

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

ONDAS GUIADAS APLICADAS NA DETECÇÃO DE DEFEITOS EM PLACAS

por

Eduardo Bortoncello

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 de 2018

ONDAS GUIADAS APLICADAS NA DETECÇÃO DE DEFEITOS EM PLACAS

por

Eduardo Bortoncello

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. Thamy Cristina Hayashi

Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Mecânica dos Sólidos**

Orientador: Prof. Ignacio Iturrioz

Coorientador: MSc. Eduardo Groth

Comissão de Avaliação:

Prof. Rodrigo Rossi

Prof. Walter Paucar Casas

Dr. Ricardo Baiotto

Porto Alegre, 12 novembro de 2018.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho só foi realizado graças à ajuda do orientador e professor Ignácio Iturrioz e do coorientador Eduardo Groth, que me deram apoio e transmitiram todo o conhecimento necessário.

Agradeço aos amigos e colegas de trabalho da empresa Simeros, pois me apoiaram nos momentos de dificuldade.

Aos grandes engenheiros em que me espelho, Bertoni e Facundo, pois são referências para mim tanto como pessoa quanto como profissionais.

Aos meus amigos, os quais me afastei durante este semestre, mas que nunca me deixaram sozinho.

Nada disso poderia acontecer se não fossem meus pais e minha família. Tudo o que tenho e o que sou é resultado do esforço e dos ensinamentos vindos deles.

BORTONCELLO, E. **Ondas guiadas aplicadas na detecção de defeitos em placas**. 2018. 14. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

RESUMO

A detecção de defeitos subcríticos em estruturas onde pelo menos uma das dimensões é muito maior que as demais, como por exemplo vigas e barras, tem implicações econômicas de suma importância. São muitos os tipos de estruturas que se podem classificar dentro do grupo indicado, tais como cascos de navios, vasos de pressão, tanques, trilhos de trem, tubulações entre outras. Detectar defeitos subcríticos permite planejar sua reparação e ou substituição evitando perdas humanas, ecológicas e econômicas. A geometria particular deste tipo de estrutura faz com que as ondas mecânicas neste domínio se propaguem como ondas guiadas, abrindo diversas possibilidades de detecção de mudanças geométricas. As dimensões finitas da estrutura – denominada de guia de ondas - caracteriza o tipo de ondas que podem propagar. Neste contexto, faz-se o estudo de uma placa em estado plano de deformações realizando-se sobre a mesma simulações de diversas geometrias de defeitos, de modo a verificar como os mesmos modificam a propagação de um pacote de ondas com frequência e distribuição característica utilizada como excitação. As simulações foram feitas no software de elementos finitos *LS-DYNA*. As curvas de dispersão da estrutura estudada são montadas, permitindo entender as mudanças produzidas pelos defeitos estudados.

PALAVRAS-CHAVE: Ondas guiadas; ensaios não destrutivos; método dos elementos finitos; propagação de ondas em estruturas laminares.

BORTONCELLO, E. **Guide waves applied in plate defect detection**. 2018. 14. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

ABSTRACT

Detection of subcritical defects in structures where at least one dimension is much larger than the other two, such as beams and bars, has paramount economic implications. There are many types of structures that can be classified within the aforementioned group, such as ship hulls, pressure vessels, tanks, train rails, pipelines among others, and detecting subcritical defects makes it possible to plan their repair and/or maintenance, avoiding human, ecological and economic losses. The particular geometry of this type of structure makes the mechanical waves in this domain propagate as guided waves, which opens up several possibilities for detecting geometric changes. The finite dimensions of the studied structure called waveguide characterize the type of waves that can propagate. In this context the study of a plate in a plane state of deformations is accomplished, and on the same are realized simulations of diverse geometries of defects studying how they modify the propagation of a package of waves with frequency and characteristic distribution used as excitation. The simulations were performed in *LS-DYNA* finite element software. The dispersion curves of the studied structure are assembled and this allows to understand the changes produced by the defects studied.

KEYWORDS: Guided waves; non-destructive testing; finite element method; propagation of waves in laminar structures.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. OBJETIVOS	2
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	2
2.1 Propagação de ondas em sólidos.....	2
2.2 Propagação de ondas em placas.....	3
2.3 Atenuação de ondas mecânicas.....	4
2.4 Reflexão e transmissão de ondas mecânicas.....	4
2.5 Integração numérica dinâmica explícita	5
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
4. METODOLOGIA.....	6
4.1 Modelo de elementos finitos	6
4.2 Dupla transformada de Fourier, e função de excitação Tone Burst.....	7
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	7
5.1 Verificação do modelo	7
5.3 Interação defeito-onda.....	8
6 CONCLUSÃO.....	13
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	13

LISTA DE FIGURAS

	Pág
Figura 1.1 - Comparação entre o método de avaliação por ultrassom e dois métodos de inspeção por ondas guiadas. (a) Avaliação tradicional por ultrassom. (b) Inspeção por ondas guiadas com excitação inclinada. [Rose,2014].	1
Figura 2.1 - Tipos de onda propagando em um meio sólido, em (a) ondas P e em (b) ondas S [Adaptado de Moore et al., 2005].	3
Figura 2.2 - Representação gráfica da Lei de Snell. [Groth, 2016].	5
Figura 4.1 - Representação da placa estudada, (a) placa estudada, detalhe sobre como é aplicado o carregamento, c) detalhe da malha do modelo de elementos finito implementado.	6
Figura 4.2 - (a) Passos para obter a dupla transformada de Fourier. (b) Função Tone Burst centrada em 50 kHz.	7
Figura 5.1 - Região de nós selecionados para adquirir dados destacados em vermelho, enquanto as setas indicam a direção de carregamento.	8
Figura 5.2 - Resposta obtida pela dupla transformada de Fourier de uma onda com frequência de 70 kHz.	8
Figura 5.3 - (a) Defeito inserido na placa. (b) Parâmetros que definem a geometria do defeito.	9
Figura 5.4 - Comportamento da excitação <i>Tone Burst</i> com frequência central de 60 kHz. Na direção axial e sua interação com o defeito (a= 1 mm, b= 2 mm), a onda modal ativada foi a S ₀ , sendo perpendicular à direção do guia de onda.	9
Figura 5.5 - Sinal refletido pela excitação transversal <i>Tone Burst</i> com frequência central de 60 kHz que excita o modo A ₀ .	10
Figura 5.6 - Sinal de um defeito com 150 mm de largura, mostrando que a onda reflete tanto para uma diminuição da espessura quanto para um aumento de espessura.	10
Figura 5.7 - Comportamento linear proporcional da amplitude do sinal frente ao aumento da profundidade do defeito quando excitado o modo S _{M0} , $(A_r/A_i)= 51.6(a/t)$.	11
Figura 5.8 - Resposta linear do sinal refletido pelo defeito quando excitado com uma onda transversal (modo A ₀).	11
Figura 5.9 - Comparação entre coeficiente de reflexão e comprimento do defeito. (a) Resultado obtido quando se excita a placa com uma onda <i>Tone Burst</i> de 60kHz transversal (modo A ₀), a= 1 mm. (b) Resultado obtido por [Demma, 2004].	12
Figura 5.10 - Coeficiente de reflexão obtido quando a excitação aplicada é uma onda <i>Tone Burst</i> com frequência central de 60 kHz na direção axial (modo S _{M0}), a= 1 mm.	12

LISTA DE SÍMBOLOS

c_1	Velocidade da onda longitudinal	[m/s]
c_2	Velocidade da onda transversal	[m/s]
λ_L	Primeiro parâmetro de Lamé	[GPa]
μ	Segundo parâmetro de Lamé	[GPa]
ρ	Massa específica	[kg/m ³]
K_{ts}	Número de onda transversal	[m ⁻¹]
K_{tl}	Número de onda longitudinal	[m ⁻¹]
t	Espessura da chapa	[mm]
K	Número de onda na direção da propagação	[m ⁻¹]
ω	Frequência angular da onda	[rad/s]
θ_{rl}	Ângulo de onda refletido longitudinal	[rad]
θ_{rt}	Ângulo de onda refletido transversal	[rad]
θ_i	Ângulo de onda incidente	[rad]
a	Profundidade do defeito	[mm]
b	Largura do defeito	[mm]
λ	Comprimento de onda	[m]

1. INTRODUÇÃO

A implementação de estruturas que suportem diversos tipos de solicitações permite o desenvolvimento de um mundo mais industrializado. Diante da necessidade de monitorar as estruturas de forma mais eficiente, deu-se a evolução dos ensaios não destrutivos (END). O monitoramento tem como objetivo aumentar a confiabilidade de estruturas em geral, detectando falhas prematuras que possam levar ao colapso catastrófico. No campo dos ENDs, destacam-se aqueles baseados na propagação de ondas guiadas típicas em estruturas onde pelo menos uma das dimensões é muito maior que as outras, como por exemplo os vasos de pressão, tanques, cascos de navios, tubulações e trilhos de trem. Na figura 1.1, ilustra-se a utilização de técnicas baseadas no ultrassom convencional, em que a inspeção é realizada em pequenas áreas, sendo necessário mudar o posicionamento do sensor ao longo da estrutura inspecionada, tornando a região irradiada muito menor se comparada com o método de ondas guiadas. Na figura 1.1b, ilustra-se a vantagem dos métodos de detecção baseados em ondas guiadas: neste caso, é utilizado como entrada e saída o mesmo ponto geométrico, tornando possível inspecionar uma região ampla da estrutura de forma mais eficiente e prática. No caso de estruturas de difícil acesso esta técnica também se vê beneficiada pelo fato de poder realizar a introdução da excitação e medição da resposta num mesmo ponto de acesso

Em estruturas que funcionam como guia de ondas, um conjunto particular de formas ou modos de ondas podem acontecer. Seu estudo permite determinar quais são as mais adequadas para o tipo de inspeção a ser realizado. O mapa dos tipos de ondas específicos para cada geometria do guia de ondas se denomina curvas de dispersão [Rose,2014]. A importância desta técnica é comprovada pela grande quantidade de bibliografia encontrada tanto sobre as características das ondas guiadas, entre os quais se pode citar os livros clássicos de [Graff, 1975] e [Auld, 1973], assim como sobre aplicações deste tipo de ondas na detecção de defeitos, sendo [Rose (2014)] um livro referência sobre este tema. Podem ser encontradas também publicações que vinculam ondas guiadas com técnicas de monitoramento de estruturas, destacando-se os trabalhos do Prof. Cawley nesta área, ganhando popularidade em seu primeiro trabalho [Cawley,1978].

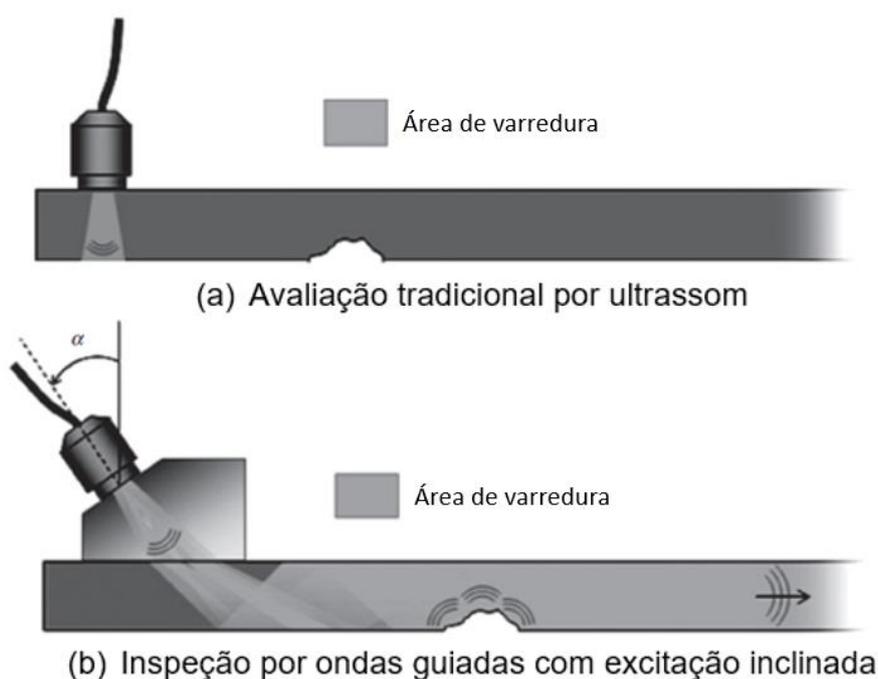


Figura 1.1: Comparação entre o método de avaliação por ultrassom e dois métodos de inspeção por ondas guiadas. [Rose, 2014].

No âmbito do GMAp/UFRGS, podem ser citados os desenvolvimentos feitos relacionados à propagação de ondas guiadas em componentes de um riser flexível [Groth, 2016] e [Groth et al, 2017], e no estudo de trilhos [Izdi, 2016]. Também foram desenvolvidos diversos trabalhos de conclusão de curso como o aqui apresentado, nos quais diferentes aspectos das ondas guiadas são explorados. Entre eles, salienta-se o trabalho de [Menin, 2015], no qual a propagação de ondas não-harmônicas é explorada numa haste prismática metálica. Em [Radke, 2016] a detecção de defeitos em hastes metálicas prismáticas é estudada. Em [Longhi, 2016] as diversas formas de dispersão das ondas guiadas numa haste metálica com cobertura polimérica foram analisadas. Em [Azevedo, 2017], a propagação de ondas guiadas em uma chapa com reforço (simulando uma estrutura de navio) foi estudada, buscando-se por meio da simulação numérica separar as reflexões devidas à complexidade da geometria, e as devidas aos defeitos capturados. Em [Saorin, 2018], exploram-se as condições de simetria e antissimetria dos perfis estudados com o intuito de facilitar a construção de suas curvas de dispersão.

1.1. OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo geral explorar através de simulação numérica a interação das ondas guiadas com defeitos introduzidos numa placa.

Os objetivos específicos do trabalho são:

- Verificar se o modelo estudado simula corretamente a propagação de ondas guiadas prevista segundo a teoria da Elastodinâmica [Auld, 1973].
- Verificar a sensibilidade da estrutura frente à excitação pseudo harmônica (função *Tone Burst*) longitudinal e transversal, identificando a sensibilidade da resposta frente a mudanças na forma do defeito (profundidade a e comprimento b), por meio de elementos finitos.
- Propor funções de correlação entre defeitos e relação entre amplitude de onda emitida e refletida procurando calibrar um possível sistema de END.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Propagação de ondas em sólidos

A propagação de ondas está relacionada com a interação atômica. No estudo de mecânica dos sólidos o meio é dito contínuo, portanto, propriedades como densidade e constantes elásticas são consideradas funções contínuas que representam o sólido macroscopicamente. Considerando um meio contínuo discretizado por uma série de massas interconectadas por molas, pode-se afirmar que, quando recebem algum tipo de excitação, transmitem energia umas às outras ao longo do meio contínuo por estas molas que as interconectam. Este movimento ocorre ao manter o equilíbrio do corpo quando este recebe uma perturbação externa, fazendo com que a energia se propague através do meio. [Graff, 1975].

Existem dois movimentos básicos que podem ser causados pela passagem de onda por um meio infinitesimal. Ondas dilatacionais, ou ondas P, referem-se à dilatação e compressão do sólido, sendo seu movimento transmitido na direção longitudinal do mesmo. Já as ondas distorcionais, ou ondas S, causam o cisalhamento do sólido e a direção do movimento das partículas será perpendicular à propagação da onda. Ambas podem ser visualizadas na figura 2.1.

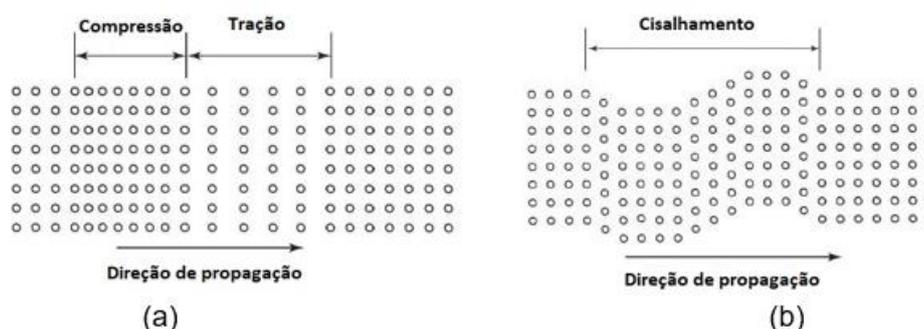


Figura 2.1 - Tipos de onda propagando em um meio sólido, em (a) ondas P e em (b) ondas S [Adaptado de Moore et al., 2005].

As velocidades de propagação destas ondas podem ser obtidas por meio da solução da equação de movimento para um corpo elástico linear, isotrópico e com uma força externa aplicada desconsiderando forças de corpo [Moore, et al., 2005]. As equações 2.1 (a) e (b) representam as velocidades de propagação c_1 e c_2 das ondas P e S respectivamente, onde λ_L e μ são as constantes de Lamé e ρ é a massa específica do material do sólido.

$$c_1 = \sqrt{\frac{\lambda_L + 2\mu}{\rho}} \quad (a) \quad c_2 = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (b) \quad (2.1)$$

Em um meio onde alguma das dimensões é finita, o padrão de ondas que propaga surge da interação das ondas volumétricas e dilatacionais ao interagir com o contorno finito. Neste caso, as ondas propagam na direção na qual a estrutura pode ser considerada infinita em modos condicionados pela geometria finita. Os tipos de ondas modais que podem propagar num determinado guia de onda é definido nas curvas de dispersão, que funciona como um mapa que especifica para cada tipo particular de guia de onda os tipos de ondas modais que podem propagar.

2.2 Propagação de ondas em placas

A solução clássica para a propagação de ondas em placas foi obtida por Lamb por meio da resolução das Equações de Rayleigh-Lamb. Estas equações são descritas pelas Eq. 2.2 e Eq. 2.3, que representam os modos simétricos e assimétricos, respectivamente.

$$\frac{\tan(K_{ts} t)}{\tan(K_{tl} t)} = -\frac{4K^2 K_{tl} K_{ts}}{(K_{ts}^2 - K^2)^2} \quad (2.2)$$

$$\frac{\tan(K_{ts} t)}{\tan(K_{tl} t)} = -\frac{(K_{ts}^2 - K^2)^2}{4K^2 K_{tl} K_{ts}} \quad (2.3)$$

Nas equações acima, t representa a espessura da placa, K o número de onda na direção de propagação, K_{ts} e K_{tl} representam, respectivamente, o número de onda referente às ondas transversais e longitudinais propagando no guia de ondas. Os números de K_{tl} e K_{ts} são representados pelas Eq. 2.4 e Eq. 2.5.

$$K_{tl}^2 = \frac{\omega^2}{c_1^2} - K^2 \quad (2.4)$$

$$K_{ts}^2 = \frac{\omega^2}{c_2^2} - K^2 \quad (2.5)$$

Nas equações acima, ω representa a frequência angular da onda, c_1 e c_2 são as velocidades de propagação das ondas longitudinais e transversais respectivamente. Os valores de K_{ts} e K_{tl} que apresentam soluções para as equações de Rayleigh-Lamb descritas acima resultam nas curvas de dispersão da placa, sendo divididas em modos simétricos (SM) e antissimétricos (A). Os modos simétricos são assim chamados pelo fato da onda ser simétrica em relação ao centro do guia de ondas. Da mesma forma, os modos assimétricos possuem uma antissimetria com relação à mesma linha do guia de ondas.

Em placas, a propagação de ondas também pode se dar pelo modo SH (shear horizontal), que possui movimento cisalhante perpendicular ao plano. As curvas de dispersão referentes a este modo podem ser representadas por meio da equação 2.6, onde n é um número inteiro referente ao modo indicado e c_p é a velocidade de fase do modo de propagação.

$$\frac{\omega^2}{c_2^2} - \frac{\omega^2}{c_p^2} = \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 \quad (2.6)$$

2.3 Atenuação de ondas mecânicas

A atenuação de uma onda é esperada devido à interação desta com o meio em que ocorre a propagação, sendo um dos principais mecanismos de atenuação o geométrico. Em ondas com frentes de propagação cilíndricas ou esféricas, na medida em que a onda se afasta do ponto emissor, a área da frente de onda aumenta, fazendo com que a energia contida nela se redistribua sob a frente de onda. Propagações com frentes de onda planas não estão sujeitas a este tipo de atenuação.

Outra forma de atenuação de ondas se dá por interação com descontinuidades do meio, como por exemplo trincas e trocas de seção. Na colisão da onda com a descontinuidade, ocorre a separação de parte da onda do grupo principal, fazendo com que diminua a amplitude da onda [Groth, 2016].

A dispersão é um importante mecanismo de atenuação e é causada pela dependência da velocidade com a frequência. Ocorre em vigas e placas, nas quais uma ou duas dimensões estão na ordem do comprimento de onda λ . Supondo uma perturbação periódica que possa ser decomposta em suas harmônicas, à medida que a onda viaja, a perturbação se decompõe devido às diferentes velocidades de cada harmônica. O efeito global percebido pelo fenômeno de dispersão é a diminuição da amplitude da onda a medida que a mesma se espalha. Este fenômeno está relacionado com a geometria e o material do elemento estudado.

2.4 Reflexão e transmissão de ondas mecânicas

Uma onda que se propaga em um meio sólido e se choca com uma superfície livre pode ser totalmente refletida se o corpo estiver imerso no vácuo. Para um corpo que se encontra ao ar livre, esta é uma boa aproximação. Esta reflexão é regida pela lei de Snell, a qual indica que uma onda refletida se separará em duas, uma longitudinal e outra transversal, mesmo que a onda incidente seja puramente longitudinal ou transversal. A *Lei de Snell-Descartes* teve sua solução desenvolvida para ondas luminosas, porém é aplicável também para ondas elásticas. Uma onda transversal que incide na superfície do sólido é refletida e se divide em uma transversal, com ângulo θ_{rt} , e uma longitudinal com ângulo θ_{rl} , conforme ilustrado na figura 2.2.

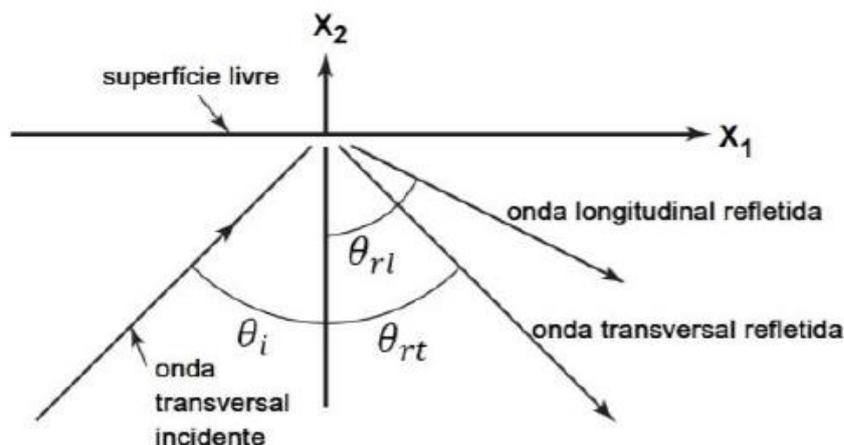


Figura 2.2 - Representação gráfica da Lei de Snell. [Groth, 2016].

O ângulo de reflexão das ondas são função do ângulo de incidência da onda θ_i , onde c_1 e c_2 são as velocidades de propagação longitudinais e transversais, conforme a equação 2.7.

$$\frac{\text{sen}(\theta_{rl})}{c_1} = \frac{\text{sen}(\theta_i)}{c_2} \quad (2.7)$$

2.5 Integração numérica dinâmica explícita

A resolução de problemas com dependência do tempo utilizando softwares comerciais necessita da utilização de métodos numéricos para a integração da equação de movimento do problema, onde a Eq. 2.8 é resolvida para cada elemento, conforme consta em Ls-Dyna Theory Manual (2006).

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = p(t) \quad (2.8)$$

Na equação acima, m é a massa do elemento, c o amortecimento, k a rigidez e $p(t)$ a carga externa aplicada. Para resolver um problema discretizado em elementos finitos, a equação 2.8 fica em função de matrizes de massa, amortecimento e rigidez, e também em função de vetores de carregamentos externos e vetor de deslocamentos.

A integração da Eq. 2.8 no domínio do tempo pode ser feita por dois caminhos diferentes: método Implícito ou explícito. No caso de precisar trabalhar com incrementos de tempo muito pequenos, objetivando capturar resultados numa taxa de aquisição elevada, é mais conveniente utilizar o método de integração explícito. Mais detalhes sobre as particularidades dos métodos de integração implícitos e explícitos podem ser encontradas em Ls-Dyna Theory Manual (2006).

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção é feita a revisão de trabalhos anteriores envolvendo ondas guiadas e detecção de defeitos em placas que foram usados como referência para avaliar resultados e métodos de análise.

No artigo publicado por [Hee Don Jeong, 2000], é descrita uma análise para detecção de defeitos em placas por ondas guiadas, no qual se realizou o estudo experimental de defeitos em uma chapa de 2,4 mm de espessura. Segundo este autor, o modo de propagação simétrico SM0, excitado por uma perturbação axial, teve as amplitudes dos sinais refletidos pelos defeitos alterados de forma proporcional com a profundidade do defeito. O modo assimétrico A0, por sua vez, excitado com uma perturbação transversal, não teve relação proporcional com a profundidade do defeito.

[Demma et al, 2004] fez o estudo da interação de defeitos em placas variando profundidade, extensão axial e frequência, usando o modo de propagação SH₀, modo de propagação perpendicular à direção de propagação da onda. Neste estudo, os autores mostram que uma descontinuidade geometricamente retangular tem uma reflexão no início do defeito devido ao rebaixo da geometria, e outra reflexão devido ao retorno à espessura referência da geometria. Também é mostrado no trabalho que o sinal recebido por um defeito retangular pode ser igualmente obtido pela superposição dos resultados de uma diminuição de espessura e dos resultados de um aumento de espessura. Outra informação interessante apresentada por [Demma et al 2004] foi que o coeficiente de reflexão diante do defeito demonstra um comportamento oscilatório na medida em que o comprimento na direção axial do defeito aumenta. Este fenômeno também foi notado por [Diligent,2003], o qual fez o estudo da interação de defeitos em placas utilizando ondas de Lamb.

4. METODOLOGIA

Nesta seção serão apresentados os parâmetros e características do modelo de elementos finitos utilizado, assim como os procedimentos adotados no pós processamento de dados obtidos para diferentes geometrias de defeitos.

4.1 Modelo de elementos finitos

Para a análise da propagação de ondas em placas, criou-se um modelo de elementos finitos bidimensional no software [LS-PrePost-4.3]. Este modelo é a simplificação de uma placa, conforme figura 4.1, sendo representado por uma geometria retangular com 15 mm de espessura e 1500 mm de comprimento. O material é aço, com módulo de elasticidade de 210 GPa, densidade de 7860 kg/m³ e coeficiente de Poisson de 0,3. Os elementos usados no modelo são quadrados de 4 nós, com lado de 0,5 mm, obtendo-se 30 elementos na direção da espessura e aproximadamente 90000 elementos no total. A placa encontra-se livre, sem nenhuma restrição de movimento, tendo em uma de suas extremidades a aplicação de uma força que tem uma função harmônica modulada variante no tempo, excitando uma banda de frequências conhecida. Esta função é conhecida com o nome de *Tone Burst* [Rose,2014].

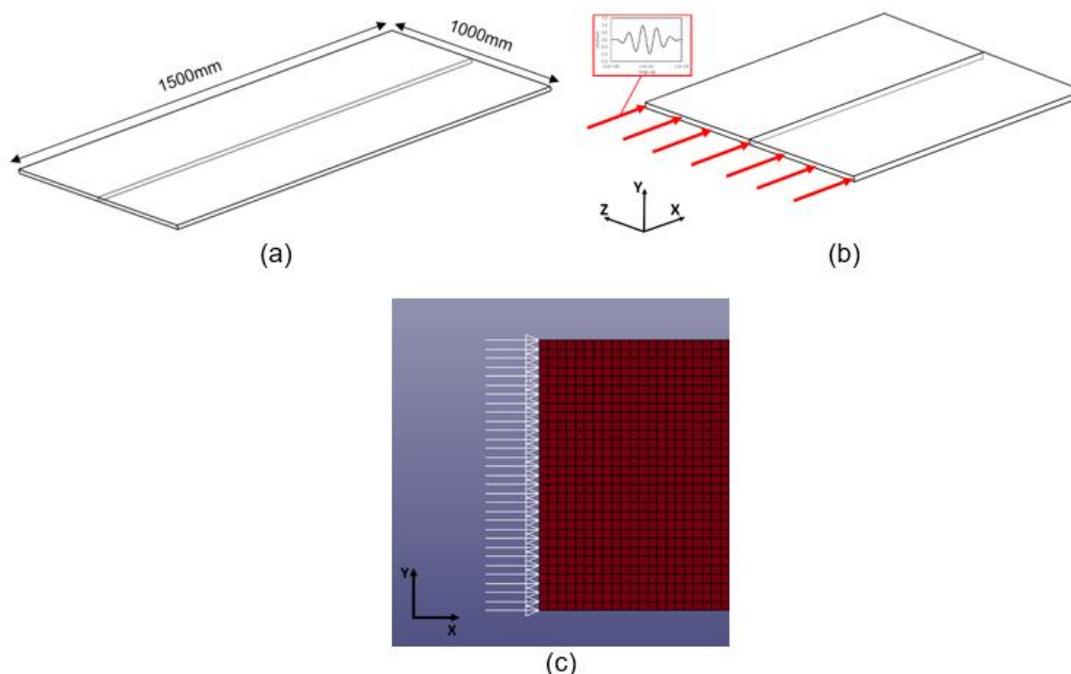


Figura 4.1 - (a) Representação da placa estudada, (b) Detalhe sobre como é aplicado o carregamento, c) Detalhe da malha no modelo de elementos finitos implementado.

4.2 Dupla transformada de Fourier e função de excitação Tone Burst

A análise de sinais que apresentem mais de um modo de propagação pode se tornar complicada se for feita em um único ponto por onde a onda passa, vez que pode ocultar informações devido à sobreposição dos modos gerados. Uma solução para este tipo de análise, proposta por Alleyne e Cawley (1990), é a implementação da dupla transformada de Fourier, que converte os dados de amplitude-tempo recebidos em amplitude-número de onda para cada frequência, em que ondas de Lamb podem ser resolvidas e suas amplitudes avaliadas.

A transformada de Fourier em duas direções é aplicada realizando a transformada do tempo de resposta em cada ponto monitorado para obter o espectro de frequências para cada posição [Alleyne,1991]. A figura 4.2 (a) representa os passos efetuados na dupla transformada de Fourier. O quadro A desta figura representa a matriz de dados de deslocamentos pelo tempo. No quadro B está representada a transformada no espaço, trazendo o domínio dos dados para número de onda. Já o quadro C ilustra a segunda transformada, que transforma o domínio no tempo em domínio da frequência, sendo o resultado esperado. Para a realização da transformada neste trabalho, foi analisado o deslocamento no tempo de 520 pontos sucessivos em uma linha, indicado por uma linha amarela na figura 5.1. Mais detalhes sobre a implementação desta técnica podem ser encontrados em [Alleyne e Cowley, 1990]

A perturbação aplicada na placa é uma função *Tone Burst*, a qual é amplamente utilizada na realização de ensaios não destrutivos. Ela é uma função modulada por uma envoltória função de Gauss ou uma harmônica. A principal característica desta função é a excitação de uma banda de frequências conhecida e bem definida, mantendo a correta frequência de excitação por um longo período de tempo, facilitando a excitação do modo específico. Para a determinação da função *Tone Burst*, podem ser escolhidas duas características, quais sejam, a frequência e o número de ciclos, sendo o último fixado em cinco ciclos pois esta é mais usualmente encontrada na bibliografia [Alleyne e Cawley, 1990]. A Figura 4.2 (b) apresenta uma função *Tone Burst* de 5 ciclos e 50 kHz. Após a aplicação da transformada no tempo e no espaço, obtém-se o espectro de frequências excitadas que podem ser comparadas com a curva de dispersão da placa.

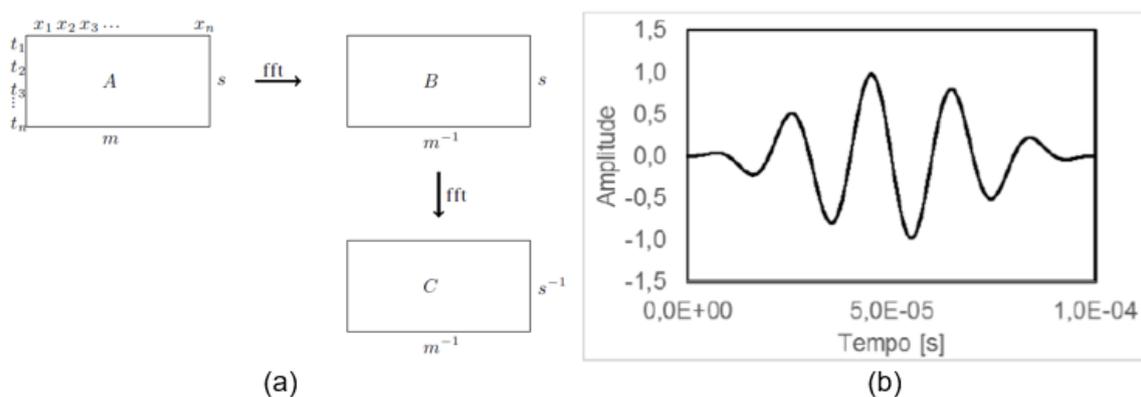


Figura 4.2 - (a) Passos para obter a dupla transformada de Fourier. (b) Função *Tone Burst* centrada em 50 kHz.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Verificação do modelo

Para verificar que o modelo de elementos finitos estivesse gerando resultados condizentes de acordo com os resultados analíticos, foi imposta uma perturbação na direção longitudinal em uma das extremidades da placa, e avaliado o sinal recebido pela transformada de Fourier. Para realizar a análise da propagação da onda, faz-se necessário obterem-se os dados de deslocamento em função do tempo. A aquisição de dados foi feita em 520 pontos

localizados entre 440 mm e 700 mm distantes da extremidade excitada, representados pelos pontos vermelhos apresentados na figura 5.1.

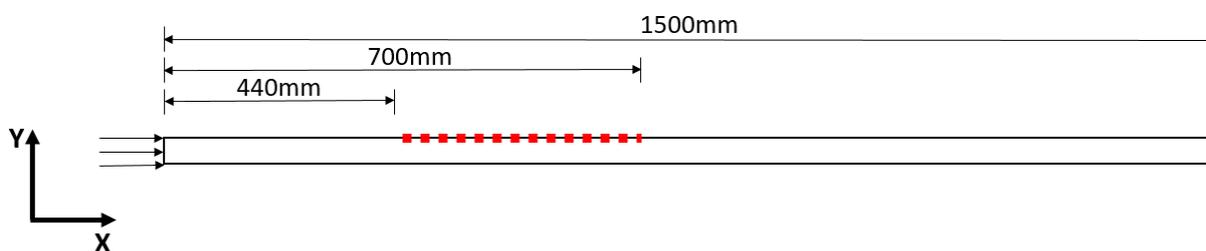


Figura 5.1 - Região de nós selecionados para adquirir dados destacados em vermelho, enquanto as setas indicam a direção de carregamento.

Na Fig. 5.2 são apresentadas as curvas de dispersão A0 e SM0, visualizadas no modelo bidimensional simulado. A onda modal SM0 é simétrica, associada ao modo axial de propagação, e a onda modal A0 é assimétrica, associada à flexão da placa.

Nesta mesma figura, ilustra-se a dupla transformada de Fourier da propagação de uma excitação tipo *Tone Burst* axial com uma frequência de excitação de 70 kHz. Devido à direção da perturbação era esperado que só o modo de propagação SM0 fosse excitado com uma concentração localizada na frequência de 70 kHz, assim como ilustra a figura 5.2.

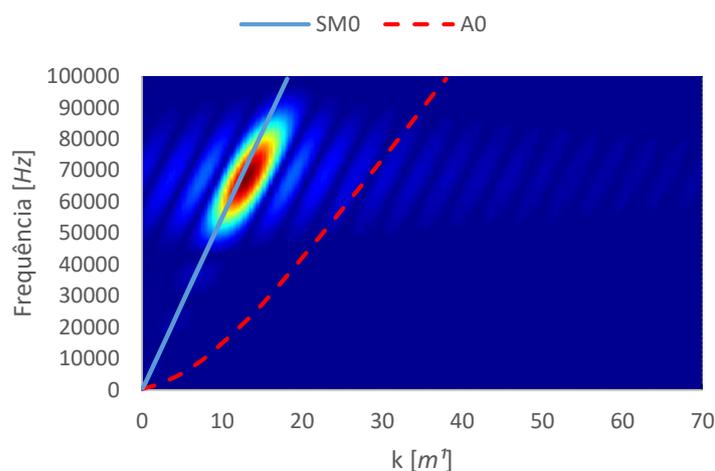


Figura 5.2 - Resposta obtida pela dupla transformada de Fourier de uma onda com frequência de 70 kHz.

5.3 Interação defeito-onda

Após a validação do modelo da placa sem defeito, foi feito o estudo da placa com defeitos. De modo a facilitar a análise, foi introduzida uma redução da espessura na placa, mantendo fixo o comprimento do defeito em $b = 2 \text{ mm}$, como ilustra a figura 5.3. A análise foi conduzida variando a profundidade e a largura do defeito.



(a)

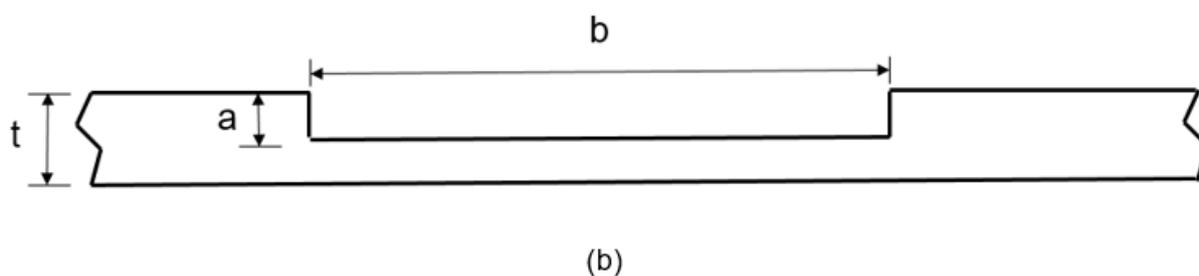


Figura 5.3 - (a) Defeito inserido na placa. (b) Parâmetros que definem a geometria do defeito.

Para obter os resultados do deslocamento imposto na geometria e o refletido pelo defeito, foi escolhido um nó M, localizado entre a região com defeito e a perturbação imposta. Com isso, foi possível perceber variações de amplitude do deslocamento dos nós na direção y . A figura 5.4 mostra os deslocamentos do nó em y ao longo do tempo de um defeito $a=1\text{ mm}$, $b=2\text{ mm}$. Durante o tempo em que a onda se propagou, fica clara a passagem de 3 ondas: (i) a perturbação imposta, que chega no ponto de medição no tempo $T1$, (ii) a chegada da onda refletida no defeito no tempo $T2$ e (iii) a reflexão da onda emitida no extremo da placa que chega no ponto de medição no tempo $T3$. Após a chegada destas três ondas outras aparecem na figura 5.4 de mais difícil interpretação.

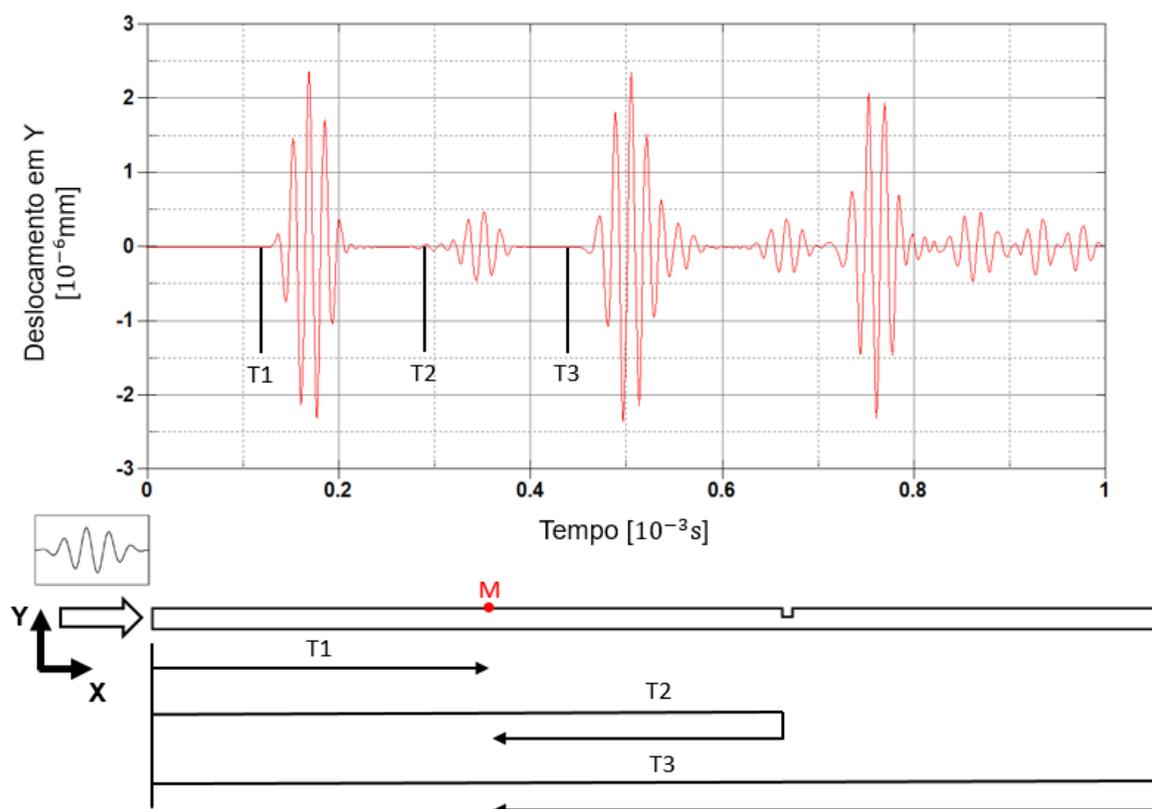


Figura 5.4 - Comportamento da excitação *Tone Burst* com frequência central de 60 KHz . Na direção axial e sua interação com o defeito ($a=1\text{ mm}$, $b=2\text{ mm}$), a onda modal ativada foi a $SM0$, sendo perpendicular à direção do guia de onda.

Quando a placa é excitada com uma excitação transversal tipo *Tone Burst* com uma frequência central de 60 kHz , vemos que neste caso também aparecem as três ondas típicas ilustradas na figura 5.5. Nota-se também como neste caso a amplitude é muito maior que percebida no caso de excitar na direção axial e medir na direção transversal.

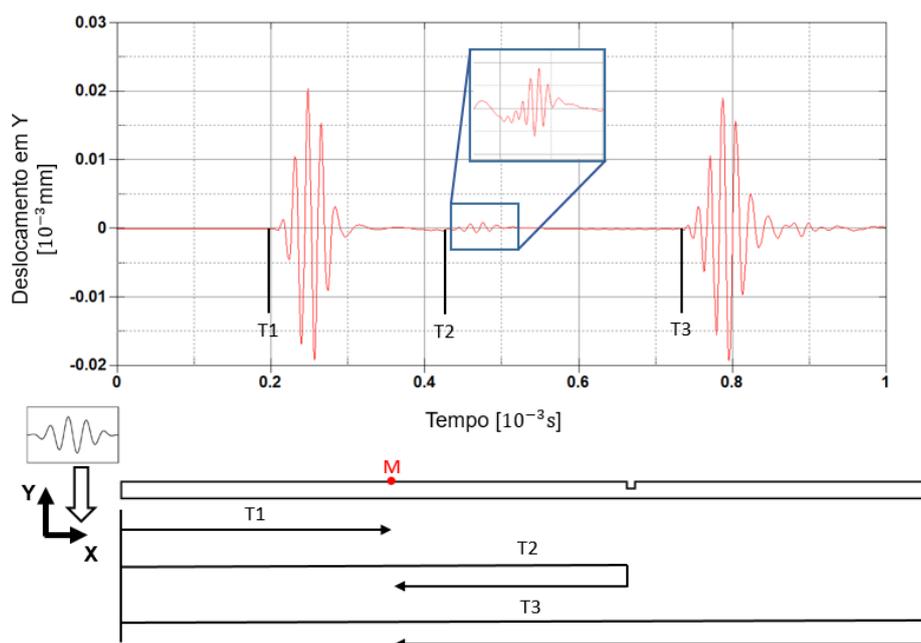


Figura 5.5 - Sinal refletido pela excitação transversal *Tone Burst* com frequência central de 60 kHz que excita o modo A0.

Na figura 5.6, analisa-se com uma excitação axial com freq. de 60 kHz um defeito de $a=1\text{ mm}$, $b=150\text{ mm}$. Com esta largura de defeito é possível identificar o começo e fim do mesmo. As ondas que são nitidamente percebidas são discriminadas a seguir. (i) No tempo T1, chega a excitação ao ponto M, (ii) Em T2 chega em M a onda refletida no começo do defeito, (iii) em T3 chega a onda refletida no fim do defeito, (iv) em T4 chega em M a onda refletida no final da placa.

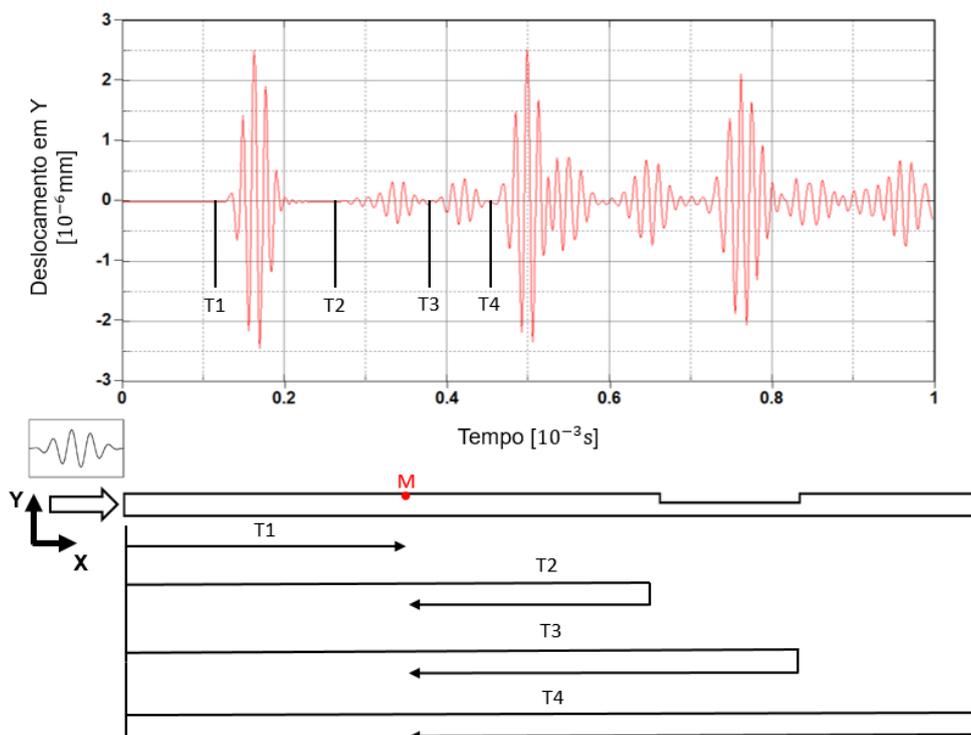


Figura 5.6 - Sinal de um defeito com 150 mm de largura, mostrando que a onda reflete tanto para uma diminuição da espessura quanto para um aumento de espessura.

Na análise da variação de espessura, foram escolhidos os valores de profundidade do defeito a de 1,2,3 e 10 mm , mantendo o valor de b fixo em 100 mm . Fazendo o estudo pontual de um mesmo nó para todas as geometrias, foi possível verificar um comportamento linear proporcional entre a amplitude refletida pelo defeito e a profundidade do mesmo quando o modo axial $SM0$ é excitado. Este resultado pode ser visualizado na figura 5.7.

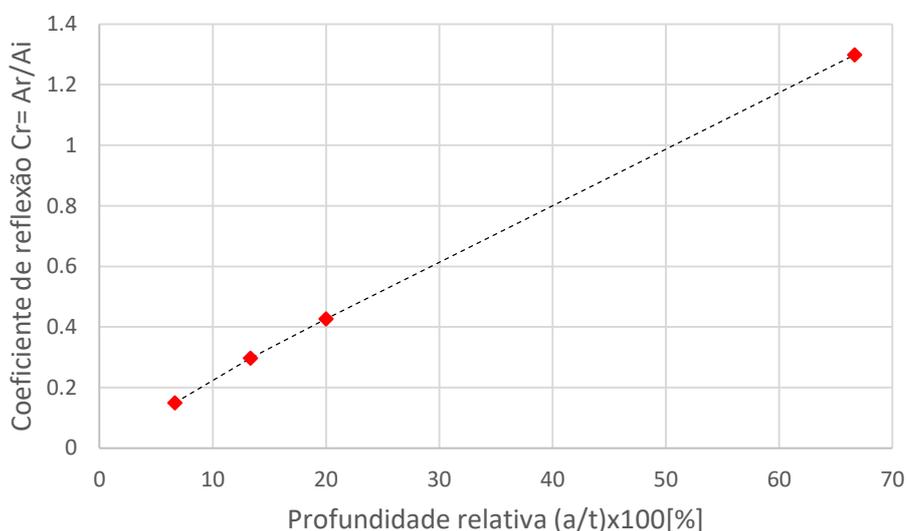


Figura 5.7 - Comportamento linear proporcional da amplitude do sinal frente ao aumento da profundidade do defeito quando excitado o modo $SM0$, $(Ar/Ai) = 51.6(a/t)$.

Fazendo a mesma análise descrita acima, porém com o modo transversal $A0$, verifica-se que a relação entre a amplitude da onda refletida e incidente não é linear, como se observa na figura 5.8.

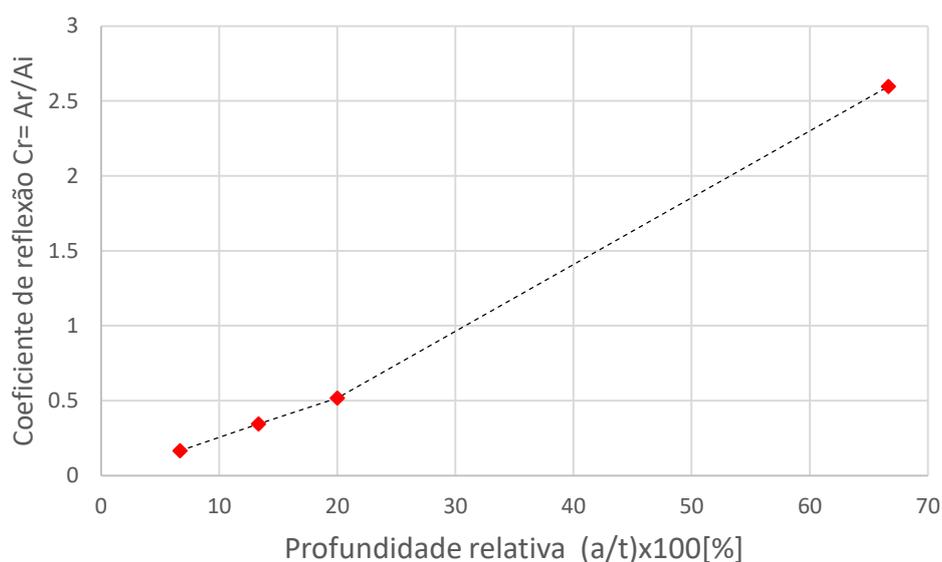


Figura 5.8 - Resposta linear do sinal refletido pelo defeito quando excitado com uma onda transversal (modo $A0$).

Os resultados obtidos nesta verificação são similares aos encontrados por Hee Don Jeong, no qual o estudo é feito em placa de 2,4 mm com defeitos semi-elípticos, mostrando que

quando o modo de propagação é longitudinal, a proporcionalidade entre os sinais refletidos pelo defeito e a profundidade não se altera pela geometria.

Na análise da variação da largura do defeito, os valores de b usados foram 2, 5, 10, 20, 30 e 50 mm , enquanto o valor da profundidade a foi fixado em 1 mm . Neste caso, verifica-se um comportamento diferente do sinal refletido se comparado com o gerado pela variação de profundidade do defeito. Neste caso, ocorreu uma oscilação dos valores de amplitude do sinal refletido na medida que a largura do defeito aumenta. Para obter uma forma de comparação entre os dois modos de propagação, foi usado o coeficiente de reflexão C_r , o qual compara a amplitude da onda incidente A_i , com a amplitude refletida A_r . Como os dois modos de propagação têm comprimentos de onda diferentes, foi usada a relação entre largura de defeito e comprimento de onda. Esta oscilação pode ser vista na figura 5.9.

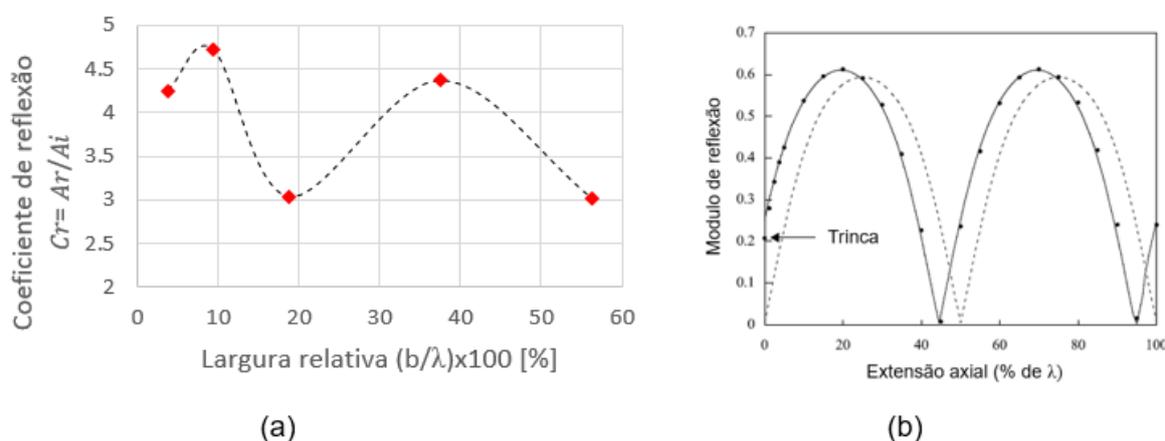


Figura 5.9 - Comparação entre coeficiente de reflexão e comprimento do defeito. (a) Resultado obtido quando se excita a placa com uma onda *Tone Burst* de 60 kHz transversal (modo A_0), $a = 1$ mm . (b) Resultado obtido por [Demma, 2004].

Segundo resultados obtidos por [Demma,2004], o gráfico inicia com valores do coeficiente de reflexão baixos, crescendo na medida em que a largura do defeito aumenta. O pico de amplitude ocorre quando a largura é cerca de 25% do comprimento de onda e decresce antes de chegar aos 50% do comprimento de onda. Demma atribui a causa deste fenômeno à interferência entre os picos e vales dos sinais refletidos no início do defeito e no fim do defeito.

Quando verificado o sinal obtido pelo modo SM_0 , nota-se a atenuação do sinal na medida em que o defeito aumenta, e pode ser visto na figura 5.10.

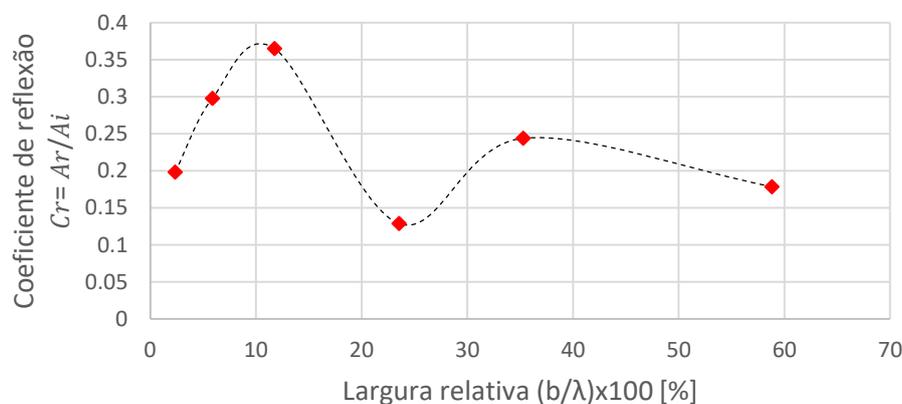


Figura 5.10 - Coeficiente de reflexão obtido quando a excitação aplicada e uma onda *Tone Burst* com frequência central de 60 kHz na direção axial (modo SM_0), $a = 1$ mm .

6 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi investigado o comportamento de uma placa metálica modelada em estado plano de deformações. A simulação foi feita utilizando o método dos elementos Finitos realizando uma análise explícita, e simulando a excitação da placa aplicando uma onda tipo *Tone Burst* axial e transversal. Diferentes tipos de defeitos foram simulados, computando-se a sensibilidade da onda refletida ao tipo de defeito estudado.

Diante dos resultados obtidos com este trabalho, é possível afirmar que o uso das ondas guiadas para detecção de defeitos em placas é de grande relevância e eficácia. O seu uso já consolidado na inspeção de dutos faz com que o estudo sobre este tema seja rapidamente aplicado na engenharia para variadas geometrias e materiais. O modelo em elementos finitos criado no software LS-PrePost-4.3 mostrou-se capaz de reproduzir os resultados esperados em ensaios experimentais apresentados na literatura.

Na análise de resultados, foram verificados comportamentos coerentes com os obtidos por outros pesquisadores que fizeram tanto ensaios experimentais quanto numéricos. Quando a variação de profundidade do defeito é analisada, os dois modos obtêm resultados semelhantes, uma vez que ambos têm a amplitude do sinal refletido pelo defeito aumentada quando a profundidade do defeito aumenta. O modo SM0 se destaca por mostrar um aumento proporcional da amplitude de acordo com o aumento do defeito.

Quando analisada a variação do comprimento do defeito, o modo SM0, que se propaga com maior velocidade, sofre uma atenuação no sinal, enquanto o modo A0 consegue reproduzir resultados semelhantes aos resultados obtidos em outras pesquisas. A oscilação constatada nos resultados está intimamente ligada à interferência entre as ondas refletidas pelo início e final do defeito, fazendo com que o sinal ora seja construtivo, ora destrutivo.

Como trabalhos futuros é sugerido explorar variadas geometrias de defeitos e suas diferentes reflexões. Também seria interessante o estudo de padrões de defeitos alinhados sobre o guia de ondas. Poderia ser interessante também o estudo do caso da perda de espessura da chapa nas duas superfícies e compará-la com o sinal refletido por uma redução de espessura equivalente em apenas uma superfície, como foi o caso estudado neste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alleyne D.; Cawley P.; **“A two-dimensional Fourier Transform method for the measurement of propagating multicode signals”**, Journal of Acoustical Society of America, 1990.

Auld, B. A.; **“Acoustic fields and waves in solids”**, John Wiley and Sons, Vol II, 1973.

Cawley, P.; **“Defect Location in Structures by a Vibration Technique”**, Department of Mechanical Engineering, Bristol University, 1978.

Demma, A.; Cawley, P.; Lowe, M.; Roosenbrand, A.G.; Pavlakovic, B.; **“The reflection of guided waves from notches in pipes: a guide for interpreting corrosion measurements”**, NDT&E International 37, p167-180, 2004.

Diligent, O.; **“Interaction between fundamental lamb modes and defects in plates”**, Tese de Phd, Imperial College London, 2003.

Graff K. F.; **“Wave Motion in Elastic Solids”**, Dover Publications, 1975.

Gross Azevedo Ch. **“Identificação e localização de um defeito típico de corrosão em cascos de navios através de ondas de Lamb”**. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2017.

Groth E. B.; **“Propagação de ondas de tensão em hastes retangulares no intervalo de frequência de (0;100 [kHz])”**, Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2016.

Groth, E. B., Iturrioz, I., Clarke, T.; **“The dispersion curve applied in guided wave propagation in prismatic rods”**, Latin American Journal of Solids and Structures, 2018.

Idzi, J. L.; **“Estudio Numérico de la Propagación de Ondas Guiadas em Rieles Ferroviarios”**, Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2017.

Jeong, H.D.Shin, H.J., Rose, J.L.; **“Detection of Defects in a Thin Steel Plate Using Ultrasonic Guided wave”**, 15th World Conference on Non-Destructive Testing, 2000.

Longhi, C. F.; **“Propagação de ondas guiadas em barras retangulares: O problema da atenuação na propagação”**. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2016.

LS-DYNA®; **“Theory Manual”**, Livermore software Technology Corporation, 2006.

Menin, P.D.; **“Análise da propagação de ondas guiadas em estruturas com uma dimensão predominante”**, Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2015.

Moore P.O; Miller R.K.; Hill E. V.K; **“Acoustic emission testing – Nondestructive testing handbook”**, 3ª edição, American Society for Nondestructive Testing, 2005.

Radke, E. D.; **“Propagação de ondas guiadas em hastes retangulares: Estudo de padrões de resposta na interação defeito-onda”**. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2016.

Rose, J. L.; **“Ultrasonic Guided Waves in Solid Media”**, Cambridge University Press, 2014.

Saorin A.; **“Estudo do comportamento de curvas de dispersão de ondas guiadas em estruturas de seção transversal com eixos de simetria”**, Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2018.