

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

APLICAÇÃO DA PROPAGAÇÃO DE ONDAS GUIADAS E ALGORITMOS DE TOMOGRAFIA
POR DIFRAÇÃO PARA A DETECÇÃO DE DEFEITOS EM PLACAS METÁLICAS

por

Douglas Laufer Schmidt

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, Novembro 2016



Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia Mecânica

APLICAÇÃO DA PROPAGAÇÃO DE ONDAS GUIADAS E ALGORITMOS DE TOMOGRAFIA
POR DIFRAÇÃO PARA A DETECÇÃO DE DEFEITOS EM PLACAS METÁLICAS

por

Douglas Laufer Schmidt

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Alcy Rodolfo dos Santos Carrara
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Mecânica dos Sólidos**

Orientador: Prof. Juan Pablo Raggio Quintas

Coorientador: Eng. Lucas L. Dorneles

Comissão de Avaliação:

Prof. Herbert Martins Gomes

Prof. Jakson Manfredini Vassoler

Prof. Rogério José Marczak

Porto Alegre, Novembro de 2016.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Juan Pablo Raggio Quintas, amigo e orientador, pelos conselhos dados nesse trabalho.

Ao Engenheiro Lucas Dorneles, coorientador, pela ajuda prestada e por ter compartilhado seu conhecimento em toda a realização desse trabalho.

Ao Professor Ignacio Iturrioz. Companheiro de Caminhada ao longo do Curso de Engenharia Mecânica. Eu posso dizer que a minha formação, inclusive pessoal, não teria sido a mesma sem a sua pessoa.

À minha família, por sua capacidade de acreditar em mim e investir em mim. Mãe, obrigado pelos puxões de orelha que foram sempre apropriados, mesmo que eu não quisesse recebe-los. Pai, obrigado por todos os conselhos dados, principalmente sobre manter a calma em momentos de dificuldade.

Aos meus irmãos, que por mais difícil que fossem as circunstâncias, sempre tiveram paciência e confiança, e que nunca negaram ajuda quando eu precisei.

Aos amigos, companheiros de trabalhos e irmãos na amizade que fizeram parte da minha formação e que vão continuar presentes em minha vida.

SCHMIDT, D. L. **Aplicação da Propagação de Ondas Guiadas e Algoritmos de Tomografia por Difração para a Detecção de Defeitos em Placas Metálicas**. 2016. 21 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

RESUMO

A propagação de ondas guiadas em estruturas laminares tem permitido desenvolver várias técnicas muito efetivas para detecção de danos. A aplicação dos conceitos associados, com a propagação deste tipo de onda, tem implicado em vantagens relacionadas com a possibilidade de introduzir a fonte de forma remota (métodos de detecção mais rápidos e baratos, possibilidade de aplicar o método em estruturas inacessíveis, entre outros). Neste contexto, no presente trabalho, será aplicada a detecção de dano combinando ondas guiadas e técnicas de tomografia para a reconstrução da imagem da estrutura monitorada. No trabalho proposto será verificada a robustez da metodologia proposta estudando uma diferente configuração de defeitos. A simulação numérica da propagação das ondas foi feita empregando o método dos elementos finitos e os resultados obtidos foram validados experimentalmente. A metodologia se mostrou consistente e robusta e o método empregado tem potencial para ser aplicado em vários ramos da engenharia

PALAVRAS-CHAVE: Ondas guiadas, tomografia, elementos finitos, ensaios não destrutivos.

SCHMIDT, D. L. **Application of Guided Wave Propagation and Diffraction tomography algorithms for Defect Detection in Metal Plates**. 2016. 21 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

ABSTRACT

The propagation of guided waves in laminar structures has allowed to develop several highly effective techniques for damage detection. The application of the associated concepts to propagation of this wave kind has implicated in advantages related to the possibility of introducing the source remotely (faster and cheaper detection methods, possibility of applying the method in inaccessible structures, etc.). In this context, the work will be applied to detect damage by combining guided waves and tomography techniques to reconstruct the image of the monitored structure. In the proposed work, the robustness of the proposed methodology will be verified by studying a different defect configuration. The numerical simulation of wave propagation was done using the finite element method and the results were experimentally validated. The methodology proved to be consistent and robust and the method employed has the potential to be applied in several engineering branches.

KEYWORDS: Guided waves, tomography, finite elements, non-destructive testing.

ÍNDICE

	Pág.
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	2
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	2
3.1 Ondas Mecânicas.....	2
3.2 Ondas de Lamb.....	3
3.3 Transformada Discreta de Fourier.....	3
3.4 Equação de Ondas Transversais em Chapas ou em Membranas.....	4
3.5 Equação de Onda Unidimensional: Solução de D'Alembert.....	4
3.6 Tomografia.....	5
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
5. METODOLOGIA.....	6
5.1 Função de Excitação Toneburst.....	6
5.2 Curvas de Dispersão.....	7
5.3 Função Fan Beam e Processamento dos Dados.....	7
5.4 Método dos Elementos Finitos.....	8
5.5 Descrição do Modelo para o Método dos Elementos Finitos.....	8
5.6 Geração e Obtenção dos Dados na Análise Experimental.....	9
5.7 Descrição do Modelo para Análise Experimental.....	11
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	11
6.1 Resultados.....	11
6.2 Discussão.....	12
7. CONCLUSÃO	13
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	14

1. INTRODUÇÃO

Os ensaios não destrutivos (END) são avaliações feitas em objetos, principalmente peças manufaturadas, semiacabados ou acabados para verificar a existência, ou não, de descontinuidade ou defeitos. Estes ensaios são feitos através de princípios físicos definidos, sem alterar as características físicas, químicas, mecânicas ou dimensionais dos objetos em avaliação e sem interferir na utilização destes objetos após as análises. O END é uma das principais ferramentas para a realização do controle de qualidade de materiais e produtos, ajudando a reduzir os custos e elevar a confiabilidade da inspeção. São amplamente utilizados na fabricação, construção, montagem, inspeção em serviço e manutenção. Além disso, são largamente aplicados em soldas, fundidos, forjados, laminados, plásticos, concreto, entre outros, nas áreas petróleo/petroquímico, nuclear, aeroespacial, siderúrgico, ferroviário, naval, eletromecânico e automotivo.

Entre as várias técnicas utilizadas nos ENDS está o uso de ondas guiadas, sendo uma técnica aplicável quando a estrutura em estudo for laminar, onde pelo menos uma das dimensões da estrutura é muito menor que as outras, semelhante a discos, chapas e principalmente tubulações. Estudos envolvendo a utilização de ondas guiadas em técnicas para ENDS, técnicas de monitoramento de estruturas e detecção de danos tiveram grandes avanços nos últimos anos. Grande parte desse avanço se deve ao grande crescimento da capacidade computacional adquirida a partir do final dos anos 1980. Que permitiu resolver problemas envolvendo técnicas com elementos finitos que seriam inviáveis por conta do custo e do tempo de computação.

Segundo ROSE, 2014, a técnica de ondas guiadas é mais vantajosa que o ultrassom convencional, porque a onda mecânica é capaz de propagar-se através de toda a extensão transversal da estrutura, podendo percorrer grandes comprimentos e permitindo inspecionar áreas extensas de uma estrutura a partir de um único ponto de emissão. Por outro lado, a técnica convencional de ultrassom abrange apenas uma pequena área, geralmente diretamente abaixo do transdutor.

Essas características permitem que a técnica de ondas guiadas seja utilizada principalmente em objetos de difícil acesso, como por exemplo, tubulações enterradas ou submersas.

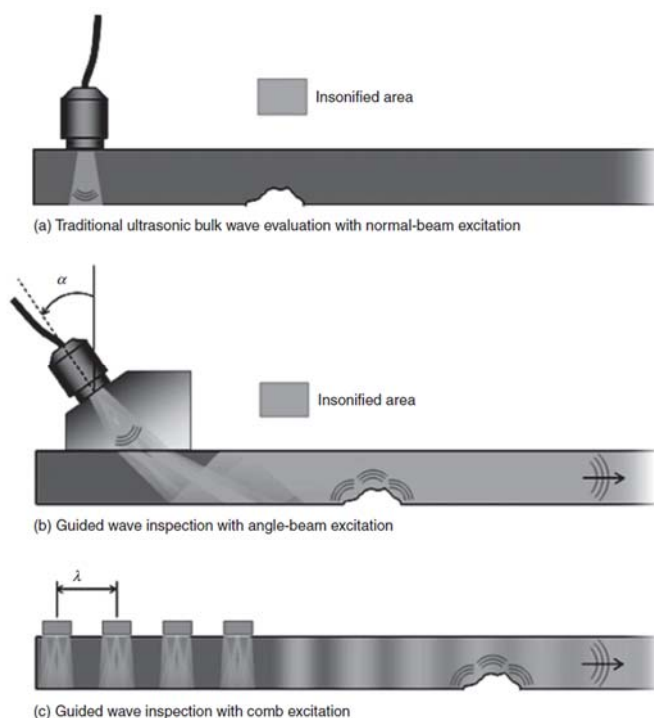


Figura 1.1 - Comparação entre o método por ultrassom (a) e dois métodos por ondas guiadas (b) e (c) (Adaptado de ROSE, 2014).

Contudo, apenas a utilização desta técnica não garante que os defeitos encontrados estejam na localização indicada e nem que tenham as dimensões apropriadamente definidas, pois estes resultados são qualitativos.

A fim de gerar informações, mais próximas dos defeitos, é necessário um algoritmo computacional que utilize os dados coletados com a técnica de ondas guiadas, para obter uma localização e geometria mais apuradas. Normalmente, a saída deste algoritmo é uma imagem, ou um conjunto de imagens, que tornam a análise dos resultados mais fáceis.

Dentre as técnicas utilizadas, a mais conhecida é o método tomográfico. Segundo KODLULOVICH, 2010, a tomografia consiste, basicamente, na imagem que é gerada utilizando o princípio que a estrutura de um objeto pode ser reconstruída a partir de múltiplas projeções.

A ideia da utilização de algoritmos tomográficos como ferramenta para detecção de defeitos estruturais, de forma quantitativa, é semelhante a utilizada em equipamentos de tomografia computadorizada (CT). Estes são os mesmos equipamentos utilizados em hospitais e clínicas para a realização de exames. Contudo, os tomógrafos médicos utilizam como unidade de saída para a geração das imagens a diferença da densidade dos órgãos, membros e tecidos. Por sua vez, para a detecção de defeitos em meios metálicos com geometrias laminares, a unidade de saída das imagens é a diferença na espessura do meio por onde as ondas guiadas se propagam.

Neste contexto, é possível definir o objeto de estudo, que consiste em aplicar ondas guiadas avaliadas com o método tomográfico para determinar posição e magnitude do dano sobre uma chapa metálica. Este trabalho se insere em uma das linhas de pesquisa desenvolvida no Laboratório de Metalurgia Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (LAMEF/UFRGS). Este tema é parte do mestrado do Eng. Lucas Dorneles. O TCC aqui apresentado se encontra vinculado ao referido Mestrado em desenvolvimento. Um Trabalho preliminar desenvolvido pelo grupo de pesquisa mencionado é Dorneles e Clarke (2016), onde foi aplicada o método de tomográfico por ondas guiadas para a obtenção da localização e da dimensão de um único defeito circular em uma chapa metálica.

2. OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho consiste em explorar a aplicação das ondas guiadas na detecção de defeitos em estruturas.

Como objetivos específicos pode-se citar:

- Compreender os conceitos teóricos que fundamentam a aplicação aqui apresentada (ondas guiadas, método tomográfico).
- Verificar a metodologia apresentada em Dorneles e Clarke (2016) utilizando uma disposição diferente de defeitos.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 – Ondas Mecânicas

As ondas mecânicas, juntamente com as ondas eletromagnéticas, compõem o grupo de ondas as quais transmitem energia e não transmitem matéria. As ondas mecânicas são perturbações que se propagam em um meio material, seja ele sólido, líquido ou gasoso, e são regidas pelas Leis de Newton. Esses distúrbios são transmitidos devido à transferência de energia, cinética e potencial, através da interação entre os átomos do meio o qual está sendo excitado.

Para a mecânica dos sólidos, e dos fluidos também, o meio é visto como um contínuo, possuindo suas propriedades descritas como funções contínuas.

3.2 – Ondas de Lamb

As ondas de Lamb são ondas que se propagam em superfícies laminares.

Uma das principais características das ondas de Lamb é que a sua velocidade de propagação (velocidade de fase) não é apenas propriedade do material, ela também depende da frequência da onda, e das características geométricas da espessura na qual propaga. Este fato é fundamental para o estudo e compreensão do comportamento de ondas em placas.

Segundo Viktorov (1967), a relação entre velocidade de fase e a frequência da onda é inerente as equações características. Essas equações, no caso da placa, são de complexa solução. Existem soluções analíticas sobre a propagação de ondas em estruturas laminares somente para geometrias simples, como pode ser caso da placa isotrópica proposta por Lamb, na maioria dos casos a estratégia mais utilizada para determinar a propagação de ondas em meios laminares é empregar métodos numéricos.

As equações características de Lamb indicam a existência de duas famílias de modos de ondas senoidais, as quais podemos classificar de ondas transversais e longitudinais, como pode ser visto na Figura 3.1, além de poder separar e outras duas famílias, as de modo simétrico e as de modo assimétrico, como pode ser visto na Figura 3.2. Estas famílias de ondas têm como parâmetros o ângulo de incidência da onda, sua frequência, espessura do corpo, comprimento de onda e as propriedades do material.



Figura 3.1 – Ondas longitudinais (a) e transversais (b).

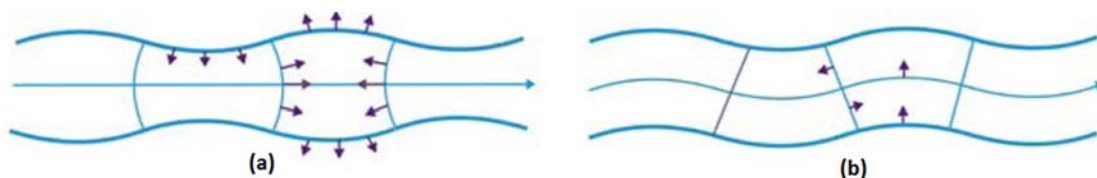


Figura 3.2 – Ondas simétricas (a) e assimétricas (b).

Com o advento do poder computacional, a utilização e a compreensão das ondas de Lamb tem avançado de maneira significativa, principalmente em aplicações relacionadas a END.

3.3 – Transformada Discreta de Fourier

Na matemática, a Transformada de Fourier Discreta (DFT) converte uma sequência finita de amostras igualmente espaçadas de uma função para uma sequência de comprimento equivalente de amostras igualmente espaçadas da Transformada de Fourier de Tempo Discreto (DTFT), que é uma função da frequência com valor complexo. O intervalo no qual a DTFT é amostrado é o recíproco da duração da sequência de entrada. Uma DFT inversa é uma série de Fourier, utilizando as amostras da DTFT como coeficientes de senóides complexas em frequências correspondentes à DTFT. Ele tem os mesmos valores de amostra como a sequência de entrada original. A DFT é, portanto, considerada uma representação do domínio de frequência da sequência de entrada original. Se a sequência original abrange todos os valores não-zero de uma função, a sua DTFT é contínua (e periódica), e a DFT fornece amostras discretas de um

ciclo. Se a sequência original é um ciclo de uma função periódica, a DFT fornece todos os valores não-zero de um ciclo DTFT.

A DFT é transformada discreta mais importante, usada para realizar a análise de Fourier em muitas aplicações práticas. No processamento digital de sinais, a função é qualquer quantidade ou sinal que varia ao longo do tempo, tal como a pressão de uma onda sonora, um sinal de rádio, ou leituras diárias de temperatura, recolhida durante um intervalo de tempo finito (geralmente definido por uma função de janela). No processamento de imagem, as amostras podem ser os valores de pixels ao longo de uma linha ou coluna de uma imagem gerada por pixels.

Uma vez que se trata de uma quantidade finita de dados, que podem ser implementados em computadores por meio de algoritmos numéricos ou mesmo hardware dedicado. Essas implementações geralmente empregam eficientes algoritmos de Transformação Rápida de Fourier (FFT); tanto que os termos "FFT" e "DFT" são muitas vezes utilizados alternadamente. (Osgood, 2007).

3.4 – Equação de Ondas Transversais em Chapas ou em Membranas

Um dos conceitos básicos no estudo de ondas é o de ondas transversais em objetos unidimensionais. Essa situação considera apenas uma direção para o movimento, referente ao comprimento da corda, representado normalmente por x . Isto pode ser exemplificado como o movimento realizado em uma corda de violão.

Todavia, quando se analisa os efeitos de ondas transversais em placas, há a necessidade de incorporar uma segunda variável espacial, referente a largura, representada por y .

Além disso, devido à natureza transiente que o estudo das ondas carrega consigo, tem-se a variável responsável pela variação do tempo no equacionamento, referenciada por t .

Couto (2010) apresenta a solução para esse tipo de equação como a Equação 3.1.

$$u(x, y, t) = \frac{1}{(2\pi)c} \iint_D \frac{\Phi(x + \xi, y + \eta)}{\sqrt{c^2 t^2 - \xi^2 - \eta^2}} d\xi d\eta \quad (3.1)$$

Onde:

- u é uma função escalar, cujos valores poderiam modelar o deslocamento de uma onda;
- c é a velocidade de fase;
- D a superfície do disco com centro em (x, y) e raio de $c \cdot t$;
- ξ, η formam o binário da posição do centro da esfera de ondas em relação a x e y , respectivamente; e
- Φ é uma função arbitrária de dois variáveis independentes, determinada pela condição inicial.

Essa solução é obtida através da fórmula de Kirchhoff e da simplificação do caso tridimensional.

3.5 – Equação de Onda Unidimensional: Solução de D'Alembert

A solução encontrada por D'Alembert realiza mudanças de variáveis, a qual chega na Equação 3.2.

$$y(x, t) = f(x - c_0 t) + g(x + c_0 t) \quad (3.2)$$

Na qual, f e g são funções arbitrárias, as quais são determinadas pelas condições iniciais, geralmente funções de força já especificadas, que atuam como perturbações.

Essas perturbações devem se propagar pelo meio, além de se manterem constante durante o seu trajeto, de modo a não haver distorção.

No caso particular, onde a excitação é uma função harmônica, o comportamento é descrito pela Equação 3.3.

$$u(x, t) = B \cos(kx - \omega t) = B \cos k(x - c_0 t) \quad (3.3)$$

Onde:

- ω é a frequência angular;
- k é o número de onda; e
- c_0 é a velocidade de propagação da onda no material.

A seguir, estão outras relações importantes para esse tipo de solução.

$$\omega = 2\pi f \quad (3.4)$$

$$f = \frac{1}{T} \quad (3.5)$$

$$c_0 = \frac{\omega}{k} \quad (3.6)$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (3.7)$$

Onde:

- T é o período;
- λ é o comprimento de onda;
- f é a frequência; e
- B está relacionado à amplitude da onda.

3.6 – Tomografia

Segundo Kak e Slaney (1988), tomografia refere-se à criação de imagens de secção transversal de um objeto a partir de quaisquer dados de transmissão ou reflexão recolhidos pela iluminação do objeto de diversas direções diferentes. Essa técnica teve um grande impacto para a medicina, pois permitiu que os órgãos pusessem ser vistos com uma precisão sem precedentes.

Fundamentalmente, algoritmos tomográficos lidam com a reconstrução da imagem a partir de suas projeções. No sentido estrito da palavra, uma projeção em um determinado ângulo é a integral da imagem no sentido indicado por esse ângulo, como ilustrado na Figura 3.3.

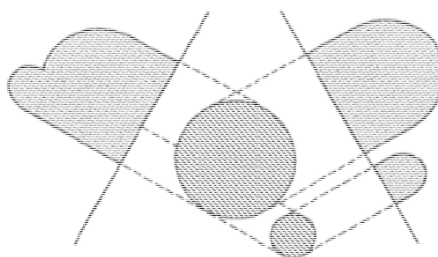


Figura 3.3 – As duas projeções de um par de cilindros. (Adaptado de Kak e Slaney (1988))

Dentre os tipos de algoritmos tomográficos, podemos classificá-los em dois grandes grupos. A tomografia sem difração e a tomografia com difração.

A tomografia sem difração, como seu próprio nome diz, não considera os efeitos relativos a difração das ondas no corpo a ser examinado. Esse tipo de tomografia considera apenas a medição dos dados de projeção com energia que viaja em linha reta através dos objetos, a qual pode ser considerada uma boa aproximação dependendo da técnica utilizada.

Já a tomografia com difração leva em conta os efeitos que a difração tem pelo objeto a ser avaliado. A difração ajuda a obter mais precisão na imagem resultante pela sua característica do espalhamento das ondas, que acontecem quando ocorre, por exemplo, uma mudança de meio ou na espessura, tipos de câmbios geralmente associados a presença de um defeito.

Todavia, a tomografia com difração considera os efeitos da difração sobre o defeito juntamente com os dados de transmissão.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta revisão são comentadas três referências sobre as quais o trabalho foi desenvolvido:

A primeira é o artigo apresentado por Dorneles e Clarke, 2016, o qual serve como base para este trabalho. Visto que aqui está sendo feita uma validação dos resultados apresentados no supracitado artigo.

Nesse artigo foi realizado um estudo, tanto numérico quanto experimental, feito com ondas guiadas numa estrutura de chapa de alumínio. Essas ondas, com formato de *Toneburst*, (ver um exemplo do tipo de ondas citado na Figura 5.2) foram emitidas e lidas em diversos pontos, situados numa trajetória circular que compreendiam os defeitos a ser avaliados. Com a varredura realizada nessa estrutura circular foi possível, através do auxílio computacional, realizar a reconstituição do objeto por meio de algoritmos de tomografia de difração, resultando em imagens as quais passaram por uma filtragem, de modo a refinar os resultados.

O principal ponto levantado no artigo é a utilização da tomografia por difração como alternativa para avaliação de defeitos em estruturas. Visto que outros meios de avaliação podem ter custos mais elevados ou, simplesmente, não podem ser aplicados em algumas situações, como em dutos subterrâneos.

Segundo os autores, os resultados apresentados foram satisfatórios, demonstrando que a tomografia de difração poderia ser utilizada na avaliação de defeitos em estruturas de interesse para a Engenharia.

Outra referência de interesse é o artigo apresentado por Simonetti e Huang (2008).

Neste artigo se demonstra a existência de um mapeamento linear entre duas técnicas de reconstrução de imagens a conhecida como *Beamforming* e a tomografia por difração.

Outro artigo de interesse é o apresentado por Hopp et. al. (2009).

Nesse artigo apresenta o desenvolvimento de uma interface gráfica interativa utilizando o software *Matlab* para a reconstrução de imagens tomográficas tridimensionais.

5. METODOLOGIA

Segue em forma sumária as principais ferramentas utilizadas na realização do presente trabalho.

5.1 – Função de Excitação *Toneburst*

A função de *toneburst* é uma função modulada por uma envoltória que pode ser uma função de Gauss ou uma função harmônica. Por apresentar uma banda de frequências conhecida, o que facilita a excitação de modos específicos, esse tipo de sinal é utilizado intensamente no âmbito dos ensaios não destrutivos ENDs.

Neste trabalho foi utilizada uma função de excitação deste tipo com frequência de 50 kHz com 5 ciclos, como visto na Figura 5.1.

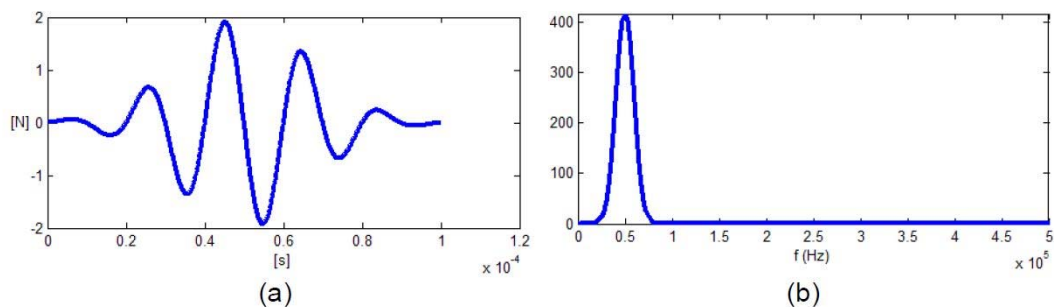


Figura 5.1 – Exemplo de *Toneburst* de 50kHz – 5 ciclos. (a) Domínio tempo. (b) Domínio frequência. (Adaptado de MENIN, P. D., 2015)

5.2 – Curvas de Dispersão

Estas curvas permitem determinar as possibilidades de propagação que uma determinada onda tem numa estrutura do tipo laminar. Elas podem ser apresentadas no domínio frequência pelo número de onda ou velocidade de fase pela frequência. Na Figura 5.1 se apresenta um exemplo deste tipo de curva para placas. Cada curva está associada a um modo de propagação (uniaxial, flexão, entre outros). No caso de aplicar uma onda A0 (modo axial), numa placa de espessura d determinada, podemos observar na curva de dispersão da Figura 5.1 que para f por d , entre 0 a 4MHzmm, a velocidade de propagação da referida onda vai variar em função da frequência de propagação e da espessura da chapa.

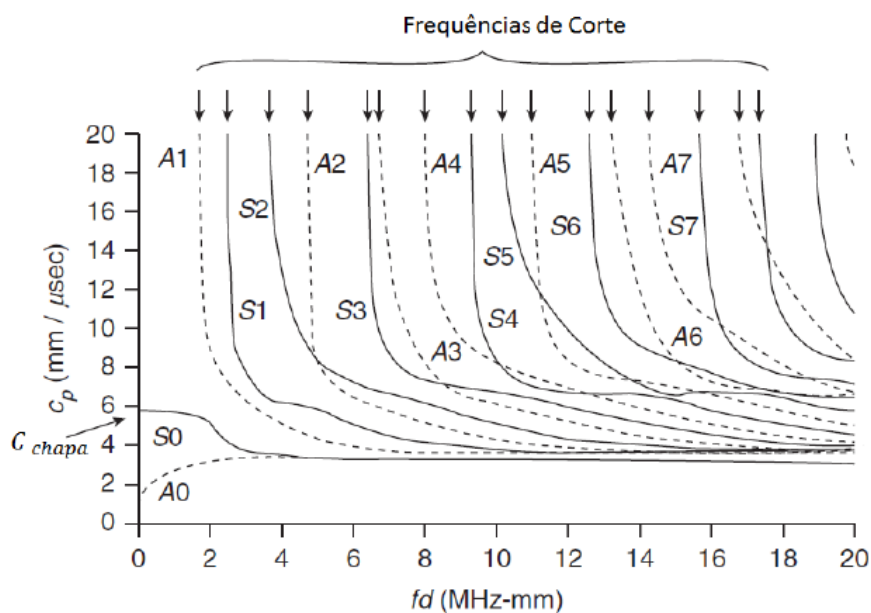


Figura 5.2 – Gráficos das curvas de dispersão das ondas de Lamb. (Adaptado de ROSE, 2014)

5.3 – Função *Fan Beam* e Processamento dos Dados

A Função *Fan Beam* calcula projeções de uma matriz de imagem ao longo de direções especificadas. Uma projeção de uma função bidimensional $f(x, y)$ é um conjunto de integrais de linha. A função *Fan Beam* calcula as integrais de linha ao longo de caminhos que irradiam a partir de uma única fonte, formando um setor circular. Para representar uma imagem, a função *fan beam* leva várias projeções da imagem de ângulos diferentes girando a fonte em torno do centro da imagem.

Para o processamento dos dados, foram usados dois métodos: o *Beamforming* e o *Total Focusing Method* (TFM) através do *Full Matrix Capture* (FMC).

O *Beamforming*, segundo Simonetti e Huang (2008), é uma técnica de processamento de sinal usado com matrizes de transmissores ou receptores que controlam a direção de um padrão de onda. Ao receber um sinal, a *beamforming* de recepção pode aumentar a sensibilidade do receptor na direção dos sinais desejados e diminuir a sensibilidade nas demais direções que são fontes de interferência e ruído. Ao transmitir um sinal, a *beamforming* de transmissão pode aumentar a potência ao longo da direção escolhida. Portanto, usando esse método podemos melhorar o sinal em uma determinada direção e suprimir os ruídos e reflexões provenientes de outras direções.

Para entender o TFM, é necessário entender o *Full Matrix Capture* (FMC). Esse método consiste em capturar e gravar todos os possíveis sinais do domínio do tempo de cada par transmissor-receptor de elementos na matriz.

Por sua vez, o *Total Focusing Method* (TFM) é um algoritmo de processamento de sinal que usa dados adquiridos no modo FMC. Uma zona é especificada para a reconstrução de dados. Essa zona é discretizada por meio de uma malha e, para cada nó dessa malha, as leis focais são calculadas para todo o conjunto de elementos da matriz de fase.

Ambos os métodos estão exemplificados na Figura 5.3.

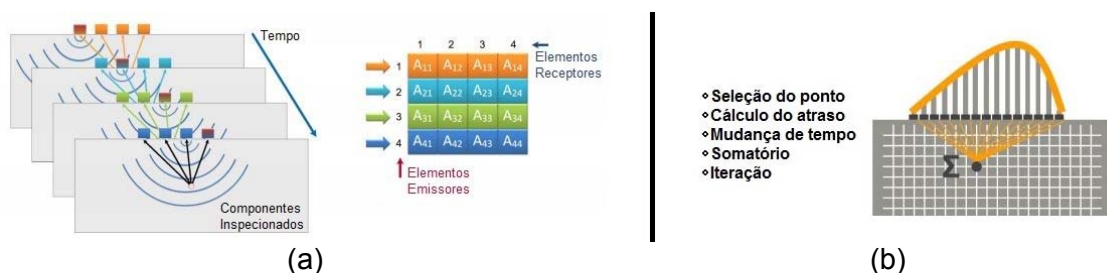


Figura 5.3 – Esquematização do funcionamento (a) do FMC e (b) TFM.

5.4 – Método dos Elementos Finitos

O método dos elementos finitos (MEF) consiste na discretização de uma estrutura, dividindo-a em uma série de elementos, os quais são reconectados por nós, de modo que a solução para o problema descrito seja processada através de uma série de equações algébricas simultâneas.

Conceitualmente, diversos fenômenos físicos aplicados à engenharia, como problemas elásticos, plásticos, térmicos, eletroestáticos, entre outros, podem ser expressos através de equações diferenciais parciais com condições de contorno definidas.

De maneira geral, é difícil de aplicar as equações diferenciais para um domínio inteiro, desse modo, divide-se o domínio em uma quantidade de subdomínios menores. Assim, a grandeza do campo em questão é interpolada por um polinômio sobre cada subdomínio, de modo que os elementos adjacentes compartilhem dos mesmos graus de liberdade pelos nós que os ligam. Dessa forma, é obtido um sistema de equações algébrico de N graus de liberdade sendo N um número relacionado com o nível de discretização utilizado na divisão de subdomínios.

Dentre as vantagens da utilização do MEF temos a capacidade de lidar com geometrias complexas, a gama de fenômenos físicos que são abrangidos, e o fato de poder impor restrições e carregamentos complexos.

5.5 – Descrição do Modelo para o Método dos Elementos Finitos

Para a execução do devido trabalho, foi analisada numericamente, no software *Abaqus*, uma estrutura em forma de chapa, com dimensões de 800 mm por 800 mm, com espessura de 10 mm com dois defeitos. O primeiro deles foi colocado centrado e com diâmetro de 64,0 mm

com profundidade máxima de 5 mm, semelhante ao apresentado por Dorneles e Clarke (2016). O segundo foi colocado afastado do centro da chapa por uma distância de 152,2 mm, seu diâmetro foi de 108,2 mm e com profundidade máxima de 3 mm, conforme a Figura 5.4(b).

O material escolhido foi o alumínio ($E = 70,8 \text{ GPa}$, $\nu = 0,35$, $\rho = 2700 \text{ kg/m}^3$). O modelo apresenta uma condição de fronteira de absorção similar a proposta por Drozd et al. (2006) e Drozd et al. (2007). Essa condição proposta funciona em camadas, de forma que cada camada absorve um modo de onda diferente, evitando a reflexão das ondas nos limites da chapa. No modelo foram simulados a localização de um arranjo circular de 64 emissores/receptores com diâmetro de 800 mm (Figura 5.4(a)). A partir destes sensores virtuais são emitidas ondas e registrados o retorno da mesma ao refletir sobre a geometria do defeito.

Os elementos da malha são cúbicos com 1 mm de aresta, segundo a Figura 5.4(c). Para essa análise foi utilizado o elemento hexaédrico *C3D8R*, o qual possui um ponto de integração de Gauss e três graus de liberdade translacionais por nó.

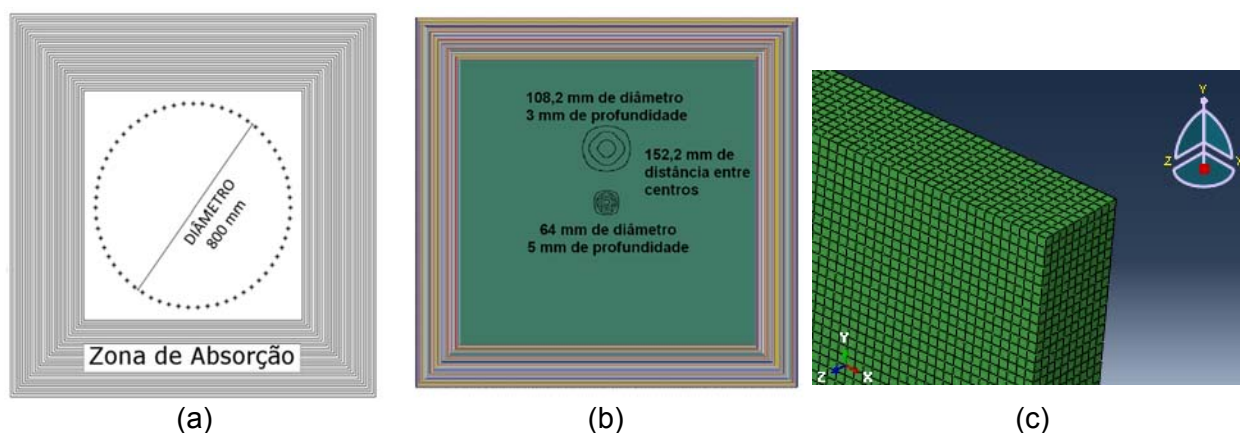


Figura 5.4 – Modelos da Simulação. (a) Disposição dos sensores. (Adaptado de Dorneles e Clarke (2016)) (b) Disposição dos defeitos. (c) Discretização empregada.

Após as simulações, os sinais obtidos foram pós-processados em *Matlab* e exibidos em imagens.

5.6 – Geração e Obtenção dos Dados na Análise Experimental

Para a realização da análise experimental, foram usados os mesmos equipamentos e processos indicados em Dorneles e Clarke (2016).

Ainda de acordo com esta referência, “O sinal *toneburst* de 50 kHz é definido em um programa e gerado por uma placa NI PXIe- 5451 da National Instruments, então o sinal passa por um amplificador de potência Krohn-Hite 7500, logo após o sinal é medido pelo interferômetro e adquirido por uma placa da National Instruments, modelo NI PXI- 5105. Ambas as placas da National Instruments estão montadas em um computador modular NI PXIe-1062Q. Os algoritmos de reconstrução de imagem foram todos implementados em *Matlab*, e foram aplicados no pós-processamento dos sinais”. O esquemático do experimento pode ser visto na Figura 5.5. Já o equipamento montado no LAMEF/UFGRS pode ser visto na Figura 5.6.

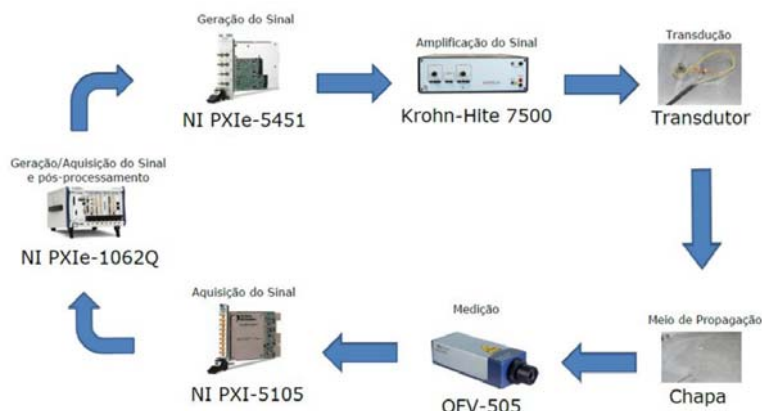


Figura 5.5 – Esquemático do experimento. (Retirado de Dorneles e Clarke (2016)).



Figura 5.6 – Procedimento da Análise Experimental no LAMEF-UFRGS.

Os dados obtidos são registrados como curvas de amplitude no domínio tempo, como mostra a Figura 5.7. Esses dados são feitos para cada combinação de emissor/receptor, chegando no final do experimento a montar uma matriz com três dimensões, organizada pela identificação do emissor, pela identificação do receptor e pelo sinal adquirido no tempo (a janela de cada aquisição é de 1ms), como exemplificado na Figura 5.7.

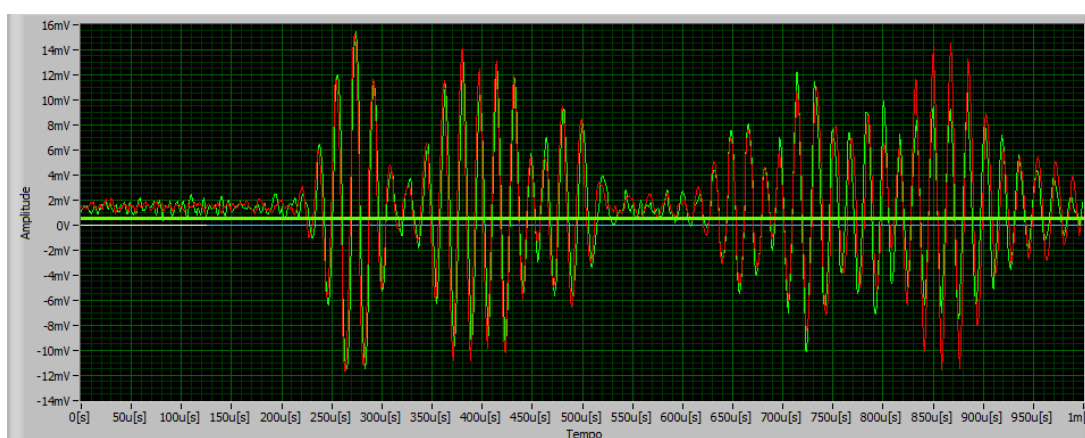


Figura 5.7 – Exemplo de dado obtido na análise experimental, mostrando a leitura de cada interferômetro.

O interferômetro calcula a velocidade no ponto medido e a converte para tensão, por sua vez o vibrômetro mede vibração a converte para tensão, em volts. Devido a relação entre frequência vezes a espessura e a velocidade de fase da onda, o interesse está, principalmente, no formato da onda e não em sua magnitude. Por ser uma excitação de frequência constante, a velocidade de fase acaba por ser proporcional a espessura. Sendo assim, o parâmetro para a reconstrução tomográfica utilizado é a variação de velocidade. Quanto as diferenças de espessura, apesar de ter essa relação direta entre espessura e velocidade de fase, o método *beamforming* não gera um mapa de velocidade, por isso se utiliza um coeficiente de calibração, ou seja, utiliza-se a espessura do valor simulado, compara-se com o valor reconstruído e se multiplica pelo fator de calibração para reconstruir com a espessura certa, então se utiliza esse valor na reconstrução experimental. Baseado na metodologia apresentada em Belanger et. al, 2010.

5.7 – Descrição do Modelo para Análise Experimental

Para a realização do modelo experimental foi utilizada uma chapa de alumínio comercial com dimensões de 1250 mm x 1250 mm com espessura de 9,52 mm. Nela foram feitas duas cavidades, a fim de representar os defeitos, com dimensões semelhantes as apresentadas na Figura 5.4b, conforme indicado na Figura 5.8a.

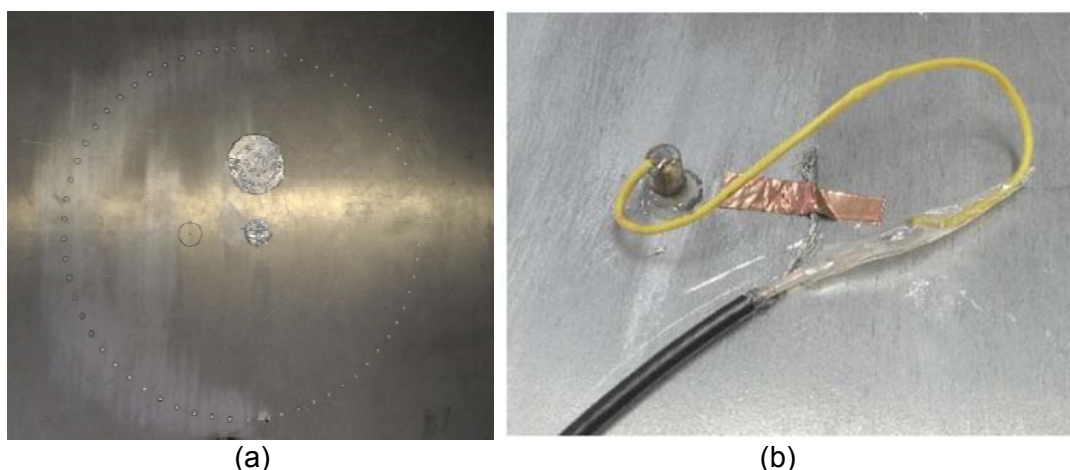


Figura 5.8 – (a) Chapa pronta para a realização do experimento. (b) transdutor posicionado (Retirado de Dorneles e Clarke (2016)).

Para a realização do trabalho foi utilizado apenas um transdutor, o qual era fixado cuidadosamente, de forma que sua face inferior ficasse com o máximo de contato com a superfície da chapa de alumínio e que não houvesse qualquer tipo de deslocamento do transdutor em relação a chapa, durante a realização do ensaio. Após a realização da medição em um ponto, o transdutor era removido da superfície da chapa de forma a não danificar o nenhuma de suas três camadas.

6. RESULTADOS E DISCUÇÕES

6.1 – Resultados

Primeiramente, foi obtido o resultado do modelo numérico. Como visto na Figura 6.1(a).

Nessa imagem podem ser visualizadas várias áreas de interesse, dentre elas temos a circunferência externa (1); a mancha central (2); e a mancha menor (3).

Na circunferência externa (1), na área mais próxima dos sensores temos uma região homogênea, a qual demonstra a total ausência de defeitos.

A seguir, temos a região central, onde aparece o defeito posicionado no centro da imagem (2), o qual tem aproximadamente 60 mm de diâmetro.

Na sequência temos a região do defeito superior (3). Nesse ponto ele aparece com profundidade menor que o defeito central e com diâmetro semelhante. Nessa mesma região há a formação de uma sombra nas proximidades dos sensores.

Nas Figuras 6.2(b) e (c) se apresentam os resultados não filtrado e filtrado, respectivamente, processados a partir dos ensaios realizados.

Segundo Huthwaite, 2012, para diminuição de artefatos na imagem, é recomendado aplicar um filtro passa-baixa do tipo gaussiano com raio de derivação de meio comprimento de onda até um comprimento de onda.

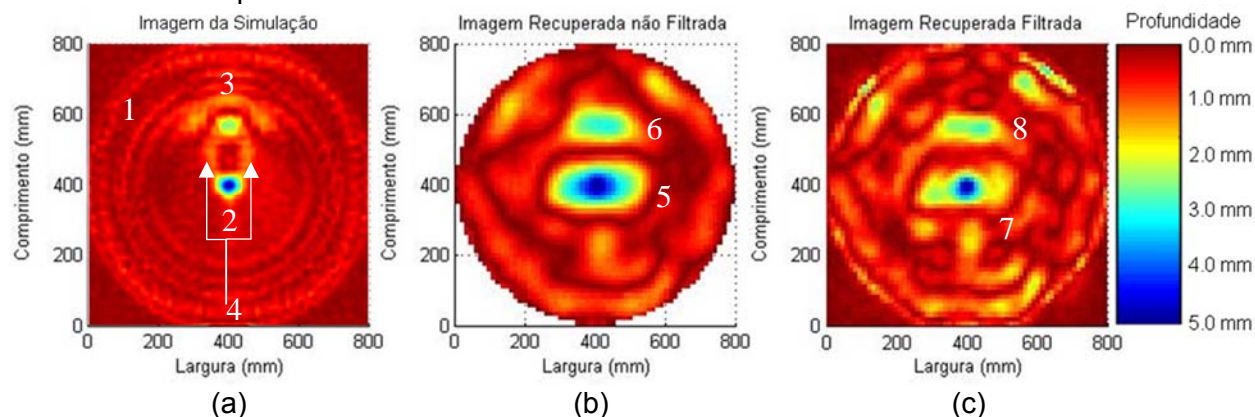


Figura 6.1 – (a) Resultados obtidos da análise numérica via elementos finitos. (b) e (c) Resultados obtidos do ensaio.

Nesse caso temos como áreas de interesse a mancha central (5 e 7) e a mancha menor em posição centralizada, porém na região superior (6 e 8).

Na região central (5 e 7), onde aparece o defeito que do posicionado no centro da imagem, o qual tem formato oblongo variando entre 100 mm e 200 mm de diâmetro.

Na sequência temos a região do defeito superior (6 e 8). Nesse ponto ele aparece com profundidade e diâmetro menores em relação ao defeito central.

6.2 – Discussão

Os dados obtidos por simulação apresentaram, como principal característica, a presença de uma sombra na região superior da imagem, a qual, de acordo com Kak e Slaney (1988) pode ser causado devido à distância entre a periferia do defeito e os sensores.

Aparecem também, no centro da Figura 6.1(a), pequenas linhas curvas que ligam os dois defeitos pelas laterais (4). Esse mesmo padrão aparece no experimento de Dorneles e Clarke (2016) quando o modelo é simulado com dois defeitos.

Para os dados filtrados e não filtrados das imagens obtidas a partir do ensaio realizado apresentadas na Figura 6.1 (b) e (c), pode-se notar uma maior homogeneidade para a imagem não filtrada do que para a filtrada, porém há um aumento das regiões de falha, assim como demonstrada por Dorneles e Clarke (2016).

Outra observação, é a distância entre os defeitos, como mostra a Figura 6.3, apresentando uma precisão razoável em relação ao objeto real.

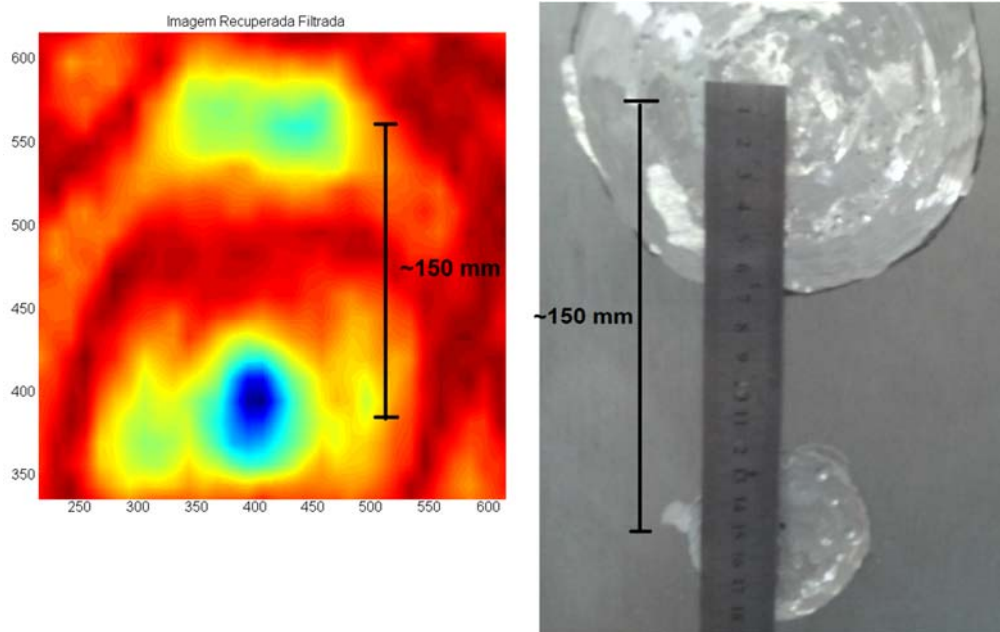


Figura 6.3 – Comparação das distancias entre os centros dos defeitos para o objeto experimental e o objeto real, respectivamente.

Por sua vez, é possível fazer uma avaliação através do corte longitudinal da chapa o qual passa pelos dois defeitos (Figura 6.4).

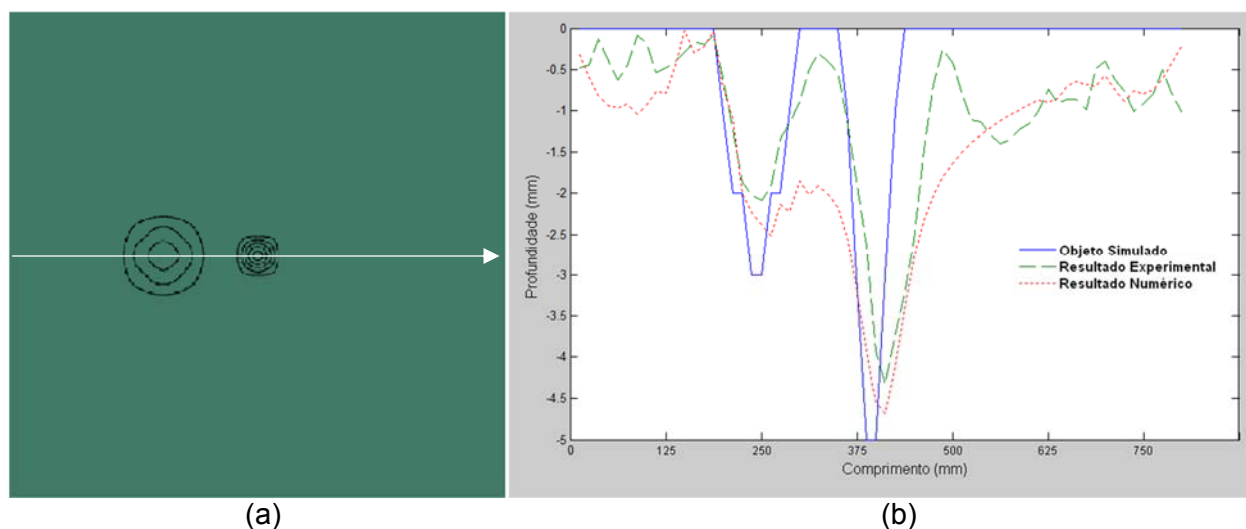


Figura 6.4 – Representação do corte realizado para análise da profundidade dos defeitos. (a) Direção e sentido do corte. (b) Gráfico representativo mostrando o corte para os itens avaliados.

Na Figura 6.4(b), nota-se uma conformidade em relação a profundidade dos elementos em ambas as avaliações comparado com o objeto simulado.

Na mesma figura, pode-se notar também uma translação das curvas das avaliações realizadas perante o objeto avaliado, semelhante ao apresentado por Dorneles e Clarke (2016).

7. CONCLUSÃO

No presente trabalho foi realizado um estudo sobre a aplicação da propagação de ondas guiadas e algoritmos de tomografia por difração para a detecção de defeitos em placas metálica.

Para tanto, foi utilizado um modelo numérico e realizados ensaios para comparar os resultados obtidos.

As conclusões obtidas ao realizar este trabalho foram:

- A comparação entre os resultados experimentais e na simulação permitem constatar que as metodologias empregadas são consistentes, podendo de esta forma verificar os resultados apresentados em Dorneles e Clarke (2016).
- Observando as previsões obtidas com esta tecnologia e o tipo de dano inserido na placa permitiu estudar que associar a utilização de ondas guiadas em estruturas laminares com técnicas de tomografia tem grande potencial de aplicação na determinação de defeitos em estruturas de interesse na Engenharia.

A continuação deste trabalho visa testar a tecnologia aplicada com outras configurações de defeitos, além de validar novos algoritmos e técnicas computacionais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BELANGER, P., CAWLEY, P., SIMONETTI, F., “**Guided Wave Diffraction Tomography Within the Born Approximation**” IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control, vol. 57 no.6, pp. 1405-1418, 2010.

COUTO, R. T., “**Sobre a Dedução da Equação da Onda e da Solução Segundo a Fórmula de Kirchhoff**”, Sociedade Brasileira de Matemática Aplicada e Computacional, 2010.

DORNELES, L. L.; CLARKE, T. G. R.; “**Avaliação de métodos de tomografia por ondas guiadas**”, ConaEnd&lev 2016, São Paulo, 22 à 25 de Agosto de 2016.

DROZDZ, M., MOREAU, L., CASTAINGS, M., LOWE, M., CAWLEY, P.; “**Efficient Numerical Modelling of Absorbing Regions for Boundaries of Guided Waves Problems**”. Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, vol. 25. Brunswick, ME, USA: AIP; 2006. P. 126-133.

DROZDZ, M., SKELTON, E., CRASTER, R., LOWE, M.; “**Modeling bulk and guided waves in unbounded elastic media using absorbing layers in commercial finite element packages**”. Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, vol. 26. Portland, OR, USA: AIP; 2007. P. 87-94.

HOPP, T., SCHWARZENBERG, G. F., ZAPF, M., RUITER, N. V.; “**A MATLAB GUI for the analysis and reconstruction of signal and image data of a SAFT-based 3D Ultrasound Computer Tomograph**” International Journal On Advances in Software, vol 2 no 1, 2009.

HUTHWAITE, P. E., “**Quantitative Imaging With Mechanical Waves**,” 2012. 192 f. Tese (Doctor of Philosophy) – Department of Mechanical Engineering, Imperial College London, Londres, 2012.

KAK, A., SLANEY, M., “**Principles of Computerized Tomography Imaging**”, Piscataway, NJ: IEEE Press, 1988.

KODLULOVICH, S.; “**Principios Básicos de Tomografía Computadorizada**”, Curso de Protección Radiológica en Tomografía Computadorizada, Comissão Nacional de Energia Nuclear, 16 à 18 de Maio de 2010.

MENIN, P. D. “**Análise da propagação de ondas guiadas em estruturas com uma dimensão predominante**.” 2015. 26 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto alegre, 2015.

OSGOOD, B.; "**Lecture Notes for EE261 - The Fourier Transform and its Applications**"
Electrical Engineering Department, Stanford University, 2007.

ROSE, J. L.; "**Ultrasonics Guided Waves in Solid Media**", Cambridge University Press, 2014.

SIMONETTI, F., HUANG, L., "**From beamforming to diffraction tomography**", Journal of Applied Physics, 2008.

VIKTOROV, I. A., "**Rayleigh and Lamb Waves: Physical Theory and Applications**", Plenum Press, New York, 1967.