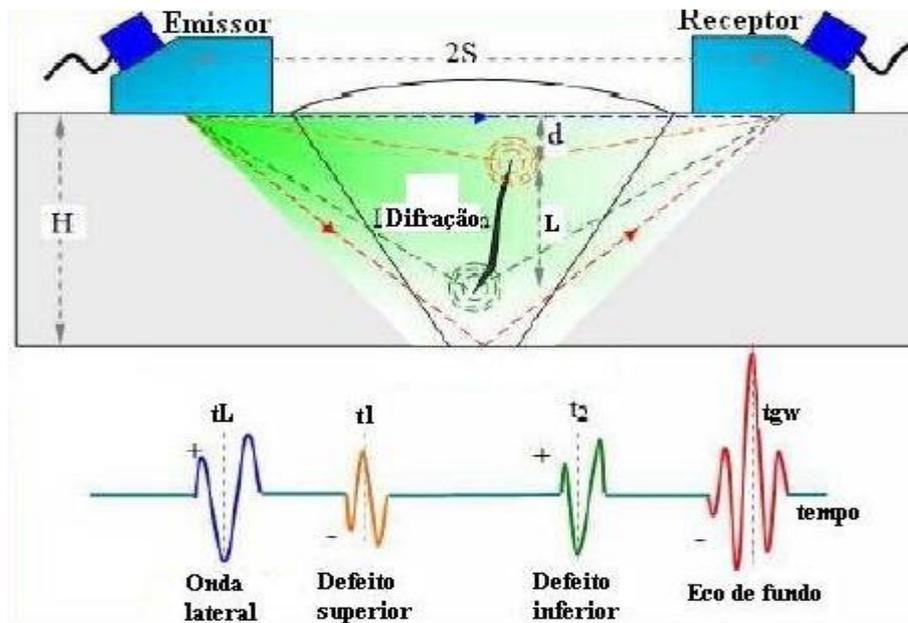


Figura 4.2: Detalhes do modo de identificação dos sinais oriundos do TOFD.

4.2 Análise da inspeção de chapas superiores a 10 mm utilizando TOFD

Conforme descrito anteriormente, é possível perceber que houve variação na determinação do real tamanho do defeito padronizado. Para uma maior precisão foi aplicado à técnica estatística DOE (*Design of experiments*) aos ajustes de frequência e tipo de ângulos para minimizar esta discrepância na determinação real do defeito.

A Tabela 4.1 mostra os novos dados obtidos com relação à inspeção no corpo de prova referente à Figura 3.3 e 3.4.

Tabela 4.1: Resultados obtidos para análise da influência do ângulo, frequência dos transdutores para dois defeitos diferentes.

Testes	Fatores			Respostas					
	Diam	F	Ang	d	Erro_d%	L	Erro_L%	H	Erro_H%
-	mm	MHz	°	mm	%	mm	%	mm	%
1	3	5	45	7,05	11,88	2,95	1,67	17,53	8,70
2	3	5	60	8,94	11,75	3,37	12,33	18,55	3,39
3	3	5	70	8,40	5,00	3,28	9,33	18,64	2,92
4	3	10	45	10,91	36,30	3,69	23,00	19,08	0,63
5	3	10	60	10,18	27,30	3,65	21,67	19,42	1,15
6	3	10	70	9,45	18,10	3,53	17,70	19,85	3,39
7	6	5	45	6,35	0,79	7,27	17,26	18,95	0,79
8	6	5	60	6,25	0,79	7,28	17,42	19,43	1,73
9	6	5	70	5,29	16,03	5,58	10,00	19,58	2,51
10	6	10	45	6,19	16,40	7,18	15,81	19,97	4,55
11	6	10	60	7,18	13,97	7,27	17,26	20,41	6,86
12	6	10	70	7,13	13,17	7,03	13,39	20,51	7,38

De posse dos resultados, os dados foram processados utilizando o software Minitab® versão 14 e realizada a análise de variância – ANOVA. Para se determinar a influência significativa dos fatores, foi considerado um nível de significância α de 95%. Portanto, fator P_{value} inferior a 0,05 denota significância dos fatores.

A Tabela 4.2 mostra a análise de variância para os resultados obtidos, sendo que os valores em negrito se referem àqueles significativos nas respostas. Observando os resultados nota-se que as respostas obtiveram um fator de correlação razoável. Entretanto, estes resultados podem ser melhorados pela eliminação dos fatores não significativos, tendo-se que levar em consideração o princípio da hierarquia. A Tabela 4.3 mostra a nova análise de variância obtida, desconsiderando os fatores insignificantes. Percebe-se que a correlação teve uma pequena melhora, sendo considerado este resultado para efeito de análises. Para a profundidade do defeito, observa-se que o diâmetro e a frequência, bem como as interações do diâmetro e da frequência com o ângulo de cunha, foram significativos no erro relativo de medição. Para o tamanho do defeito, a frequência isoladamente e a interação do diâmetro com a frequência foram significativos no erro relativo de medição. Finalmente, com relação à espessura da peça apenas a interação do diâmetro com a frequência se mostrou significativa.

Tabela 4.2: Análise de Variância dos resultados

Parâmetros	p_value		
	Erro_d	Erro_L	Erro_H
Diam	0,022	0,612	0,621
f	0,005	0,026	0,610
Ang	0,331	0,498	0,741
ang * ang	0,736	0,148	0,550
Diam * f	0,135	0,037	0,011
Diam * ang	0,041	0,283	0,135
f * ang	0,070	0,415	0,084
R2	93,9	87,1	88,3
R2adj	83,1	64,6	67,8
Pvalue resíduos	0,912	0,414	0,246

Tabela 4.3: Análise de Variância dos resultados eliminando fatores pouco significativos.

Parâmetros	p_value		
	Errod_(%)	Erro L_(%)	Erro H_(%)
Diam	0,010	0,600	0,595
f	0,002	0,018	0,582
Ang	0,260	0,483	0,777
ang * ang	*	0,129	*
diam * f	0,095	0,025	0,005
diam * ang	0,022	0,263	0,103
f * Ang	0,042	*	0,059
R²	93,7	84,5	87,0
R²_{adj}	86,1	65,8	71,5
P_{value} resíduos	0,448	0,986	0,584

4.2.1 Análise da influência sobre a determinação da profundidade do defeito

A Figura 4.3(a) mostra os efeitos principais dos parâmetros sobre a profundidade do defeito. Observa-se que a frequência do transdutor foi o fator mais significativo na minimização do erro médio de medição, sendo que a utilização do transdutor de 5 MHz,

conjuntamente com a inspeção do furo de 6 mm, permitiram a melhor precisão na previsão dos resultados. Por outro lado, os resultados mostram que os ângulos de cunha dos transdutores em princípio não influenciaram nos resultados. Porém, ao se analisar a superfície de resposta para a interação significativa da frequência com o tamanho do defeito, na Figura 4.4, observa-se que para o menor defeito a utilização do ângulo de cunha de 70° permitiu a melhor previsão do resultado. Por outro lado, com o maior defeito o ângulo de 45° gerou uma melhor condição de previsão. Considerando a incidência das ondas sonoras, na condição do maior defeito, a cunha de 45° fez com que as respostas apresentassem uma maior amplitude para o eco referente à parte superior do defeito, ao passo que no ângulo de 70° a condição de um menor defeito a incidência maior se dá para o ângulo maior, permitindo uma melhor previsibilidade dos resultados e minimizando os erros de avaliação. Tais resultados são confirmados ao se observar as superfícies de respostas nas figuras 4.5(a) e 4.5(b) com a utilização de um transdutor de 5 MHz.

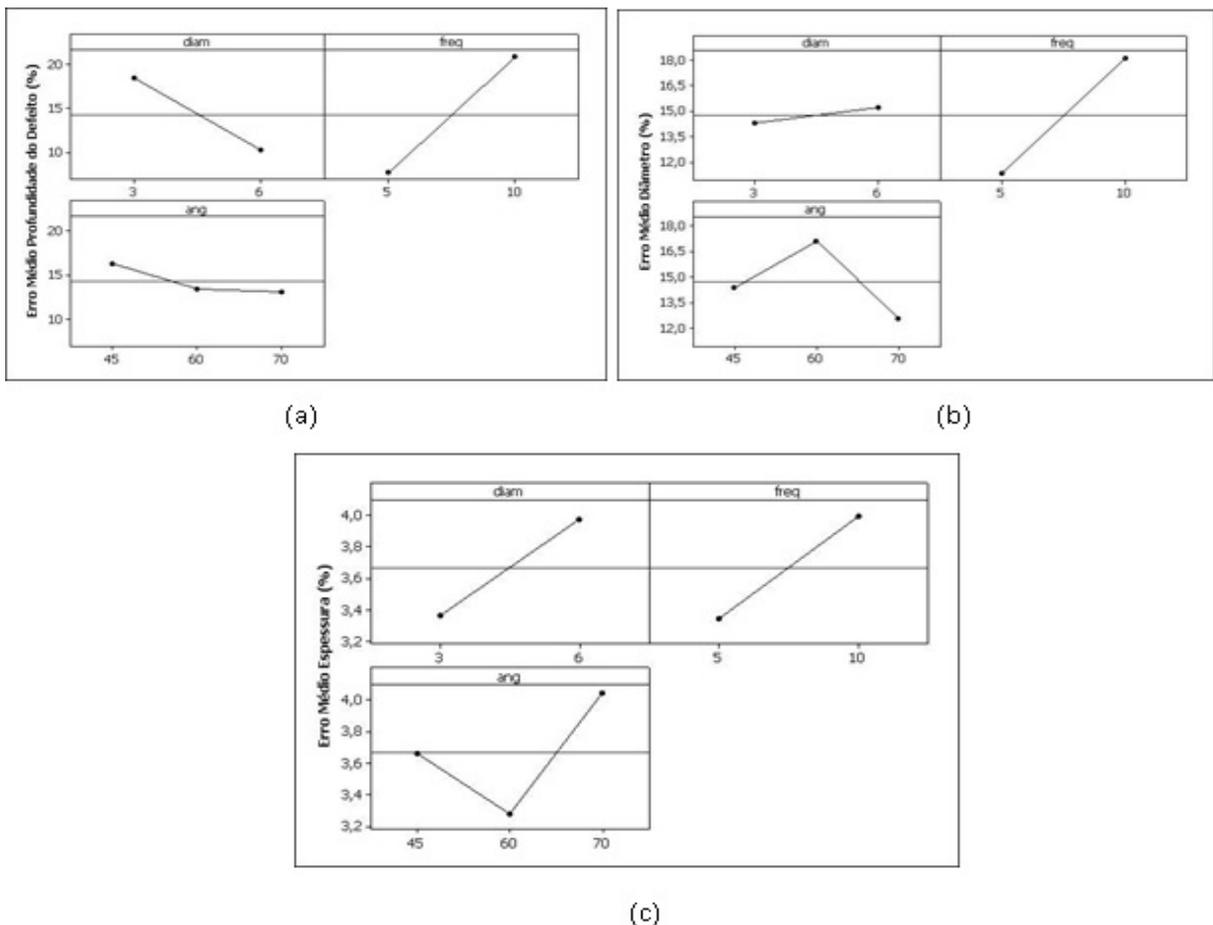


Figura 4.3: Efeitos principais dos fatores nos erros de avaliação relativos: (a) profundidade do defeito; (b) dimensão do defeito; (c) espessura da peça.

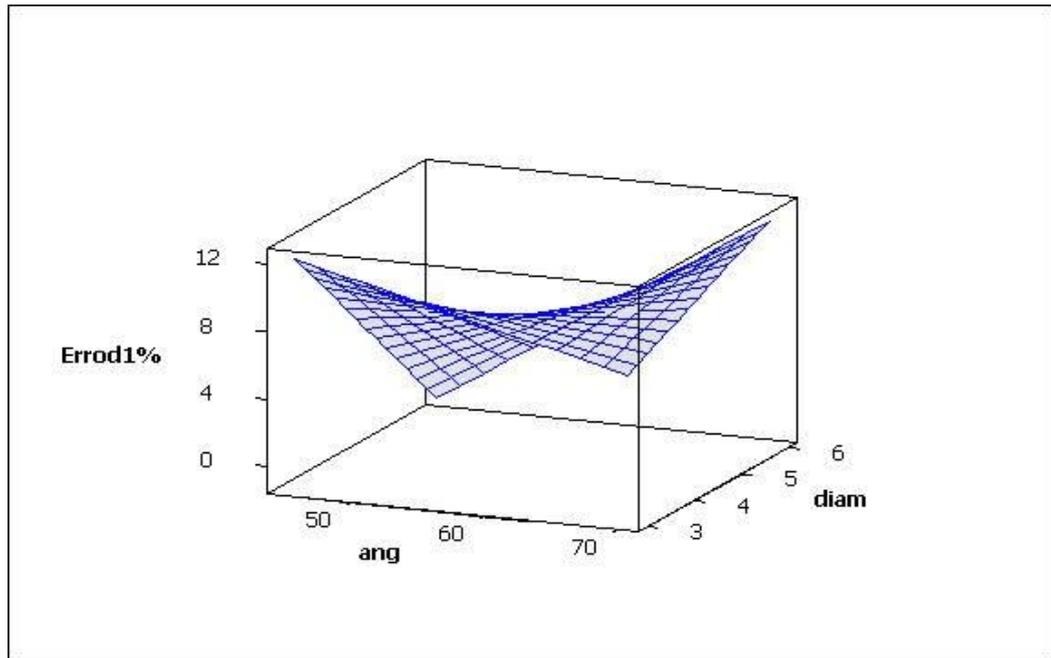
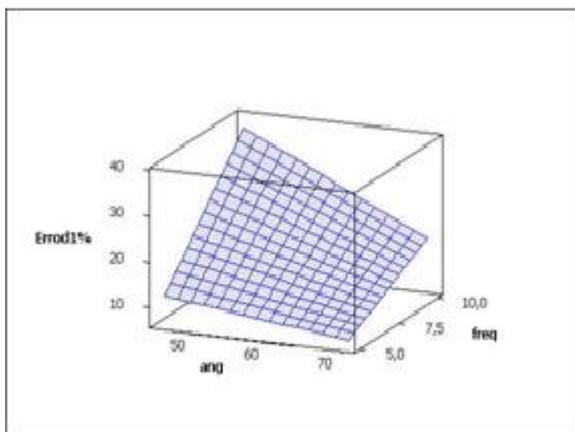
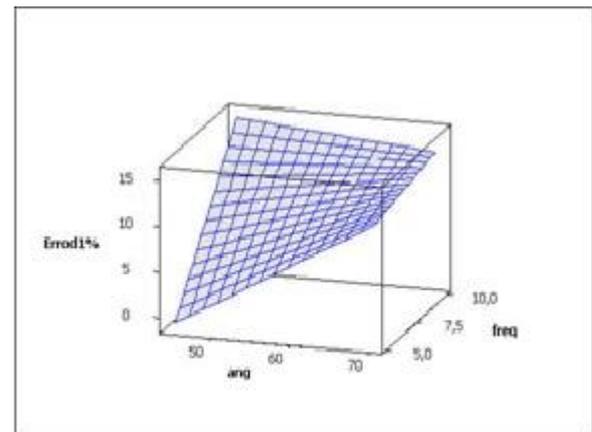


Figura 4.4: Superfície de resposta para o erro de profundidade considerando a interação entre o ângulo de cunha na detecção de um defeito pré-definido. Transdutor de 5 MHz.



(a)



(b)

Figura 4.5: Superfície de resposta para o erro de profundidade relativo a interação entre a frequência e ângulo da cunha. (a) defeito 3 mm; (b) defeito 6 mm.

Para analisar a influência dos ângulos de cunha na previsão dos resultados, as Figuras 4.6(a) e (b) mostra a interpolação dos espectros ultrassônicos para os dois defeitos simulados quer sejam 3 mm e 6 mm quando utilizados transdutores de 5 MHz, e ângulos de 45° e 70° respectivamente. Resulta-se que a faixa de medição de ajuste (*range*) foi mantida constante em ambos os casos, bem como a distância entre os transdutores na inspeção TOFD. Observando a Figura 4.6(a) que corresponde ao pequeno defeito, nota-se que para o ângulo de 70° há uma melhor definição da presença do defeito, representado pela maior amplitude dos ecos difratados referentes às partes superior e inferior do defeito. Com relação à faixa de

medição, nota-se que para o ângulo de 45° há uma redução da faixa de medição entre a onda lateral e o eco de fundo, o que diminui a precisão de medição. Para o furo de 6 mm (maior defeito), percebe-se que a utilização da cunha de 45° , Figura 4.6(b), resultou na geração de um eco da parte inferior com amplitude maior que o da parte superior (diferente das outras situações). Isto revela que neste caso afastamento adotado entre transdutores (64 mm) e o ângulo de propagação adotado permitiram, muito provavelmente, uma propagação mais intensa das ondas ultrasônicas atingindo a parte inferior do defeito, resultando na amplitude maior. A medição neste caso se torna mais precisa nesta condição, o que pode justificar os resultados obtidos.

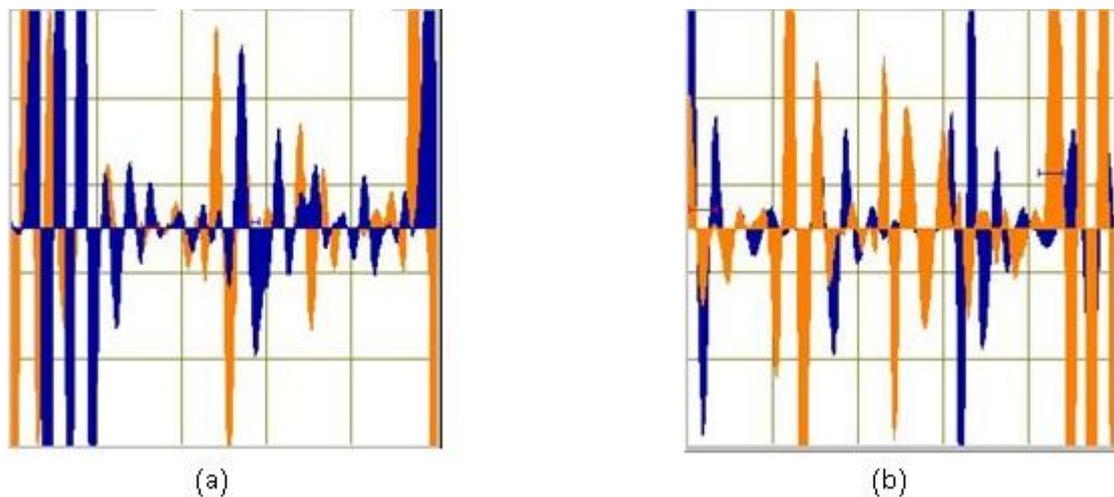


Figura 4.6: Espectros ultrasônicos simultâneos para transdutor de 5 MHz: (a) Furo 3 mm, espectro azul - 45° , espectro laranja - 70° ; (b) Furo 6 mm, espectro azul - 45° , espectro laranja - 70°

4.2.2 Análise da influência sobre a determinação do tamanho do defeito

Considerando os efeitos principais dos fatores, observa-se da Figura 4.3(b) que apenas a frequência se mostrou significativa na minimização do erro de medida da dimensão do defeito, e que, tal qual na profundidade do defeito, a utilização de um transdutor de 5 MHz se mostrou como a opção mais adequada. Muito embora o efeito do ângulo da cunha não tenha se mostrado significativo, há a tendência de que o ângulo de 70° apresenta uma minimização do erro de medição. Ao analisar a superfície de resposta da interação significativa do tamanho do defeito e frequência do transdutor para um ângulo de cunha de 70° , Figura 4.7, nota-se que independentemente do tamanho do defeito, a frequência de 5 MHz se mostrou a mais adequada na previsão real da dimensão do defeito.

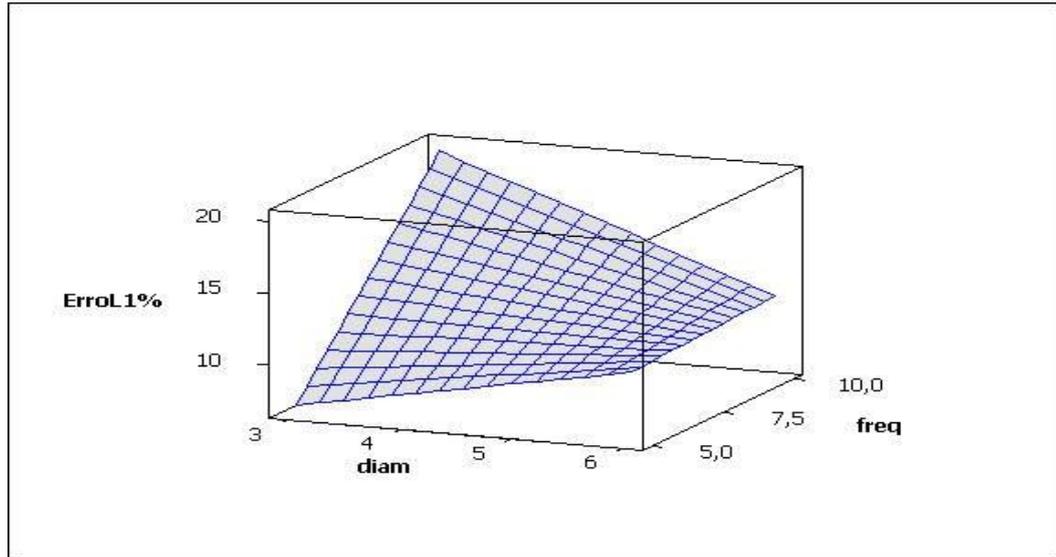


Figura 4.7: Superfície de resposta para o erro de tamanho do defeito considerando a interação entre a frequência do transdutor. Ângulo da cunha 70°

4.2.3 Análise da influência sobre a determinação da espessura da peça

Considerando os efeitos principais dos fatores, observa-se da Figura 4.3(c) que nenhum dos parâmetros isoladamente se mostraram significativos. Há apenas a tendência de que a frequência de 5 MHz e ângulo de cunha de 60° apresentem como os melhores resultados quando aplicados ao menor defeito de 3 mm. Entretanto, ao analisar a interação significativa da frequência com o ângulo de cunha, na Figura 4.8, observa-se que algumas combinações se fazem presentes. Caso se opte por trabalhar com transdutores de 10 MHz, a cunha de 45° se mostra como a mais adequada na previsão da espessura da peça. Porém, caso se utilize transdutores de 5 MHz, as cunhas de 60° e 70° se mostram mais adequadas. Como a cunha de 70° se mostrou mais adequada para a previsão da profundidade e dimensão do defeito, esta opção se torna interessante a ser utilizada também nesta condição.

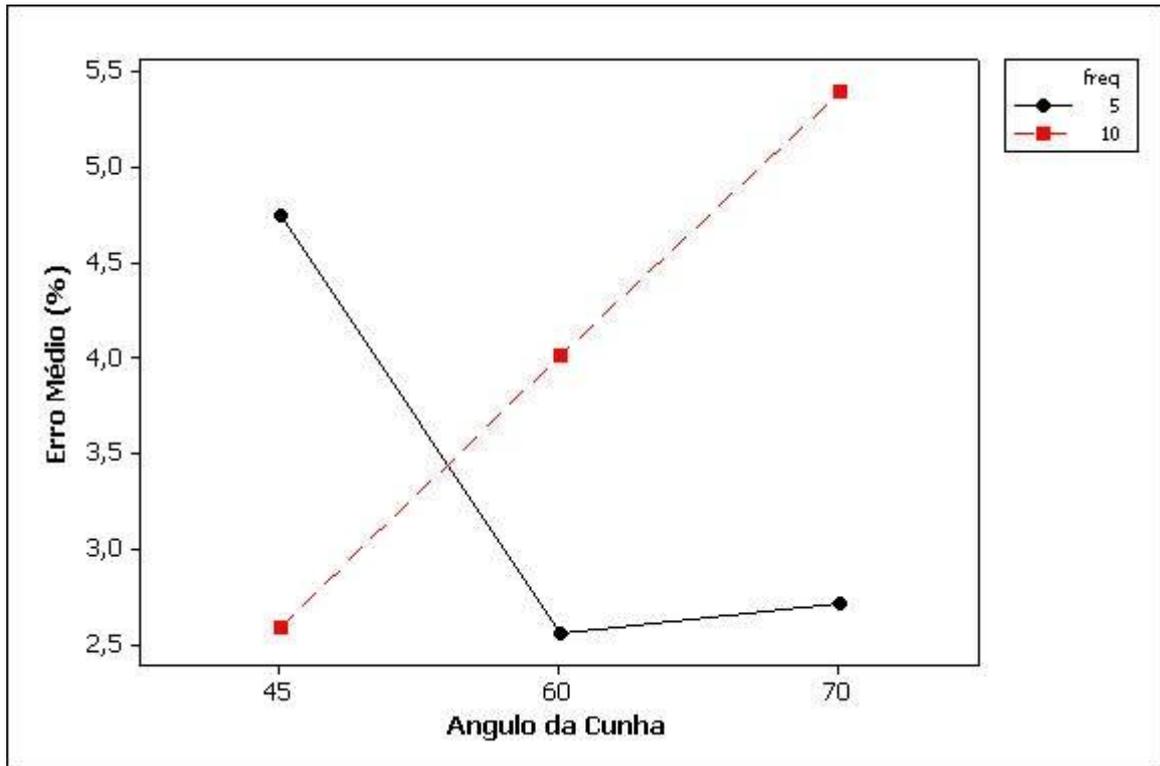


Figura 4.8: Influência da interação entre a frequência do transdutor e o ângulo de cunha na determinação do erro de determinação da espessura da peça inspecionada.

4.3 Análise da detecção de um defeito simulado com montagem assimétrica

A distância entre os transdutores foi mantida em 64 mm e os mesmos foram dispostos simetricamente e assimetricamente em relação ao defeito conhecido referente ao furo T12 da Figura 3.3. Utilizando-se o equipamento USLT 2000 com ganho de 64 dB, os sinais oriundos da inspeção estão mostrados nas Figuras 4.9 e 4.10, com sinais sobrepostos, sendo eles diferenciados pela cor azul que caracteriza a posição de montagem simétrica com relação ao defeito, e a cor laranja de posição de montagem assimétrico com relação ao defeito.

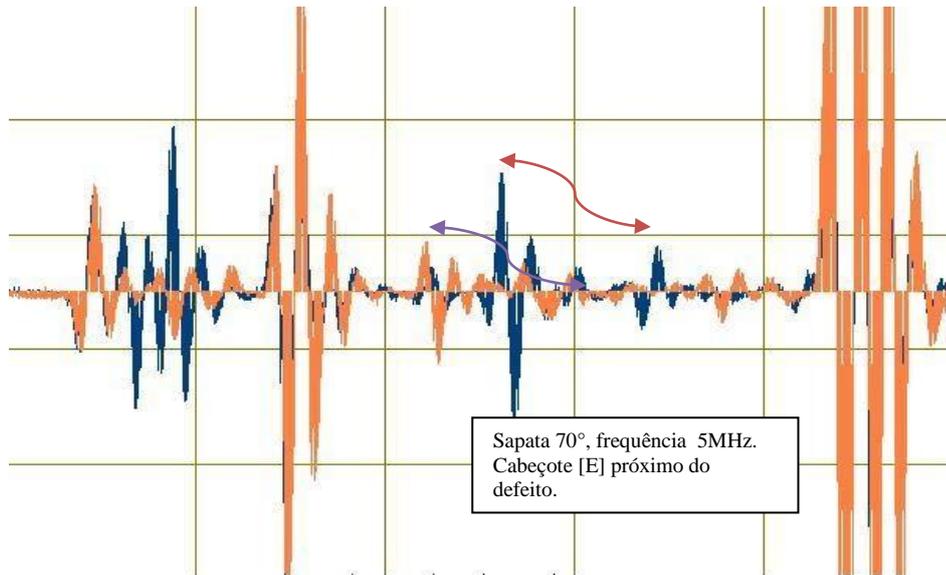


Figura 4.9: Representação do defeito de forma simétrica e assimétrica com emissor próximo ao defeito.

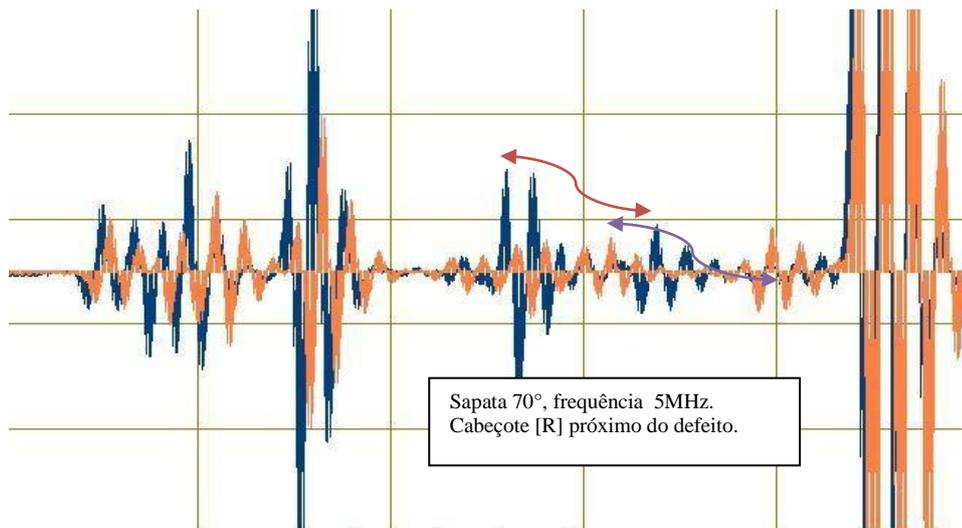


Figura 4.10: Representação do defeito de forma simétrica e assimétrica com receptor próximo ao defeito.

Com os resultados das experiências, pode-se observar que o melhor desempenho ocorreu com a sapata de 70°, e com frequência de 5 MHz, do que as demais combinações com outras sapatas de diferentes ângulos. No caso da frequência de 10 MHz, utilizando a mesma calibração, tivemos de ajustar o ganho em +10 dB devido a uma queda de amplitude do sinal.

Portanto, além de necessitar de um ganho maior para trabalho, a frequência de 10 MHz será inadequada, pois o comprimento de onda ficará tão pequeno que poderia-se estar

detectando sinais referentes ao contorno de grão do material em ensaio, o que não é de interesse neste trabalho. Entre estas observações e justificativas observou-se que a sapata de 70° e frequência de 5 MHz serão as melhores escolhas para este trabalho. Percebe-se uma melhor visualização do defeito, ou seja, uma maior amplitude e clareza no espectro do defeito para melhor interpretação. Com isso, pode-se comprovar que há possibilidade de detectar o defeito fora da posição simétrica.

4.4 Recomposição e análise dos sinais TOFD utilizando transformadas de Fourier

Para exemplificar esta rotina, considere-se o sinal oriundo da inspeção TOFD utilizando transdutores de 5 MHz e cunha de 70°, cujo sinal original é mostrado na Figura 4.15. A rotina desenvolvida no Matlab®, mostrado no Anexo I, permite recompor o sinal original representado pelo vetor “x” e seu posterior processamento. As Figuras 4.11 (a), (b) e (c) mostram os sinais reconstituídos a partir do sistema USLT 2000/TOFD utilizando o software Matlab® para o transdutor de 5 MHz e ângulos de 45°, 60° e 70°.

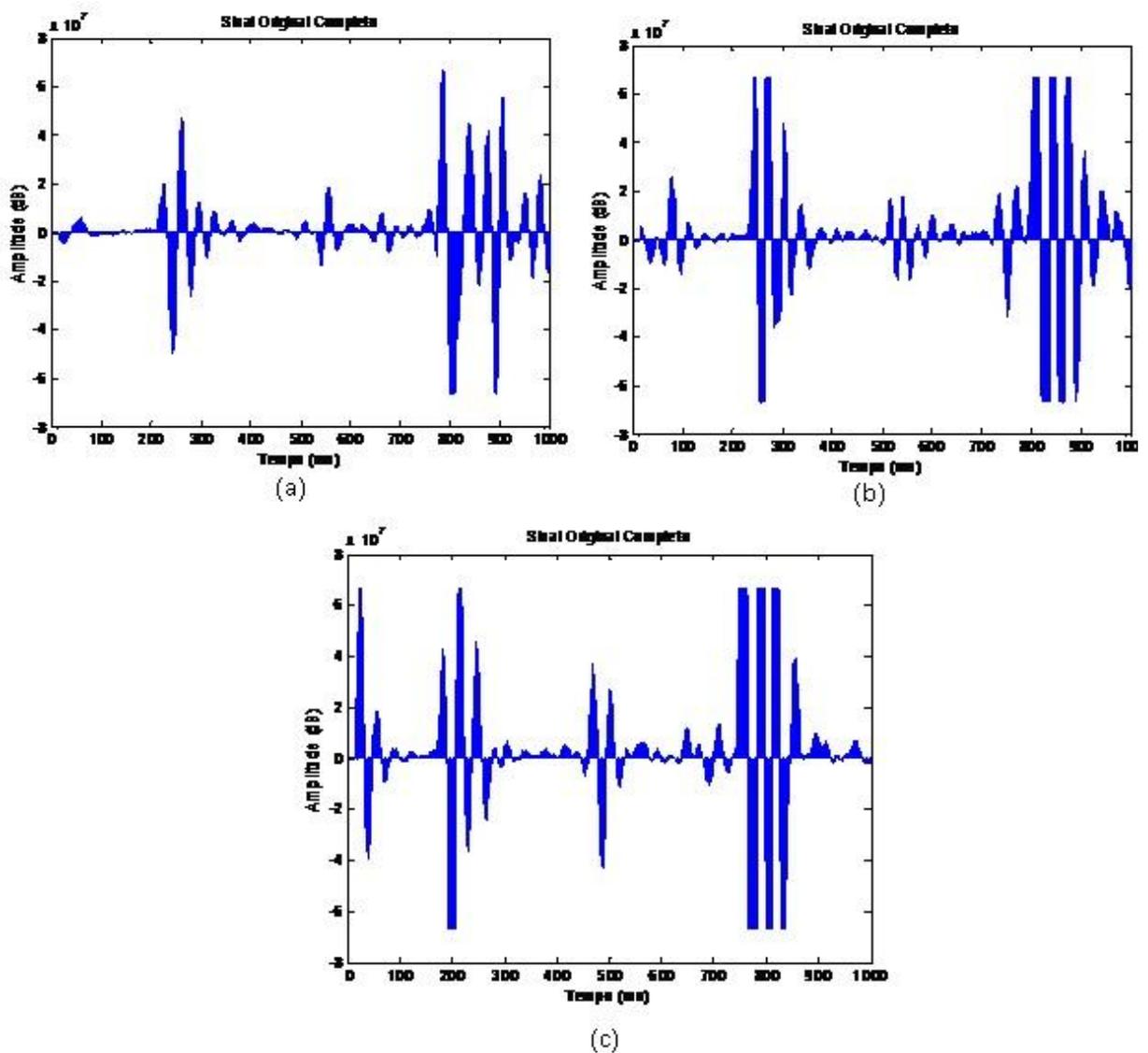


Figura 4.11: Sinais recompostos. (a) 5 MHz e 45°; (b) 5 MHz e 60°; (c) 5 MHz e 70°.

De posse dos sinais recompostos, torna-se possível então fazer algumas análises que permitam verificar diferenças entre os sinais adquiridos através da utilização de diferentes ângulos da cunha, e sua capacidade de detecção de defeitos. A Figura 4.14 faz uma comparação, a partir das “Transformadas Rápidas de Fourier – FFT”, entre os diferentes espectros sônicos em variadas condições de ensaio, utilizando o mesmo defeito. Percebe-se pelo histograma de frequências haver uma diferença quando da utilização de diferentes ângulos. A determinação do fator de eficiência e sua correspondente energia acumulada podem, utilizando a FFT, como mencionado por Gang & Chi (2008), permitir um melhor entendimento da forma de propagação dos sinais, e gerar uma melhoria da resolução e na previsão dos defeitos, aumentando a rapidez e precisão na detecção dos defeitos.

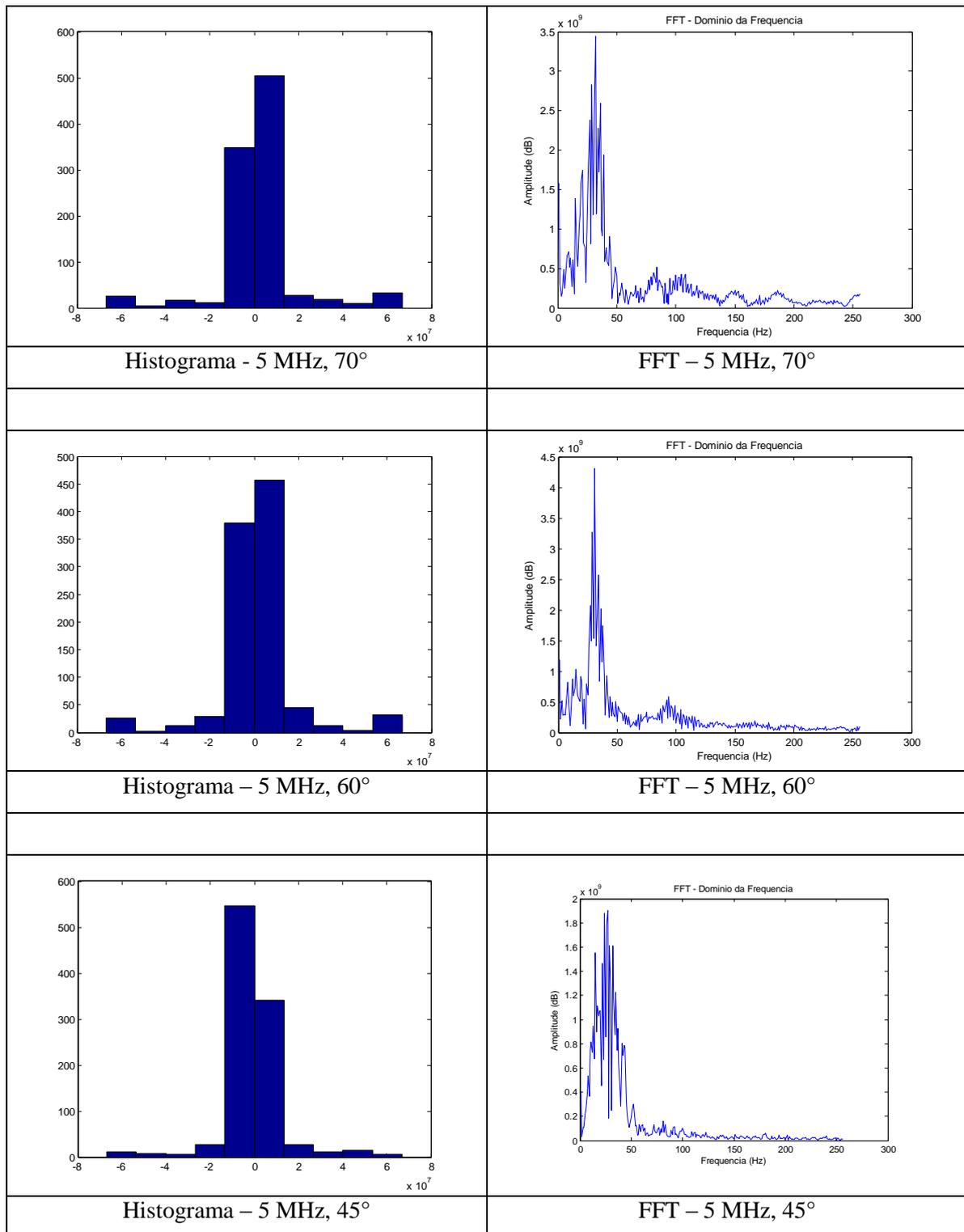


Figura 4.12: Comparação entre os diferentes espectros ultrassônicos sob diferentes ângulos de emissão das ondas longitudinais.

Para mostrar que a utilização da FFT permite detectar diferenças significativas entre as densidades espectrais, o Anexo II mostra o processamento estatístico utilizando o Teste de Hipótese não paramétrico de Mediana de Mood (*Minitab*) para os transdutores com frequências de 5 MHz e 10 MHz, com ângulos de incidência de 45°, 60° e 70°. Observa-se

dos resultados haver diferenças significativas entre os sinais e suas respectivas densidades espectrais, o que pode ser um caminho a ser seguido para as análises de sinais originadas pela técnica TOFD.

4.5 Recomposição e análise dos sinais TOFD utilizando transformadas de Hilbert

O algoritmo da EMD apresentado na Figura 3.8 foi aplicado a um sinal típico de TOFD, Figura 4.13, o qual mostra os sinais correspondentes a um furo de 3 mm localizado no centro de uma peça de 19,2 mm. O resultado dessa aplicação é apresentado na Figura 4.14.

Feita a decomposição, cada modo contém informações diferentes sobre o sinal. Alguns são úteis, enquanto outros não apresentam informações relevantes sobre o defeito detectado.

Portanto, a seleção dos modos para reconstrução do sinal apresenta um aspecto crucial para identificação do tempo de chegada. Assim, a aplicação da frequência e energia podem ser definidas como critérios de seleção.

Embora, a energia de sinais de ultrassom provavelmente estará concentrada em apenas dois ou três modos e frequências muito elevadas podem identificar os ruídos do sinal.

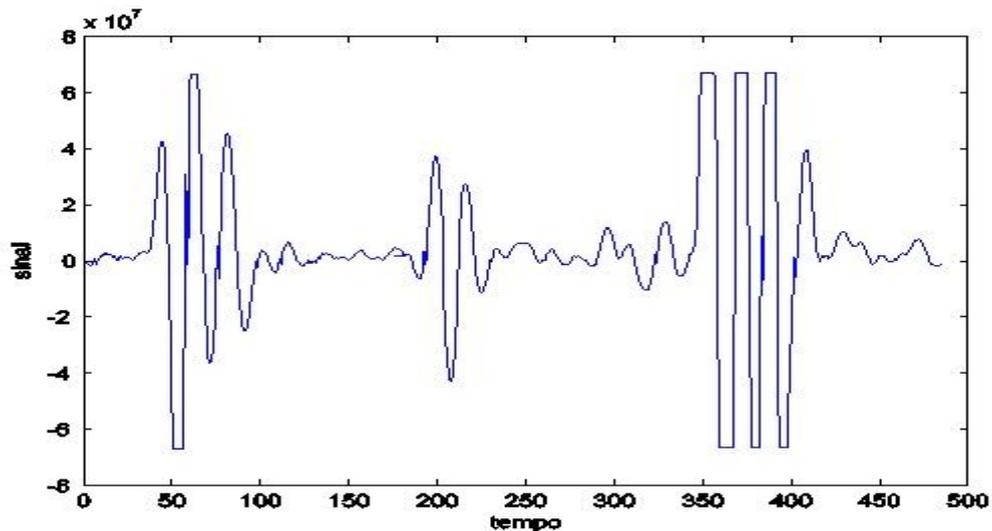


Figura 4.13: Sinal típico de TOFD.

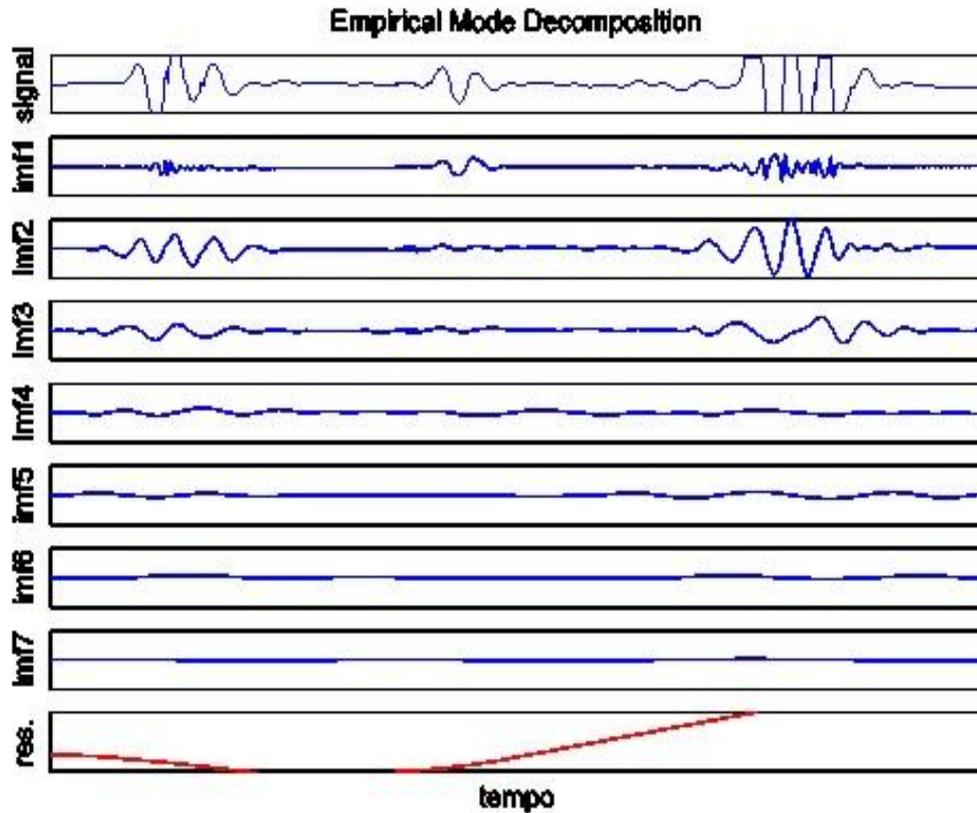


Figura 4.14: Exemplo da aplicação da EMD.

Utilizando o método de EMD, qualquer conjunto de dados complicado pode ser decomposto em um número finito e, muitas vezes pequeno de componentes. Estes componentes formam uma base completa e quase ortogonal para o sinal original. Além disso, eles podem ser descritos como funções do modo intrínsecas e a energia de cada modo empírico pode ser calculada através de:

$$E(i) = \sum_{t=1}^T c_i^2(t) \quad (4.3)$$

onde T é o número total de pontos da amostra.

Os modos a serem selecionados são os que possuem maior energia, significativamente.

No entanto, essa seleção é feita de forma empírica e, portanto, depende da experiência do engenheiro que opera o processo. Com isso, o sinal reconstruído a partir dos modos escolhidos é reescrito como:

$$y(t) = \sum_I c_i(t) \quad (4.4)$$

onde I é o conjunto de modos selecionados.

Após a decomposição, seleção e reconstrução, o sinal $y(t)$ possui melhor resolução e relação sinal/ruído. Em alguns casos, o tempo de chegada pode ser obtido diretamente. No entanto, utiliza-se a transformada de Hilbert para melhorar a precisão da informação.

A transformada de Hilbert do sinal $y(t)$ reconstruído é dada por:

$$y_H(t) = -Ae^{-\alpha t} \sin(t) \quad (4.5)$$

onde A é a amplitude e α é o fator de decaimento para qualquer sinal RF. O sinal pode ser representado, analiticamente, por:

$$y_A(t) = y(t) + j \cdot y_H(t) \quad (4.6)$$

Com módulo:

$$|y_A(t)| = Ae \quad (4.7)$$

Uma vez que a decomposição baseia-se na escala de tempo característica local dos dados, ele pode ser aplicado a processos não estacionários e não-lineares. Logo através da transformada de Hilbert, uma faixa do sinal analítico pode ser observada, parecida com uma distribuição Gaussiana, na qual os tempos de pico identificam os tempos de chegada do sinal.

A Figura 4.15 mostra o espectro de Hilbert para os dados da Figura 4.13, no qual o sinal é reconstruído a partir dos modos com relevância maior do que 5% na energia total do sinal.

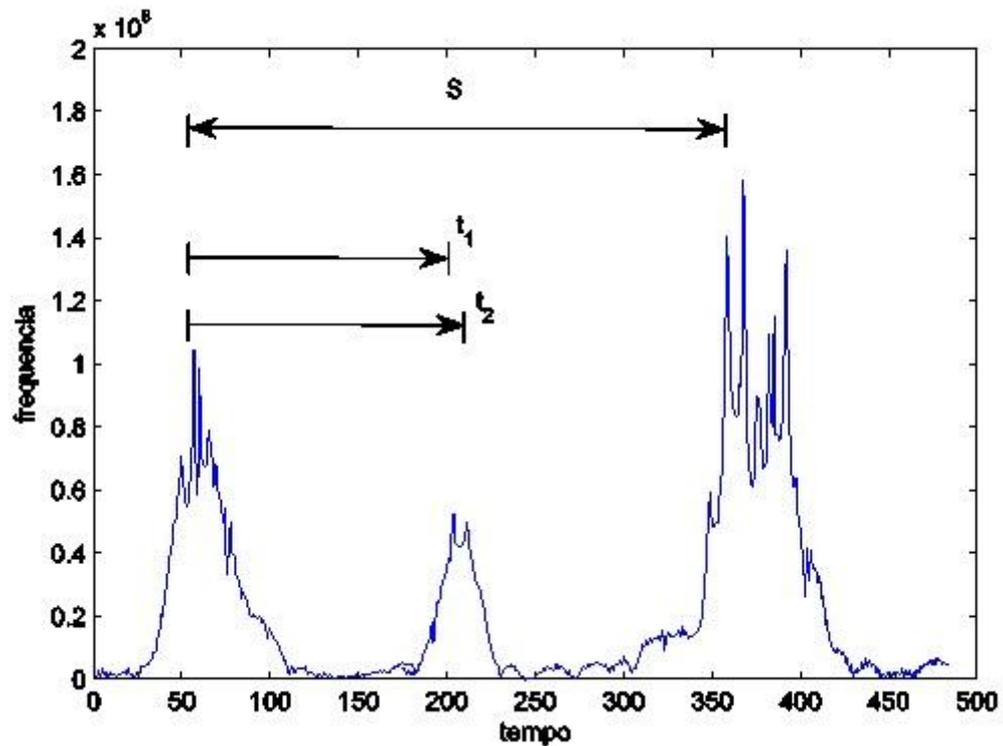


Figura 4.15: Espectro de Hilbert.

Na Figura 4.15 estão demarcadas as distâncias entre E e R (S), além da identificação do tempo de chegada das ondas difratadas no furo existente na peça (t_1 e t_2). A seguir, serão exploradas diferenças de padrões para diferentes tipos de defeito, utilizando a metodologia descrita acima.

4.5.1 Sinais Filtrados

Cada tipo de defeito em uma peça, como furo ou trinca interna, produz um padrão diferente de sinal TOFD. Dependendo do nível de ruído e/ou ganho do sinal, o tipo de defeito pode ser identificado diretamente. No entanto, utiliza-se a metodologia descrita na seção anterior como forma de obter informação mais precisa para identificação da deformidade.

Nesta seção, serão mostradas as diferenças presentes entre os sinais de TOFD obtidos em dois diferentes tipos de defeito: (i) um furo de 3 mm e (ii) uma trinca de 3 mm. A Figura 4.18 apresenta o sinal de TOFD obtido quando o defeito inspecionado é uma trinca. A Figura 4.17 apresenta o sinal de TOFD obtido quando o defeito inspecionado é um furo. Como critérios para seleção foram escolhidos os modos que apresentam participação maior do que 10% no sinal total. Assim, os três primeiros modos foram utilizados para reconstrução do

sinal, conforme mostra a Tabela 4.6. A Figura 4.18 e Tabela 4.7 trazem as mesmas informações para uma trinca de 3 mm. Note que, no caso da trinca, apenas os modos 2 e 3 são utilizados para reconstruir o sinal a ser analisado.

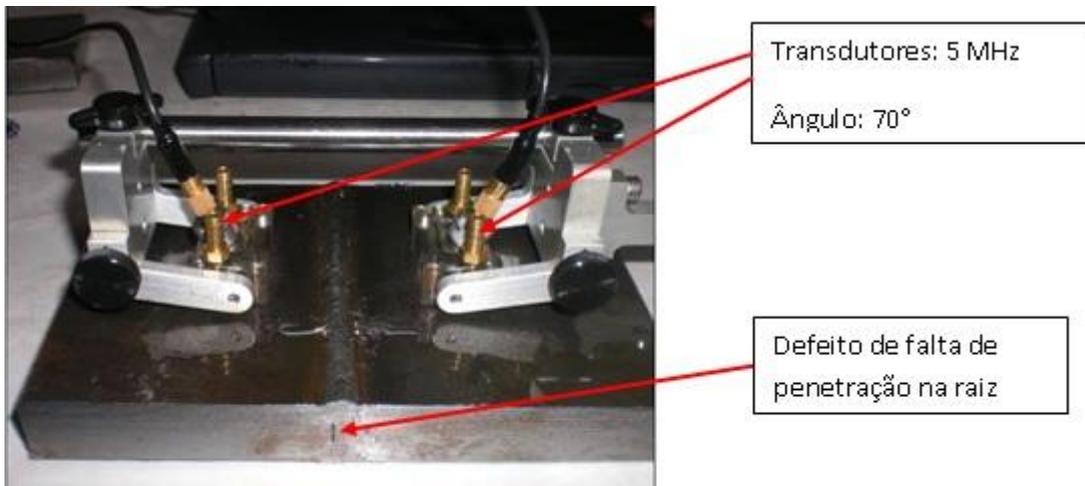


Figura 4.16: Inspeção TOFD em uma chapa solda, junta de topo, chanfro V, com defeito de uma trinca.

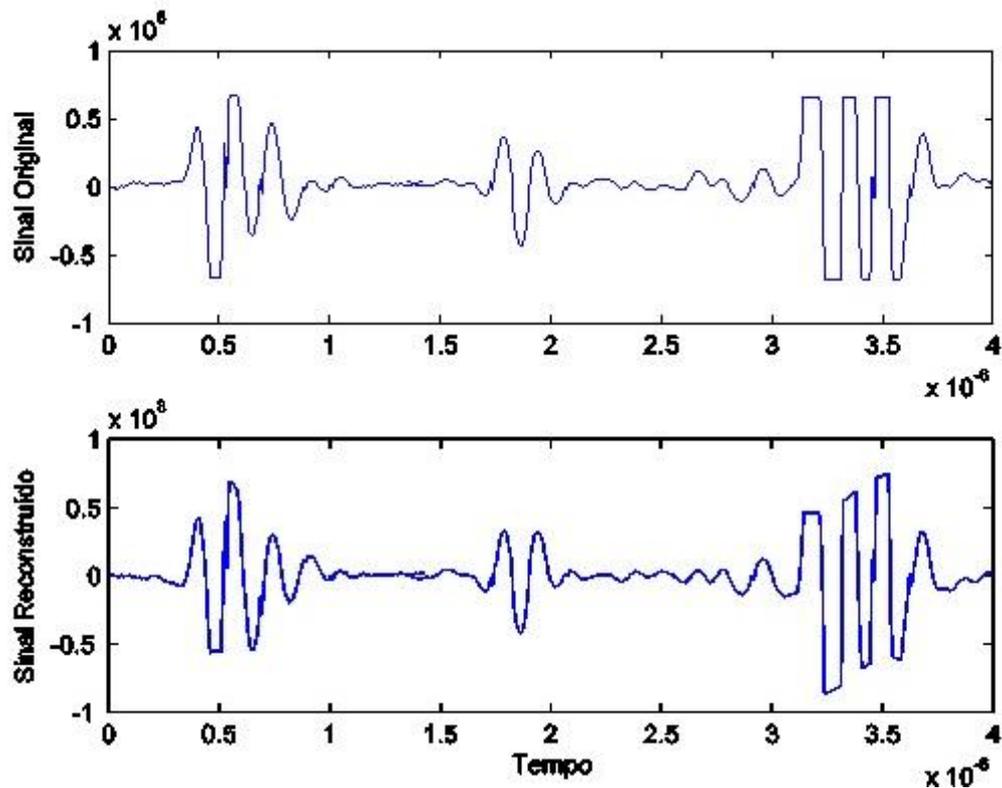


Figura 4.17: Sinal TOFD de um furo de 3 mm e sinal reconstruído através da EMD.

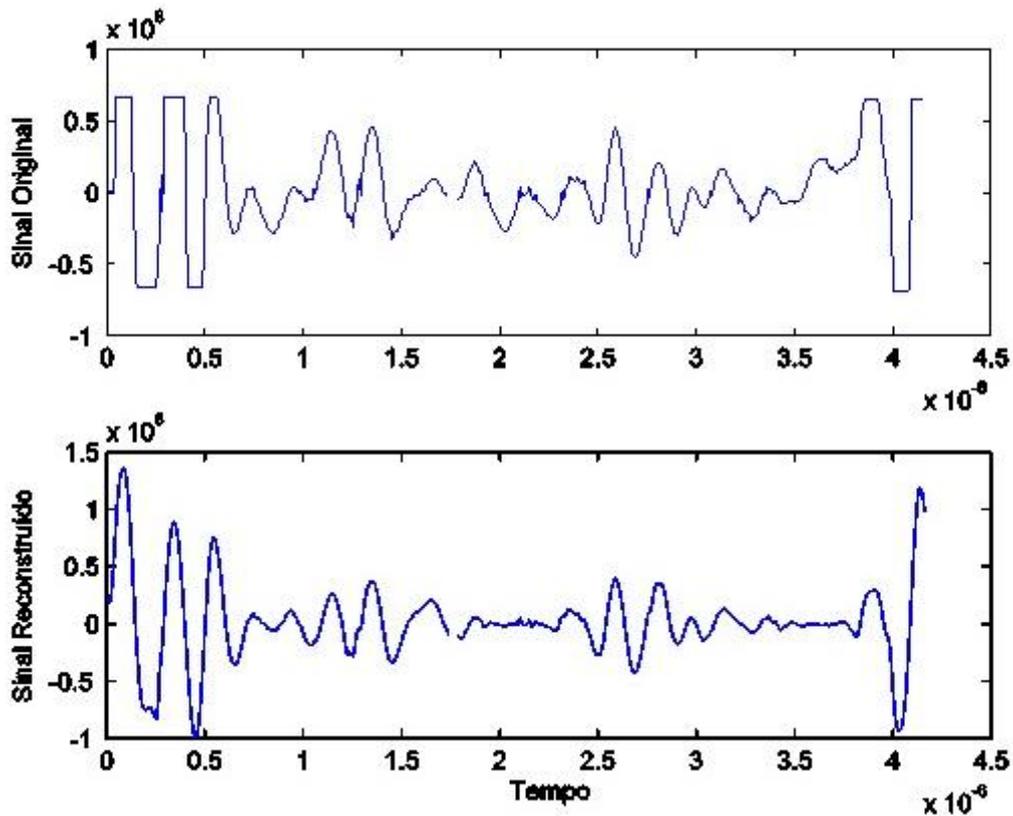


Figura 4.18: Sinal TOFD de uma trinca 3 mm e sinal reconstruído através da EMD.

Tabela 4.4: Energia dos modos obtidos pela EMD para o furo de 3 mm

Modo	1	2	3	4	5	6	7	Resíduo	Total
Energia (10^6)	3.95	23.02	6.75	0.78	0.42	0.12	0.04	0.42	35.52
Relevância %	11.12	64.83	19.02	2.19	1.19	0.34	0.12	1.18	100

Tabela 4.5: Energia dos modos obtidos pela EMD para uma trinca de 3 mm

Modo	1	2	3	4	5	6	7	Resíduo	Total
Energia (10^6)	4.88	10.62	34.97	3.92	3.80	0.61	1.20	0.45	60.44
Relevância %	8.07	17.57	57.86	6.49	6.28	1.01	1.98	0.74	100

Através das Figuras 4.17 e 4.18, pode-se perceber que os sinais reconstruídos, principalmente para a trinca, podendo ser considerados um sinal “limpo” e, portanto, melhor para identificar informações importantes do sinal de TOFD. Essas informações são utilizadas para identificar os tipos de defeitos.

As grandes oscilações que aparecem nas figuras 4.17 e 4.18 se referem à onda lateral e à onda de eco do fundo da peça. Na Figura 4.17 nota-se, ainda, um distúrbio no meio dessas ondas. Esse distúrbio se refere à difração da onda de ultrassom em função do furo presente na peça. No caso da trinca interna, a onda é difratada em dois pontos: no início da falha e no seu final. Sendo possível notar dois distúrbios entre as ondas da lateral e de eco de fundo.

Essas informações são facilmente visualizadas se for utilizada a transformada de Hilbert. Através desse tipo de transformação é possível obter o espectro de frequência do sinal e identificar o tempo de ocorrência dos distúrbios. A Figura 4.19 mostra esse espectro para cada um dos tipos de defeitos acima mencionados.

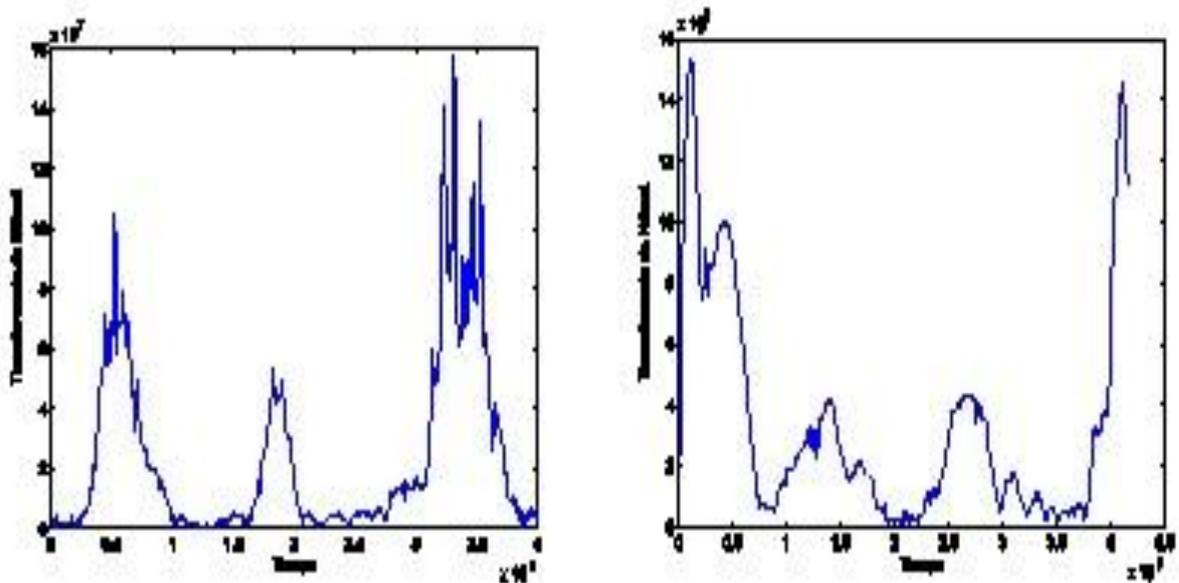


Figura 4.19 Transformada de Hilbert para os sinais de TOFD do furo e trinca respectivamente.

Na Figura 4.19, nota-se que no espectro de Hilbert, o furo apresenta apenas um pico, entre as ondas da lateral e de eco de fundo. Já no caso da trinca interna, há a presença de dois picos, demonstrando a difração da onda sônica nas extremidades da trinca. Assim, esse tipo de informação pode ser utilizado para diferenciar os diversos tipos de defeitos que podem estar presentes em uma peça. Além disso, a identificação do ponto exato da refração é muito mais precisa através da transformada de Hilbert, pois esta transforma as oscilações em picos.

Capítulo 5

5. CONCLUSÕES

5.1 Conclusões Gerais

Em função dos resultados e análises obtidos neste trabalho, foi utilizado a técnica TOFD para detectar defeitos pré-dimensionados. Para os casos estudados, envolvendo a detecção da profundidade do defeito, dimensão do defeito e espessura da peça, utilizando a técnica TOFD com transdutores de 5 MHz e 10 MHz e cunhas com ângulos de 45°, 60° e 70° para chapas acima de 10 mm de espessura, conclui-se que:

- Os resultados obtidos mostram que a precisão na detecção de defeitos através da inspeção TOFD é influenciada pela dimensão do defeito a ser detectado.
 - Para um pequeno defeito (3 mm), a melhor precisão nos resultados foi obtida para uma frequência de 5 MHz e ângulo de 70°. Comparando tais resultados com dados empíricos, observa-se a concordância dos resultados com relação ao ângulo da cunha. Entretanto, com relação à frequência, os resultados obtidos indicam uma melhor capacidade de detecção para frequência de 5 MHz, diferentemente dos dados empíricos que indicam 10 MHz;
 - Para um maior defeito (6 mm), resultados indicam que a melhor previsão foi obtida para a frequência de 5 MHz e ângulo de 45°.
- Não há necessidade de o par de transdutores estar simétrico ao defeito para que este seja detectado, ou seja, existe uma “Zona Quase Linear” delimitada pela

distância dos transdutores com relação ao defeito e à espessura da peça, permitindo assim que o defeito seja detectado mesmo em condições consideradas “inapropriadas”. Portanto, se a extremidade da descontinuidade estiver posicionada dentro desta “Zona Quase Linear” (ZQL), o erro de falha será mínimo

- A utilização da Transformada Rápida de Fourier (FFT) permitiu detectar diferenças significativas entre os sinais e suas respectivas densidades espectrais, o que pode ser um caminho a ser seguido para as análises de sinais originadas pela técnica TOFD.
- A utilização da Transformada de Hilbert em conjunto com a técnica EMD – Modo Empírico de Decomposição de Sinais permitiu uma melhor resolução e relação sinal/ruído. A utilização da frequência e energia podem ser utilizadas como critérios de seleção e comparação de defeitos, uma vez que a energia de sinais de ultrassom provavelmente estará concentrada em apenas dois ou três modos e frequências muito elevadas podem identificar os ruídos do sinal.
- A utilização da transformada de Hilbert na padronização de sinais relacionados aos dois tipos de defeitos (furo e trinca) mostrou que esta transformada permite a diferenciação entre os espectros de cada tipo, sendo no caso da trinca um espectro mais facilmente detectável.

5.2 Sugestões de Trabalhos Futuros

Com a realização deste trabalho surgiram novas idéias e metodologias de inspeção que podem ser implementadas e avaliadas através de trabalhos futuros. Segue abaixo algumas sugestões:

- Estudar a viabilidade de ensaios em materiais de baixa espessura, através da onda transversal difratada, com o objetivo de minimizar a zona morta dos transdutores;
- Aplicar o TOFD em conjunto com a técnica Phased Array, para que possa ser realizada a simulação do comportamento do feixe sônico no material de ensaio. Assim, teremos a possibilidade de direcionar toda energia sônica para o centro do defeito e corrigir os desvios que ocorre na inspeção;

- Ampliar à análise de materiais soldados, a fim de detectar e dimensionar defeitos típicos do processo de soldagem, como: falta de penetração, falta de fusão, trincas, entre outros;
- Analisar a aplicabilidade de novas transformadas no processamento digital de sinais, principalmente wavelets e transformadas de Lamb.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABSOLUTE, NDE. Ensaaios não destrutivos. 2012 Disponível em < <http://www.absolutende.com/pt/company/company.>> Acesso em 21 out 2015.

ANDREUCCI, R. “Ensaio por Ultrassom”, ABENDE, Ed. Jul. 2011;

ANTONY, J.; KAYE, M.; FRANGOU, A. “A Strategic Methodology to the use of Advanced Statistical Quality Improvement Techniques”. The TQM Magazine, v.10, n.3, p.169-176, 1998.

BARBIAN, O.A. Handbook automated ultrasonic testing systems. Berlim: 1ª ed.: DGZfP,. (IIW Handbook.), 119 p, 2004.

BARROS,P.M.; CALDEIRA,R. “TOFD como uma Técnica de Detecção e Dimensionamento de Descontinuidades”. 1^{ts} Conferência Nacional em Ensaaios Não Destrutivos, Lisboa, Portugal, 2009.

BS 7706. “Guide to Calibration and Setting-Up of the Ultrasonic Time of Flight Diffraction Technique for the Detection, Location and Sizing of Flaws”. British Standard Publications, London, 1993.

BASKARAN, G.; BALASUBRAMANIAM, K.; RAO, C.L. “Shear-Wave Time of Flight Diffraction (S-TOFD) Technique”, NDT & E International, v39, pp. 458-467, 2006.

BOSSUAT, B.; WALASZEK, H.; FLAVENOT, J.F. “Non-Destructive Evaluation by Time of Flight Diffraction Method Mechanical Applications”. ECNDT, France, 2006.

CEPEL, R.; THOMBS, L.; HO, D.; NEAL, S.P. “Statistical Analysis and Computer Generation of Spatially Correlated Acoustic Noise”. Journal of Nondestructive Evaluation, no. 26, pp. 29-32, 2007.

CHEN, J.; SHI, Y.; SHI, S. “Noise Analysis of Digital Ultrasonic Nondestructive Evaluation System”. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 76, pp. 619-630, 1999.

CHEN, T.; QUE, P; ZHANG,O; LIU,Q. “Ultrasonic Nondestructive Testing Accurate Sizing and Locating Technique Based on Time-of-Flight-Diffraction Method”, Russian Journal of Nondestructive Testing, Vol. 41, No. 9, pp. 594-601, 2005.

CHARLESWORTH,J.R.; TEMPLE,J,A,G. “Engineering Applications of Ultrasonic Time-of-flight Diffraction”. 2ºEd. 2001; 254p.

CORNWELL, I. & MCNAB, A. “Towards Automated Interpretation of Ultrasonic NDT Data”, NDT&E International, vol. 32, pp. 101-107, 1999.

CORREIA, C.; OTERO, R.; SULBARAN, G. “Classification of Real Flaws using Ultrasonic Signals”. NDT.net, pp. 29-32, 2007.

DARWISH, S.M. & AL-DEKHAL, S.D. “Statistical Models for Spot Welding of Commercial Aluminium Sheets”. International Journal of Machine Tools and Manufacture. v.39, no. 10, p.1589-1610, 1999.

DAVIM, J.P.; CHANDRAMOHAN, G.; BASAVARAJAPPA,S.” Some studies on drilling of hybrid metal matrix composites based on Taguchi techniques”. Vol.196, pp. 332–338, 2008 .

GANG, T. & CHI, D. “Ultrasonic TOFD Testing Model for Crack Measurement in Thick Wall Measurement”. 17th World Conference on Nondestructive Testing, Shangai, China, 2008.

GOUJON, N.S. Safety Implications of TOFD for in- Manufacture Inspections HSE Books, 2006

GUANARAJ, V. & MURUGAN, N. Prediction and optimization of weld bead volume for the submerged arc process – Part 1. Welding Research Supplement, p. 289-294, 2000.

HOOPGOOD, A.A. “Knowledge-Based Systems for Engineers and Scientists”, CRC Press, UK, 1990.

JARMULAK, J. et. al. “Case-based Reasoning for Interpretation of data from Nondestructive Testing”, Engineering Applications of Artificial Intelligence, v.14, n. 4, pp. 401-417, 2001.

LAVENDER,A.T.; TETRA,P.C. “Setting Realistic Tolerances on Equipment Substitution for Conventional, Paut and TOFD Ultrasonic Methods” NDT.net, pp. 30-36, 2012.

LLATA, J.R.; SARABIA, E.G.; ORIA, J.P. “Fuzzy Expert System with Double Knowledge Base for Ultrasonic Classification”. Expert Systems with Applications, 20, pp. 347-355, 2001.

MASNATA, A. & SUNSERI, M. “Neural Network Classification of Flaws Detected by Ultrasonic Means”. NDT&E International, 29, pp 87-93, 1996.

MONTGOMERY, D. C. “Design and Analysis of Experiments”. New York: John Wiley & Sons, 680 p, 1991.

MONTGOMERY, D. C. & RUNGER, G. C. “Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros”. Rio de Janeiro: LTC, 514p, 2003.

MOURA, E.P.; SILVA, R.R.; SIQUEIRA, M.H.S.; REBELLO, J.M.A. “Pattern Recognition of Weld Defects in Preprocessed TOFD Signals using Linear Classifiers”, Journal of Nondestructive Evaluation, v 23, No. 4, pp. 163-172, 2004.

MURAYAMA, R.; NAKAMURA, M.; YAMANO, M.; OOKUBO, H. “Study of Two Dimensional Inspection of Thin Sheets using Lamb Waves”, *Acoust. Sci & Tech.*, v23, n. 1, pp. 47-49, 2002.

NETO, B. B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. “Planejamento e Otimização de Experimentos”. Campinas: Editora Unicamp, 131 p, 1996.

NILO JÚNIOR, L. P. “Otimização de um Processo de Solda MIG/MAG para Aplicação na Indústria Automobilística através da utilização da Técnica do Projeto e Análise de Experimentos”. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Itajubá, 111p, 2003.

NIST. “What is design of experiments” (*aka DEX or DOE*)? Engineering Statistics Handbook. National Institute of Standards and Technology, US Department of Commerce, Gaithersburg, MD, 2000.

OLYMPUS, NDT. Non destructive testing. 2012 Disponível em < <http://www.olympus-ims.com/pt/ndt-tutorials/into/ut>> Acesso em 15 dez 2015.

QUIRK, J. “Achieving Greater Efficiency in NDT Inspections”. *Sensor Review*, no. 4, pp, 268-272, 1999.

RAJAGOPALAN, C.; RAJ, B. & KALYANASUNDARAM, P. “The Role of Artificial Intelligence in Nondestructive Testing and Evaluation”, *NDT & E International*, v. 30, no. 5, Page 330, 1997.

RIAH, M. & ABOLHASANY, M.R. “Substitution of Time-of-Flight Diffraction Technique for Nondestructive Test of Welds and Thick Layers of Steel: A Comparative Investigation”, *Russian Journal of Nondestructive Testing*, v. 42, no. 12, pp. 794-801, 2006.

SADOON, B. “An efficient simulation scheme for testing materials in a Nondestructive manner”, *Information Sciences*, Volume 137, Issues 1-4, pp. 43-51, 2001.

SANTOS, X. S. “Estudo de uma Nova Técnica de Medida do Tempo de Percurso da Onda Ultrasônica Usando o Espectro de Frequência”. Dissertação de Mestrado, Instituto de Engenharia Nuclear da Comissão Nacional de Energia Nuclear, Rio de Janeiro, 116 p., 2010.

SHEKHAR, C.; SHITOLE, C.N.; ZAHRAN, O.; AL-NUAIMY, W. “Combining Fuzzy Logic and Neural Networks in Classification of Weld Defects using Ultrasonic Time of Flight Diffraction”, *NDT.net*, v. 49, No. 2, pp. 79-82, 2007.

LIN, T. S.; HER, C. S., “Non-Destructive Evaluation of Depth of Surface Cracks Using Ultrasonic Frequency Analysis” *Sensors*, 14, 17146-17158; doi:10.3390/s140917146.,2014

SIQUEIRA, M.H.S. “Inspeção em Grandes Distâncias utilizando Ondas Ultrasônicas Guiadas e Inteligência Artificial”, Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2001.

SOLANA, P. & OCAÑA, J. L. A mathematical model for penetration laser welding as a free-boundary problem. *J Phys. D: Appl. Phys* 30. p. 1300-1313. 1997.

VERKOOIJEN, J. & MCLAY, A. "Increase in Reliability of the Time of Flight Diffraction Technique " 4th. European-American Workshop on Reliability of NDT, Netherlands, 2010

WASSINK, C. & DIJKSTRA, F. "Approaches for Developing Solutions for Specific NDT Problems". 2nd. Int. Conference on Technical Inspection and NDT, Teheran, 2008.

YANG, W.X.; HULL, J.B.; SEUMOUR, M.D. "A Contribution to the Applicability of Complex Wavelet Analysis of Ultrasonic Signals". *NDT&E International*, 37, pp. 497-504, 2004.

ANEXOS

ANEXO I: Rotina para processamento dos dados oriundos do USLT2000/TOFD

% UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

% Dissertação de Mestrado

% Aluno : Roney Fonseca.

% Autores: ANDERSON PAULO DE PAIVA; PEDRO PAULO BALESTRASSI; RAFAEL
CONRADI % LEME

% Programa para interpretação de Sinais de Ultrassom.

% Variavel de Entrada

x=[0;5;256;11;0;1;266;256;0;2;327682;16;512;512;1000;67044351;67044351;67044351;670
44351;67044351;67044351;67044351;67044351;67044351;67044351;67044351;67044351;6
7044351;67044351;67044351;67044351;67044351;39388159;67044257;
67044351;36242019;64422552;55313395;4456696;60162670;30016403;25297142;60949398
;37618301;34275877;28967540;34931231;34734504;36569503;19923513;16187708;297537
11;11010423;10748008;16515366;10485903;7733422;13828214;9306273;5177412;1127240
4;5701739;9830487;8716417;3211358;6357107;9371800;10092616;5570700;1835087;77333
60;2097198;4325455;6488110;2687072;5832737;11534503;8257685;4784246;7405682;1002
7150;2490497;7274548;9568403;2293855;9961551;9371802;6094968;7536719;8913022;635
7132;2293793;4653114;2162748;2293790;4587564;5177427;1507372;5046328;4128845;229
3805;2031641;1441814;1441814;1703958;1900567;2031639;2490409;1835031;4522030;412
8839;2228279;3932193;5308486;4915283;1966130;4587569;5177421;3145790;3604513;471
8659;2424892;3932205;4915273;2031670;3538982;3866692;2818102;1900574;2490407;249
0409;1441823;1966104;2031648;1441816;2293790;1769504;2097177;2621481;2097190;203
1640;2818083;1703967;2555932;2031652;1966107;2621479;2162724;2424858;2883626;176
9514;2162712;2293798;1638431;2097183;2097188;1507352;1835034;1900574;1441818;163
8427;1835038;1572888;1507351;1703959;1572889;1376280;1835030;1638424;1572886;157

```

2887;1507352;1572890;1507353;1441815;1572888;1572887;1703960;1638428;1507350;196
6107;1900574;1507351;2031646;1966109;1441818;1966105;1703966;1441817;1572892;196
6106;1441817;1638423;1769497;1441816;1572890;1507354;1441819;1507352;1441814;157
2887;1572884;1638422;1835030;1507351;1638423;1441814;1507352;1638421;1441815;144
1814;1507350;1638426;1966106;1572888;1638424;1769500;1638425;1572888;1835036;150
7356;1703958;1835036;1638426;1507351;1572889;1638424;1507350;1703960;1507353;150
7353;1703964;1638426;1441816;1638421;1507350;1441813;
1507350;1507350;1507349;1572886;1507350;1507351;1572887;1441817;1507350;1441816;
1376278;1507350;1572888;1507351;1572887;1376278;1572886;1638421;1441814;1507351;
1441815;1441816;1507352;1441814;1769494;1441814;1572886;1376280;1507350;1441817;
1441818;1441814;1441815;1441816;2;58;257;0;16;512;141;208;508;0;30236570;107621337
3;1757844215;1076599522;0;0;117;10;217;75;2139924506;1076267647;117;0;0;107778329
6;0;0;0;1077783296;0;0;0;2147483648;0;1075707904;1268099566;1072304448;0;0;0;0;0;0;
0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;217;217;2;58;257;1;16;512;270;293;664;0;1962628256;1076729404;11
20127471;1076956754;0;0;55;8;337;31;901599535;1076939424;0;0;901599535;1076939424
;0;0;0;0;0;0;0;0;0;1074266112;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;
0;5330;0;0;0;5330;0;3;28;256;512;512;0;1000;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;928641578;1077382759;0;0;0;10
79083008;0;0;0;0;-1276882170;1075893102;0;0];

```

```

% Sinal Original

```

```

figure (1)

```

```

plot (x)

```

```

title ('Sinal Original Completo')

```

```

xlabel('Tempo (ms)')

```

```

ylabel('Amplitude (dB)')

```

```

% Sinal em 256 ms

```

```

figure(2)

```

```

plot (x(30:256))

```

```

title ('Sinal em 256 ms')

```

```

xlabel('Tempo (ms)')

```

```

ylabel('Amplitude (dB)')

```

```

% FFT do Sinal:

```

```

X = fft(x);

```

```

% Grafico:

```

```

figure(3)

```

```

plot (abs(X(1:256)))

```

```

title ('FFT - Dominio da Frequência')
xlabel('Frequência (Hz)')
ylabel('Amplitude (dB)')
    
```

ANEXO II: Teste de Hipótese de Mediana de Mood.

Mood Median Test: SINAIS versus FreqXAngulo

Mood median test for SINAIS

Chi-Square = 25,66 DF = 5 P = 0,000

Individual 95,0% CIs

C8	N<=	N>	Median	Q3-Q1	
10MHz45	272	256	1310764	11206974	(-----*-----)
10MHz60	262	270	1572939	18284677	(-----*-----)
10MHz75	275	253	1048681	9961570	(-----*-----)
5MHZ45	304	225	786500	6029229	(-----*--)
5MHZ60	241	280	1835336	9175357	(-----*-----)
5MHZ75	225	295	1835178	7602265	(--*-----)
-----+-----+-----+-----					
800000 1600000 2400000					

Overall median = 1311079

=====

=====

Mood median test for DENSIDADE ESPECTRAL

Chi-Square = 205,47 DF = 1 P = 0,000

C14	N<=	N>	Median	Q3-Q1
DensiEspec_10MHz45	50	215	1,46108E+14	406313427630876
DensiEspec_5MHz45	215	50	1,46419E+13	18084211748608

Individual 95,0% CIs

C14 -----+-----+-----+-----
DensiEspec_10MHz45 (---*---)
DensiEspec_5MHz45 *
-----+-----+-----+-----
5,00E+13 1,00E+14 1,50E+14

Overall median = 71443422499078