

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

PROPAGAÇÃO DE ONDAS GUIADAS EM HASTES RETANGULARES: ESTUDO DE
PADRÕES DE RESPOSTA NA INTERAÇÃO DEFEITO-ONDA.

por

Erik Duarte Radke

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, Junho de 2016

PROPAGAÇÃO DE ONDAS GUIADAS EM HASTES RETANGULARES: ESTUDO DE
PADRÕES DE RESPOSTA NA INTERAÇÃO DEFEITO-ONDA

por

Erik Duarte Radke

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. Dr. Ignacio Iturrioz

Co-orientador: Msc. Eng. Eduardo Becker Groth

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Jakson Manfredini Vassoler

Prof^a. Dr^a. Letícia Fleck Fadel Miguel

Prof. Dr. Walter Jesus Paucar Casas

Porto Alegre, 20 de Junho de 2016.

AGRADECIMENTOS

São tantas pessoas que fizeram parte destes seis anos e meio de graduação, aos quais devo gratidão, que se tornou difícil realizar esta seção.

Gostaria de agradecer meu orientador, Prof. Ignacio Iturrioz, pela paciência para explicar os conceitos deste trabalho, não usuais no contexto do curso de graduação em Engenharia Mecânica, pelas dicas valiosas para a escrita e para a apresentação do trabalho.

Ao meu co-orientador, Msc. Eduardo Groth, pela também paciência em explicar as rotinas de *MATLAB*, e pelas discussões sobre os resultados obtidos.

Ao Tiago Coser, pelos *drops* de dicas fundamentais que contribuíram imensuravelmente ao trabalho, pelos conhecimentos e dicas passados não só para o trabalho de conclusão, mas também à minha formação como engenheiro. Seu empenho e eficiência são inspiradores.

Ao Fabiano Bertoni e Facundo Lopez, que contribuíram com suas experiências e são grandes influências na minha formação profissional e pessoal.

A todo o pessoal do TS, que foi minha segunda casa durante quase toda a graduação, em especial ao Manolo, Lucas, Jotapê, Léo, Mathias, Diego, Facundo, Tayná, entre outros. Obrigado por fazerem minha graduação ser mais leve e divertida, são grandes amigos que levo para a vida.

À Gabi, Dudu, e Tiago, pelas dicas para apresentação, logos sem fundo, apontador *laser*, e parceria durante este último e especialmente estressante semestre, sem vocês teria sido muito mais difícil.

Aos “Peões com Grife”, pela parceria de Mecânica, companheirismo nos tempos difíceis do curso. São para mim uma inspiração profissional e pessoal. Também aos outros colegas do curso que fizeram parte da minha formação.

À Camila, pelos anos de parceria e companheirismo, sem ela minha graduação teria sido completamente diferente. Muito obrigado pela compreensão nos tempos de provas e principalmente durante a realização deste trabalho, sem falar no auxílio na escrita e apresentação do mesmo. Obrigado pelo apoio e confiança depositados em mim.

Finalmente aos meus pais, Jorge e Miriam por todo o apoio na formação pessoal e educacional. Sem eles nada disso seria possível. Agradeço também a minha irmã Larissa, pela parceria e ajuda na elaboração da apresentação final deste trabalho.

RADKE, E. D. **Propagação de Ondas Guiadas em Hastes Retangulares: Estudo de Padrões de Resposta na Interação Defeito-Onda**. 2016. 18. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

RESUMO

Atualmente ser capaz de detectar falhas subcríticas em estruturas é de grande importância na engenharia. Por isso, nos últimos anos técnicas de detecção de defeitos têm sido desenvolvidas. Entre elas, as baseadas na propagação de ondas em meios sólidos, são das mais promissoras. No caso particular de estruturas laminares (vasos de pressão, tanques) ou lineares (arames de *risers*, tubulações metálicas), as ondas que se propagam têm um padrão particular de comportamento, são as chamadas ondas guiadas. Técnicas baseadas na propagação destes tipos de ondas permitem uma forma econômica e eficiente para detectar a localização e magnitude dos defeitos sem uma aproximação excessiva da fonte de propagação. Dentro deste contexto, no presente trabalho é estudada a propagação de ondas guiadas numa haste retangular metálica de 15x5mm, verificando-se as características da propagação destes tipos de ondas na geometria estudada com e sem a presença de defeitos. O estudo é realizado empregando um modelo de elementos finitos para realizar a discretização espacial e integração explícita para resolver o problema no domínio do tempo, empregando o software comercial *Abaqus/Explicit*. No trabalho são discutidos os resultados obtidos e é realizado um esforço para correlacionar tipos de defeitos com padrões de propagação das ondas refletidas nos mesmos.

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

RADKE, E. R. **Guided Wave Propagation in Rectangular Rods: Defect-Wave Interaction Response Patterns Study**. 2016. 18. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016

ABSTRACT

Nowadays being able to detect subcritical flaws in structures is of great importance in engineering. Because of that, defect-detecting techniques have been developed in the last years. Amongst them, the ones based in solid media wave propagation are the most promising. In the particular case of laminar (pressure vessels, tanks) or linear structures (riser wires, metal tubes), the propagating waves have a particular behavior pattern, they are called guided waves. Techniques based in the propagation of these kind of waves allow for an economic and efficient way of detecting the position and magnitude of the defects without excessive approximation of the propagation source. In that context, the guided wave propagation in a rectangular rod of 15x5 mm is studied here, so to verify the propagation characteristics of this type of waves in the studied geometry with and without the presence of defects. The study uses a finite element model to make a spatial discretization and explicit integration to solve the problem in the time domain with the commercial software *Abaqus/Explicit*. The results are discussed in this work and an effort is made to correlate defect types with wave propagation patterns reflected on them.

KEYWORDS: Guided waves, nondestructive techniques, finite element method, wave propagation in laminar structures.

ÍNDICE

	Pág.
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Objetivos.....	2
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	2
2.1 Propagação de ondas em um meio infinito.....	2
2.2 Propagação de ondas longitudinais em barras esbeltas.....	3
2.3 Propagação tridimensional de ondas.....	3
2.4 Solução de D'Alembert.....	4
2.5 Atenuação de ondas mecânicas.....	4
2.6 Reflexão de ondas mecânicas.....	5
2.7 Integração numérica dinâmica explícita.....	5
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
4 METODOLOGIA.....	8
5 ANÁLISES REALIZADAS.....	8
5.1 Descrição do Modelo Numérico.....	8
5.2 Dupla Transformada de Fourier, e função de excitação <i>Tone Burst</i>	9
5.3 Análise 1: Validação do modelo.....	10
5.4 Estudo da interação defeito-onda.....	11
5.5 Análise 2: Interação defeito-onda.....	12
6 CONCLUSÃO.....	14
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	15
Apêndice A.....	16
Apêndice B.....	17

1 INTRODUÇÃO

O setor do óleo e gás é de grande valor econômico e estratégico para um país. Atualmente grande parte da energia consumida no mundo é de origem fóssil seja na forma de óleo ou gás natural. Apesar da recente crise global e da queda do preço dos barris de petróleo, este e o gás natural continuarão entre as principais fontes da matriz energética mundial possivelmente pelas próximas duas décadas. As descobertas de campos *offshore* da região do pré-sal na costa brasileira reforçam estas perspectivas. Contudo a exploração do petróleo e do gás natural torna-se cada vez mais desafiadora devido às crescentes profundidades de operação. Dentro deste contexto, os dutos flexíveis, também denominados *risers*, que são utilizados para extração e transporte de petróleo, tornam-se extremamente importantes para uma produção segura.

Os dutos flexíveis são estruturas compostas que contém camadas metálicas e poliméricas com distintas funções. A Figura 1.1 demonstra a disposição das mesmas em um duto flexível. A camada conhecida como armadura de tração é responsável pela absorção dos carregamentos de tração impostos a linha sendo esta composta de fitas de aço dispostos em helicoide, na verdade, duas camadas com sentidos de hélice opostos.

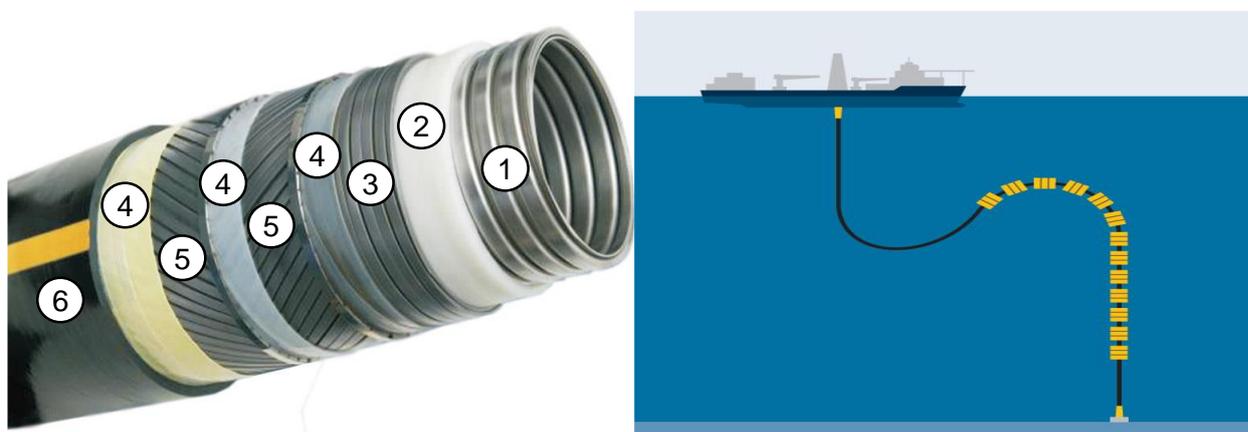


Figura 1.1: (a) Representação das camadas de um duto flexível. A camada 5 representa a armadura de tração que dá resistência estrutural ao conjunto. Em (b) desenho esquemático de um duto flexível em campo.

A prevenção de falhas é algo muito importante nesta área da indústria pois além de serem custosas podem causar enormes danos ambientais e pessoais, portanto é obrigação do engenheiro responsável certificar-se da integridade das estruturas de engenharia durante seu tempo de serviço. Na área de prevenção de falhas, se destacam os ensaios não-destrutivos (ENDs), que servem para testar componentes em serviço à procura de defeitos sem danificá-los. Entre as diversas técnicas de ENDs destaca-se o uso do ultrassom, em que a utilização de ondas guiadas apresenta grandes vantagens em relação ao ultrassom convencional, onde a onda mecânica se propaga por grandes distâncias sem uma fonte de energia externa. Estas ondas têm maior sensibilidade em relação ao ultrassom convencional no qual a fonte deve estar próxima da região avaliada. As técnicas baseadas em ondas guiadas têm ótima relação custo benefício devido à simplicidade e rapidez da inspeção, e permite localizar danos em estruturas inacessíveis devido a estarem submersas, enterradas ou isoladas. Isto se deve a que quando aplica-se uma excitação que vai propagar-se como onda guiada somente uma pequena área de exposição é necessária. [Rose, 2014].

No que se refere aos dutos flexíveis, a integridade mecânica do duto depende diretamente da integridade das fitas metálicas que formam a armadura de tração, e devido ao fato de serem hastas retangulares esbeltas, são excelentes candidatas a funcionarem como guia de ondas. Uma eventual descontinuidade ou defeito presente nas fitas representa grande risco, portanto o estudo das ondas elásticas que se propagam através destes elementos é de grande importância.

1.1 Objetivos

O trabalho tem como **objetivo geral**:

Explorar as características das ondas guiadas que se propagam numa haste retangular metálica de 15 [mm] x 5 [mm] ($\rho=7860[\text{kg/m}^3]$, $E=200$ [GPa], $\nu=0,3$) e a possibilidade destas ondas captarem adequadamente os defeitos que possam existir transversalmente nestas estruturas.

Os **objetivos específicos** do trabalho são:

- Verificar que ondas de excitação conhecidas tendem a propagação nos tipos de ondas previstos pelas curvas de dispersão determinadas na dissertação de Groth (2016).
- Explorar a sensibilidade das ondas que se propagam em um guia de ondas na detecção de diferentes tipos de defeitos.
- Utilizar as curvas de dispersão da estrutura estudada como ferramenta na detecção da magnitude e tipo de dano induzido.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção será feita uma revisão dos conceitos básicos para o entendimento da propagação de ondas guiadas em meios sólidos.

2.1 Propagação de ondas em um meio infinito

A propagação de uma onda mecânica se resume a interação entre átomos em um meio. Na mecânica dos sólidos e dos fluidos, o meio é visto como contínuo, de forma que suas propriedades, por exemplo, constantes elásticas e densidade são ditas funções contínuas. Considerando um modelo composto de uma série de massas discretas interconectadas por molas, de modo que uma perturbação aplicada a uma massa é logo transmitida para as outras para manter o equilíbrio dos corpos ao receberem uma excitação externa propagando a energia através do meio, sendo a velocidade dessa propagação influenciada pela massa e rigidez do conjunto. No caso de um meio contínuo, a massa e os parâmetros elásticos são distribuídos em termos de módulos elásticos e densidade. [Graff, 1975].

As ondas elásticas movimentam um elemento cúbico infinitesimal presente em um meio sólido em dois modos básicos, um movimento longitudinal, em que o cubo é comprimido e esticado, e um de distorção, onde o elemento é cisalhado mantendo seu volume constante. Estas ondas são também conhecidas respectivamente como ondas P (*primary*) e ondas S (*secondary*), onde a primeira oscila paralelamente à direção de propagação e a segunda perpendicularmente. A Figura 2.1 demonstra o efeito da passagem dos dois tipos de ondas [Moore et al., 2005].

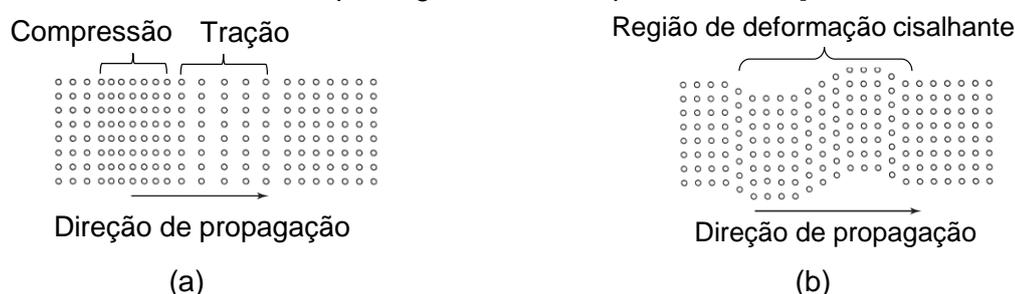


Figura 2.1: Tipos de ondas que se propagam em meios infinitos, em (a) ondas do tipo P (primary) em (b) ondas do tipo S (secondary) [Adaptado de Moore et al., 2005].

A velocidade de propagação destas ondas pode ser definida com a resolução das equações de movimento para os deslocamentos em um corpo linear elástico, homogêneo e isotrópico com a aplicação de uma força externa e sem forças de corpo. A equação 2.1 (a) e (b) demonstram as velocidades de propagação das ondas P e S respectivamente, onde c_1 e c_2 são

as velocidades de propagação das ondas P e S, λ e μ são as constantes de Lamé para o material e ρ é a massa específica do meio [Moore et al., 2005].

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

Para um meio finito, onde a onda interage com alguma superfície, diz-se que a propagação resultante é uma combinação linear de ondas modais, as quais tem sua frequência, número de onda, velocidade de fase e modos próprios, que são influenciados pela geometria do guia de ondas. As curvas de dispersão são uma ferramenta que permite melhor conhecimento destas ondas.

2.2 Propagação de ondas longitudinais em barras esbeltas.

Para deduzir a equação da onda unidimensional, Graff, 1975, considera uma onda longitudinal em uma barra esbelta. O equilíbrio em um elemento diferencial pode ser calculado, desprezando as forças de corpo, considerando-se o material linear elástico, sob pequenas deformações. Valendo-se disso, chega-se a equação 2.3, também conhecida como a equação da onda.

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (2.3)$$

Onde $u_{(x,t)}$ é um campo de deslocamentos longitudinal, t é o tempo e c_0 é a velocidade de propagação das ondas longitudinais na barra, descrita pela equação 2.4.

$$c_0 = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2.4)$$

Onde E é o módulo de elasticidade do material e ρ é a densidade. A solução desta equação se apoia nas seguintes condições: a área da seção transversal é constante e o material homogêneo. Também é considerado que as seções transversais se mantêm planas e paralelas entre si durante a propagação das ondas. Os efeitos de inércia lateral devidos ao efeito de Poisson são negligenciados.

2.3 Propagação tridimensional de ondas.

Para alguns casos, não é possível uma simplificação para o caso unidimensional, desta maneira, Hiermaier, 2007, fornece a equação da onda para o caso geral tridimensional:

$$\nabla^2 u = \frac{1}{c_p^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (2.3)$$

$$c_p = \sqrt{\frac{K + 4/3G}{\rho}} \quad (2.4)$$

Onde c_p é a velocidade de propagação da onda, K representa a compressibilidade isotérmica, G o módulo de cisalhamento e ρ a densidade do material.

2.4 Solução de D'Alembert

A solução da equação da onda encontrada por D'Alembert introduz uma mudança de variáveis e chega a equação 2.5. Na qual f e g são funções arbitrárias determinadas pelas condições iniciais ou função de força do problema específico, representando a propagação de perturbações [Graff, 1975].

$$y(x, t) = f(x - c_0 t) + g(x + c_0 t) \quad (2.5)$$

É importante notar que f e g representam perturbações que se propagam e que, indiferentemente da forma destas perturbações, estas se mantêm constantes durante a propagação. Logo as ondas se propagam sem distorção.

Para o caso particular em que a excitação é uma função harmônica, o comportamento é descrito pela equação 2.6.

$$u(x, t) = B \cos(kx - \omega t) = B \cos k(x - c_0 t) \quad (2.6)$$

Onde ω é a frequência angular, k é o número de onda e c_0 a velocidade de propagação da onda. Outras relações importantes podem ser escritas nas seguintes formas:

$$\omega = 2\pi f \quad (a) \quad f = 1/T \quad (b) \quad (2.7)$$

$$c_0 = \omega/k \quad (a) \quad k = 2\pi/\lambda \quad (b) \quad (2.8)$$

Onde T é o período da onda em segundos, λ é o comprimento de onda, f é a frequência em [Hz] e B está relacionado à amplitude da onda.

2.5 Atenuação de ondas mecânicas

Uma perturbação que se propaga em um meio tem sua energia diminuída durante sua propagação. Esta atenuação é causada por diferentes mecanismos, um dos principais é o mecanismo de atenuação geométrica, atuante em propagações em que a frente de onda é esférica ou cilíndrica, pois a área da frente aumenta à medida que a onda se afasta do ponto de emissão. Como a energia da onda é a mesma, ela se redistribui na frente de onda fazendo com que a amplitude dos deslocamentos causados pela onda diminua conforme a frente se afasta do ponto emissor. Frentes de onda planas, em que a área da frente se mantém constante, não estão sujeitas a este tipo de atenuação.

Outra forma de atenuação é a separação das ondas devido à interação com trincas e discordâncias, de forma que as ondas perdem energia ao interagir com tais descontinuidades. Com o choque, parte da energia das ondas se separa em forma de reflexão ou transmissão da onda para outros meios [Groth, 2016].

A dispersão é um fenômeno presente em geometrias em que uma ou duas dimensões estão na ordem de grandeza do comprimento de onda λ . Fenômeno este causado pela dependência da velocidade de propagação da onda com a sua frequência. Uma perturbação periódica que pode ser decomposta em suas harmônicas irá se abrindo, pois estas se propagam em diferentes velocidades devido à dependência da velocidade de propagação com a frequência, demonstrada em seções anteriores. Desta forma a amplitude da onda diminui à medida que se dispersa ao longo de sua propagação.

Também é importante notar que a onda sofre atenuação devido à viscosidade interna do material, de forma que seus efeitos, negligenciados em pequenos comprimentos, são comparáveis aos efeitos de dispersão quando as distâncias são grandes.

2.6 Reflexão de ondas mecânicas

Ondas ao encontrarem uma mudança no meio no qual se propagam irão refletir na interface ou serão transmitidas para o outro meio, podendo também alterar seu modo de propagação, então uma onda pode ser refletida ou refratada ao colidir com uma interface.

Quando uma onda que se propaga em uma lâmina infinita de fluido, onde somente movimentos de tração e compressão existem, atinge uma superfície perfeitamente reflexiva com um ângulo de incidência oblíquo θ_i em relação a normal da superfície, a onda reflete em um ângulo θ_i espelhado em relação a normal e segue se propagando sem perder energia. No caso de uma propagação em um meio sólido, o comportamento é mais complexo e é regido pela lei de Snell [Groth, 2016]. Uma onda transversal incidente em uma superfície refletora, irá se separar em duas ondas refletidas, uma transversal e uma longitudinal, refletidas respectivamente em um ângulo θ_{rt} igual a θ_i e um ângulo θ_{rl} , em que o segundo é dependente das velocidades de propagação, c_1 e c_2 , dos dois tipos de onda satisfazendo a equação 2.9:

$$\frac{\text{sen } \theta_{rl}}{c_1} = \frac{\text{sen } \theta_i}{c_2} \quad (2.9)$$

Onde c_1 é a velocidade de propagação da onda longitudinal no meio e c_2 é a velocidade de propagação da onda transversal no mesmo meio. A Figura 2.2 demonstra o comportamento reflexivo de ondas em meios fluidos e sólidos.

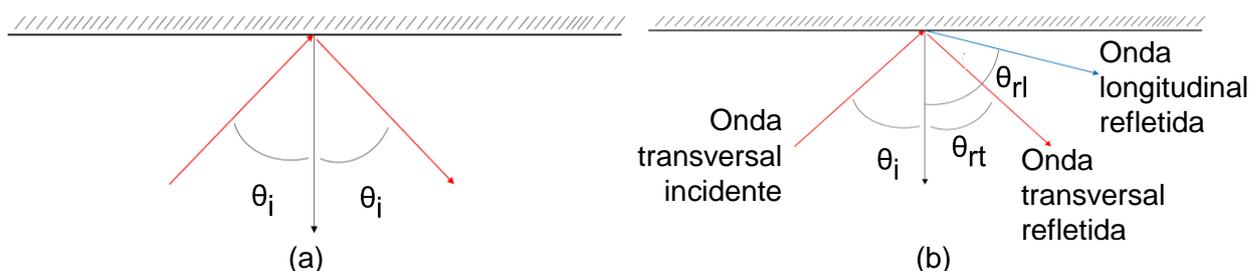


Figura 2.2: Reflexão de ondas em interfaces, em (a) é demonstrada a reflexão de uma onda em um meio fluido, em (b) reflexão de uma onda em um meio sólido segundo a lei de Snell.

2.7 Integração numérica dinâmica explícita

A integração numérica no domínio temporal da equação de movimento resultante da aplicação da discretização espacial do método dos elementos finitos, pode ser escrita:

$$M\ddot{u} = P - I \quad (2.10)$$

Onde M é a matriz de massa, \ddot{u} é a aceleração nodal, P são as forças externas e I são as forças internas.

A integração da equação 2.10 no domínio do tempo pode ser feita por dois caminhos distintos. Empregando os métodos implícitos, que se caracterizam por utilizar incrementos de tempo maiores durante o processo de integração, sendo alguns dos métodos deste tipo incondicionalmente estáveis se o problema estudado é linear. Estes métodos exigem que o problema seja isostático durante todo o processo de integração, pois as equações de resolução por este caminho exigem a inversão da matriz de rigidez.

A outra alternativa é utilizar os métodos explícitos, sendo estes últimos condicionalmente estáveis. Este caminho é utilizado quando é necessária uma discretização no tempo muito detalhada, como pode ser o caso de propagação de ondas guiadas ou quando são esperadas não linearidades muito acentuadas no processo a ser estudado. Uma vantagem deste método é que durante a resolução do mesmo não é necessário que a estrutura esteja bem vinculada, pois neste caso não é necessária a inversão da matriz de rigidez para sua resolução. O intervalo de integração destes métodos está relacionado com aquele que permite capturar as frequências

naturais de vibração mais altas do modelo estudado. [Abaqus, 2014]. O *ABAQUS/Explicit* usa a regra das diferenças finitas centrais para integrar as equações de movimento. As equações 2.11, 2.12 e 2.13 calculam aceleração, velocidade e deslocamento respectivamente, onde $u_{(t)}$ é o deslocamento no tempo, $\dot{u}_{(t)}$ é a velocidade, $\ddot{u}_{(t)}$ é a aceleração e Δt é o incremento de tempo, utilizando a técnica das diferenças finitas centrais.

Para obtenção de resultados precisos, os incrementos de tempo devem ser suficientemente pequenos para que a aceleração possa ser considerada constante durante o seu tempo.

$$\ddot{u} = M^{-1}(P - I) \quad (2.11)$$

$$\dot{u}|_{(t+\frac{\Delta t}{2})} = \dot{u}|_{(t-\frac{\Delta t}{2})} + \frac{(\Delta t|_{(t+\Delta t)} + \Delta t|_{(t)})}{2} \ddot{u}|_{(t)} \quad (2.12)$$

$$u|_{(t+\Delta t)} = u|_{(t)} + \Delta t|_{(t+\Delta t)} \dot{u}|_{(t+\frac{\Delta t}{2})} \quad (2.13)$$

A precisão e a estabilidade do método explícito estão condicionadas ao incremento de tempo definido na análise. O incremento temporal em que o cálculo pode ser avançado e ainda assim manter a precisão na representação do problema é normalmente pequeno. Se uma incrementação for maior que este limite máximo, os resultados obtidos não serão confiáveis. [Abaqus, 2014].

Uma maneira conservadora de definir o limite de estabilidade, é deixando de olhar para o modelo global e passar a olhar um elemento da malha. O incremento temporal não pode ser maior do que o tempo em que a onda se propaga pelo elemento. Então o limite de estabilidade pode ser definido como:

$$\Delta t_{max} = \frac{L^e}{c_d} \quad (2.14)$$

Onde L^e é o tamanho do menor elemento, c_d é a velocidade de propagação da onda no material, definida pela equação 2.4 e Δt_{max} é o limite de estabilidade. Detalhes sobre as metodologias de integração aqui sumariamente comentadas podem ser encontradas em Bathe & Wilson, 2014.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

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

A primeira é a dissertação de mestrado de Groth, 2016, onde foram realizados vários estudos referentes a mesma haste metálica estudada no presente trabalho. A outra referência comentada é o artigo de Demma et al, 2014, onde são avaliados utilizando ondas guiadas diversos tipos de defeitos em tubulações.

Na dissertação de mestrado de Groth, 2016, são realizadas várias análises sobre uma haste metálica retangular com as mesmas dimensões avaliadas neste trabalho. Entre os desenvolvimentos feitos se destaca a computação das curvas de dispersão da haste obtidas por três métodos diferentes numa faixa de frequência [0, 0.1MHz]. As curvas calculadas são apresentadas na Figura 3.1, onde as quatro linhas que partem da origem são chamadas de linhas fundamentais e estão associadas com os quatro movimentos fundamentais em vigas, movimentos longitudinais (tração e compressão, (A), de flexão (em torno dos dois eixos perpendiculares ao de propagação da onda, (B) e (D)) e um de torção, (C). Os movimentos fundamentais de viga também são demonstrados na figura, e o gráfico de velocidade de propagação em relação a frequência (à direita) é uma derivada do primeiro.

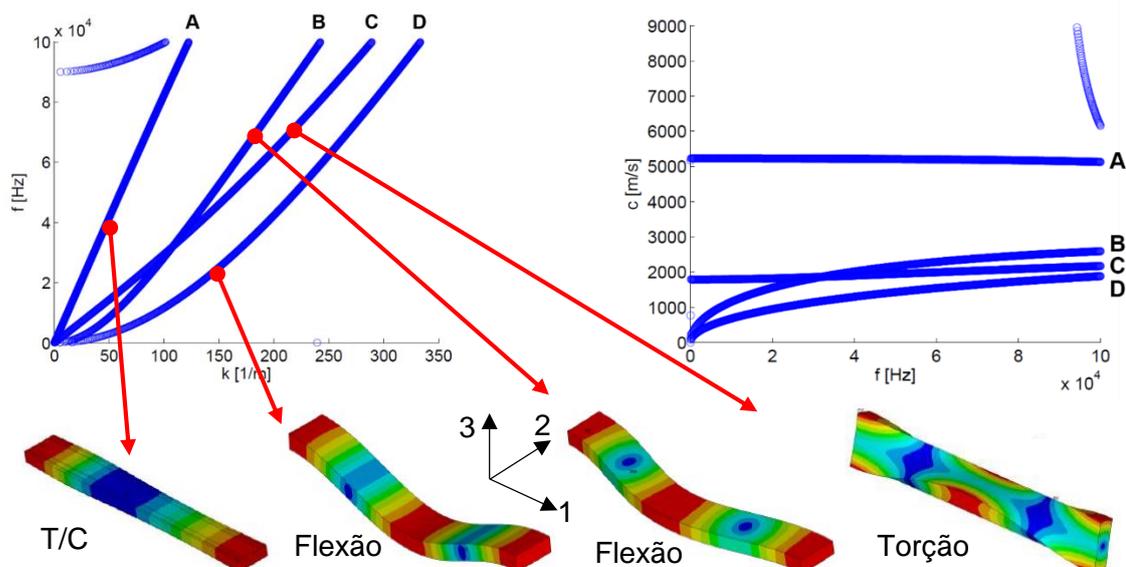


Figura 3.1: Curvas de dispersão apresentadas em Groth, 2016. A esquerda resultados em termos de frequência e o número de onda. A direita resultados em termos da frequência de excitação e da velocidade de propagação da onda. Embaixo representação dos modos de propagação [Groth, 2016].

Verifica-se que uma onda longitudinal se propaga na mesma velocidade, independente da frequência de excitação (curva A na Figura 3.1), o mesmo acontece com a onda de torção, porém com uma velocidade de propagação inferior (curva C). Já as curvas B e D, que representam os modos de flexão, demonstram um comportamento diferenciado, com diferentes velocidades pra diferentes frequências, sendo então modos dispersivos.

O presente trabalho estuda o mesmo guia de ondas analisado por Groth, 2016, portanto as mesmas curvas de dispersão são utilizadas nas sessões subsequentes para validação do modelo de elementos finitos construído e estudo da interação defeito-onda. Com a interpretação das curvas de dispersão foi possível escolher o modo longitudinal como modo para estudo de interação defeito-onda. Isto porque este é um modo que mantém uma velocidade de propagação constante para diferentes frequências, sendo então um modo não dispersivo, ideal para ENDS onde devido a este fato, uma grande extensão do guia de ondas pode ser inspecionada a partir de apenas um ponto de aplicação da perturbação.

Demma et al, 2014, utiliza um modelo de elementos finitos para realizar um estudo sobre a reflexão de ondas guiadas em tubos defeituosos, em que as curvas de dispersão estão referidas a um tubo de aço de 3 polegadas (77,9 mm de diâmetro interno e 5,5 mm de espessura de parede). Dois modos de propagação são escolhidos para o estudo da interação defeito-onda variando parâmetros dos defeitos e frequência de excitação. A Figura 3.2 demonstra as curvas de dispersão estudadas e os parâmetros dos defeitos que são explorados.

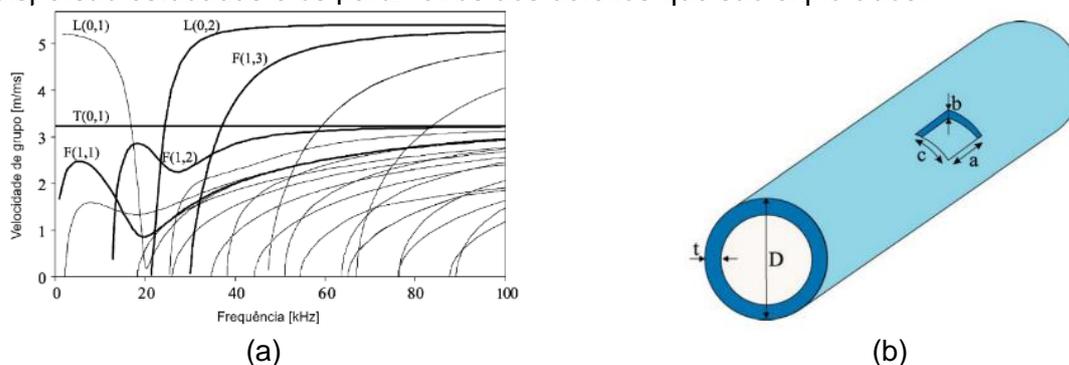


Figura 3.2: Em (a) Curvas de dispersão analisadas e em (b) parâmetros 'a', 'b', e 'c' explorados no estudo. Adaptadas de Demma et al (2014).

Os modos escolhidos para avaliar os defeitos são o de torção T(0,1), e o modo longitudinal L(0,2). A seleção dos modos foi realizada levando em conta a independência da velocidade de propagação em relação a frequência da excitação (a partir de 40kHz para L(0,2)), sendo ambos modos não dispersivos. O artigo fornece uma base para estimar os coeficientes de reflexão esperados ao se testar diferentes tamanhos de tubos, tamanhos de defeitos e frequências de excitação. As dimensões dos defeitos foram estudadas através de parâmetros adimensionais definidos pelas equações 3.1 (a), (b) e (c).

$$A\% = \frac{a}{\lambda} 100 \quad (a) \quad B\% = \frac{b}{t} 100 \quad (b) \quad C\% = \frac{c}{2\pi R_M} \quad (c) \quad (3.1)$$

Onde $A\%$ é a extensão axial adimensional do defeito, a é o comprimento axial, $B\%$ é a profundidade relativa do defeito, t é a espessura do tubo, $C\%$ é a extensão circunferencial do defeito, c é a largura do defeito na direção circunferencial, R_M é o raio médio do tubo, e λ é o comprimento de onda da excitação. São levantados mapas de coeficientes de reflexão em função dos tamanhos dos defeitos citados na superfície do tubo. São apresentados um fator de correção para outros tamanhos de tubos, localização do defeito na seção transversal, modo de vibração da onda guiada e frequência de excitação.

Dentro do contexto das monografias de conclusão do curso de engenharia mecânica da UFRGS, podem ser citados alguns trabalhos relevantes, como o de Corrêa, 2011, em que o método semi-analítico de elementos finitos é utilizado para levantar as curvas de dispersão para um perfil I e depois comparado com as curvas de dispersão geradas por um algoritmo comercial (Disperse). Outro trabalho foi o de Menin, 2015, em que são estudadas as propagações de diferentes formas de onda em diferentes frequências para uma haste de seção transversal retangular de um *riser*. Os resultados são discutidos avaliando com as excitações se decompõe na base de ondas modais apresentadas nas curvas de dispersão.

4 METODOLOGIA

Nas próximas seções são analisadas propagações em hastes com e sem defeito e para isso é utilizado um modelo de elementos finitos tridimensionais elásticos lineares (hexágonos de 8 nós). Desta forma se realiza a discretização espacial do modelo. A discretização temporal da equação do movimento resultante é feita através de um esquema de integração explícita ao qual se faz referência na seção 2.7. Este modelo foi implementado no software comercial *Abaqus/Explicit*. Mais detalhes sobre o sistema mencionado podem ser encontrados em Abaqus, 2014.

5 ANÁLISES REALIZADAS

5.1 Descrição do Modelo Numérico

O modelo representa um arame de *riser* de dimensões 15x5mm, por 1500mm de comprimento, as condições de contorno foram baseadas no modelo feito por Groth, 2016. O material é o aço, com módulo de elasticidade E igual a 200 GPa e densidade de 7860 kg/m³. Um dos lados é engastado, e o outro é sujeito a um carregamento definido por uma força que tem uma função harmônica modulada variante no tempo, excitando uma banda de frequências estreita conhecida. Esta função é conhecida com o nome de *Tone Burst*. O modelo utiliza elementos hexagonais cúbicos de 8 nós, com 0,5mm de lado, totalizando 900000 elementos. Os dados são salvos a uma taxa de 2 milhões de valores por segundo com incremento temporal de 1e-7s.

Para a validação do modelo, foram aplicadas três forças em direções distintas sobre o modelo do arame sem defeitos, conforme a Figura 5.3, visando desta forma excitar os quatro modos de vibração vistos nas curvas de dispersão levantadas por Groth, 2016. Foram retirados

os dados de deslocamento vs. tempo sobre uma faixa de 100 mm de comprimento na superfície do guia de ondas, totalizando 200 pontos, demonstrado na Figura 5.1.

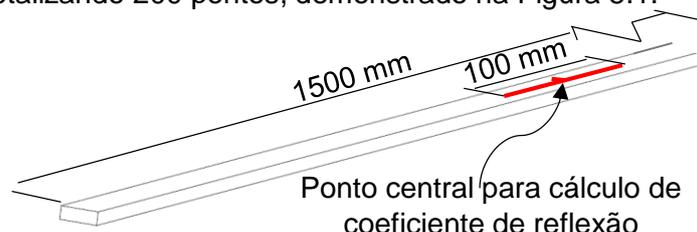


Figura 5.1: Pontos escolhidos para coleta de dados de deslocamento no tempo.

5.2 Dupla Transformada de Fourier, e função de excitação *Tone Burst*

Quando mais de um modo de propagação é presente na análise de sinais, o monitoramento de um único ponto por onde passa a onda é complexo, pois oculta informações importantes devido a sobreposição dos modos. A técnica da dupla transformada de Fourier proposta por Alleyne e Cawley, 1990, é adotada para resolver este problema, pois permite visualizar todos os modos que se propagam.

A transformada de Fourier é uma técnica matemática que se baseia na premissa de que qualquer função periódica pode ser decomposta como uma soma algébrica de funções harmônicas. Desta forma, observa-se a amplitude e a frequência correspondente dos termos desta série e é possível ter informação das características da função no domínio temporal ou espacial. As frequências dominantes possuem amplitudes elevadas e por isso destacam-se. A técnica numérica mais popular para calcular esta transformação é a chamada transformada rápida de Fourier comumente conhecida por FFT (*Fast Fourier Transform*). A dupla transformada consiste em aplicar a transformação FFT tanto no domínio do tempo como no domínio espacial. A entrada de dados para esta transformação são funções no tempo medidas sobre pontos espaciais sucessivos neste caso sobre um comprimento de 100mm (ver linha vermelha indicada na Figura 5.1). Mais detalhes sobre a implementação desta técnica podem ser encontrados em [Alleyne e Cawley, 1990].

A perturbação utilizada foi uma função *Tone Burst*, que é uma maneira comumente empregada em ENDs para excitar uma banda de frequências conhecida. A função *Tone Burst*, 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, o que facilita a observação dos modos específicos devido as suas frequências características de ativação. Podem ser escolhidas duas características, 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 5.2 (b) apresenta uma função *Tone-Burst* de 5 ciclos e 50kHz.

Após a obtenção do sinal no espaço e no tempo é aplicada a FFT (*Fast Fourier Transform*) sob ambas variáveis com o *software Matlab*, resultando em uma análise espectral no espaço e no tempo, que então pode ser sobreposta as curvas de dispersão, pois estas possuem as mesmas dimensões do espectro produzido pela FFT. Esta sobreposição possibilita a identificação dos modos propagados na análise. A Figura 5.2(a) demonstra esquematicamente o funcionamento da FFT2d, o quadro (A) representa os dados organizados em uma matriz onde a primeira coluna contém os deslocamentos no tempo do ponto de posição x_1 , a segunda na posição x_2 e assim sucessivamente. O quadro (B) representa a matriz após a aplicação da transformada de Fourier na direção do tempo. E o quadro (C) representa a matriz com a FFT aplicada sobre as duas direções, tempo e espaço. Graficando a matriz de magnitudes assim geradas, dita superfície pode ser sobreposta as curvas de dispersão e identificar a correspondência dos modos propagados com as curvas de dispersão associados aos ditos modos.

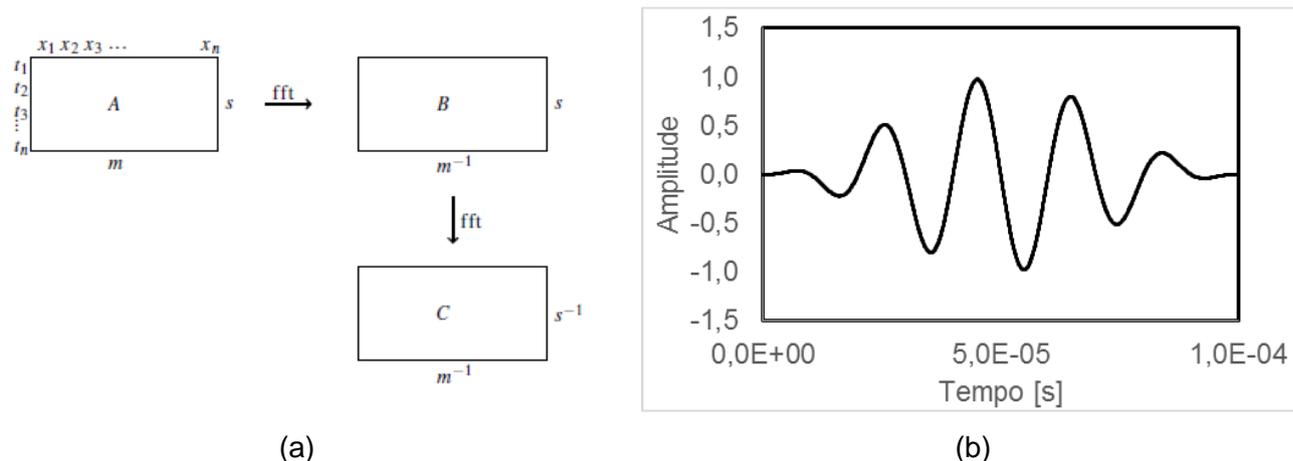
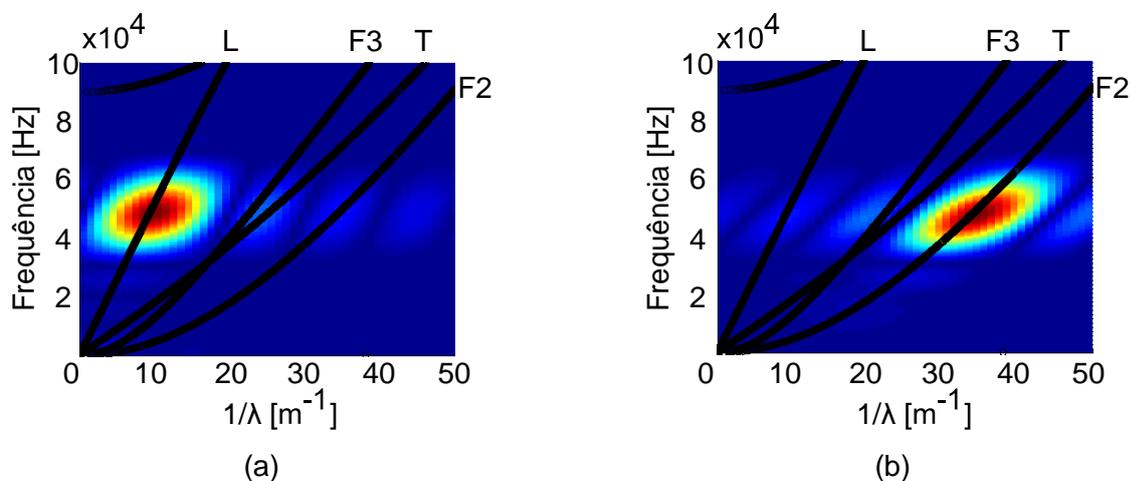


Figura 5.2: (a) Esquema demonstrativo da geração da função FFT2d, s e m indicam as unidades em segundos e metros da variação temporal e espacial respectivamente. (b) Função *Tone Burst*, com 5 ciclos e frequência em 50kHz.

5.3 Análise 1: Validação do modelo.

Para realizar a validação do modelo foi aplicado sobre o mesmo, três tipos diferentes de forças ilustradas como (a), (b) e (c) na Figura 5.3(d). Neste caso não foi considerado nenhum defeito na haste. Sobre os resultados das três simulações foi realizada a dupla transformada de Fourier e foram obtidos os gráficos apresentados nas Figura 5.3(a), (b) e (c). Observa-se na Figura 5.3(a) que as frequências dominantes se concentram em torno da linha fundamental que representa o modo de propagação longitudinal, condizente com a excitação imposta. Em (b), as frequências dominantes se concentram em torno da linha fundamental que representa o modo de flexão em torno do eixo 2. Em (c), as frequências dominantes se concentram no modo de flexão em torno do eixo 3 e no modo de torção, não podendo ser feita a distinção entre estes dois últimos, devido à proximidade das curvas no gráfico para a faixa de frequência utilizada. Comparando os resultados obtidos aqui, com os obtidos experimentalmente por Groth, 2016, verifica-se que o modelo representa de forma adequada o comportamento dinâmico de uma haste de seção retangular e pode ser utilizado para estudo de interações defeito-onda. Cabe salientar que no estudo realizado por Groth foi utilizado outro software de elementos finitos (ANSYS/LS-DYNA).



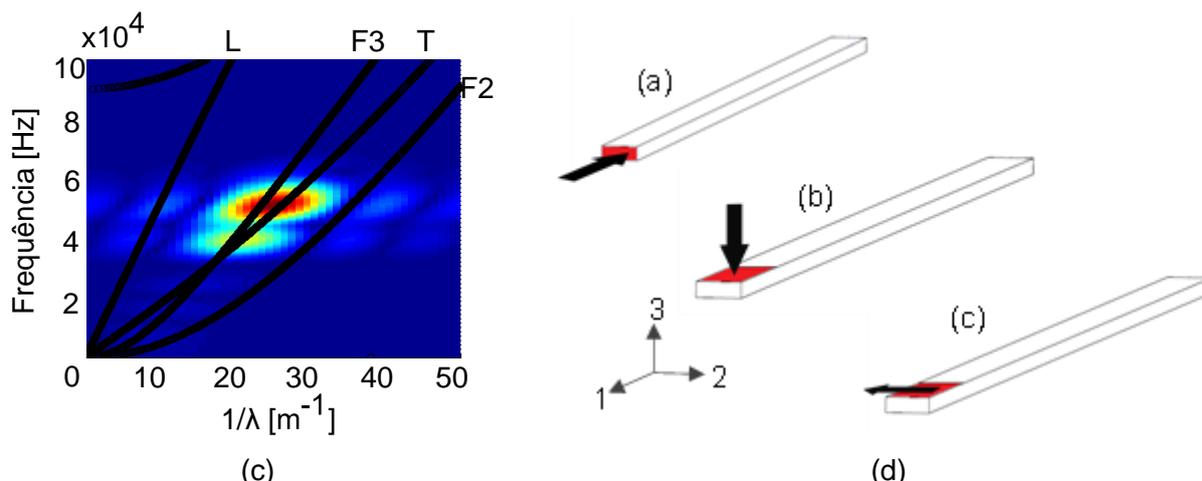


Figura 5.3: Resultados em termos de dupla FFT: (a) Na aplicação de uma excitação *Tone Burst* axial, (b) no caso uma excitação *Tone Burst* na direção do eixo 3, (c) uma excitação na direção do eixo 2. (d) Demonstrativo dos três tipos de forças aplicadas. Não foi considerado nenhum defeito na haste.

5.4 Estudo da interação defeito-onda

Após a validação do modelo, foram feitas diversas simulações com defeitos posicionados na parte central do guia de ondas, conforme demonstrado na Figura 5.4, onde foram variadas a orientação do defeito (ao longo do eixo 2 ou 3), e sua profundidade relativa em relação a espessura do guia de ondas, como se apresenta na equação 5.2. Na qual $D\%$ é a profundidade relativa, d é a profundidade do defeito em milímetros e t é a espessura do guia de ondas em mm. Foi feita também uma comparação entre a onda incidente e a onda refletida com o uso da equação 5.1, onde c_r é o coeficiente de reflexão, A_i é a amplitude máxima da onda incidente e A_r é a amplitude máxima da onda refletida.

$$c_r = \frac{A_r}{A_i} \quad (a) \quad D\% = \frac{d}{t} 100 \quad (b) \quad (5.1)$$

A Figura 5.4 ilustra a geometria dos defeitos representados nos modelos, todos têm ângulos retos com largura de 0,5 mm e profundidade máxima de 2,5 mm (50% da espessura). Os defeitos são dispostos ao longo da face A ou da face B, sendo a excitação longitudinal a escolhida para os modelos com defeito.

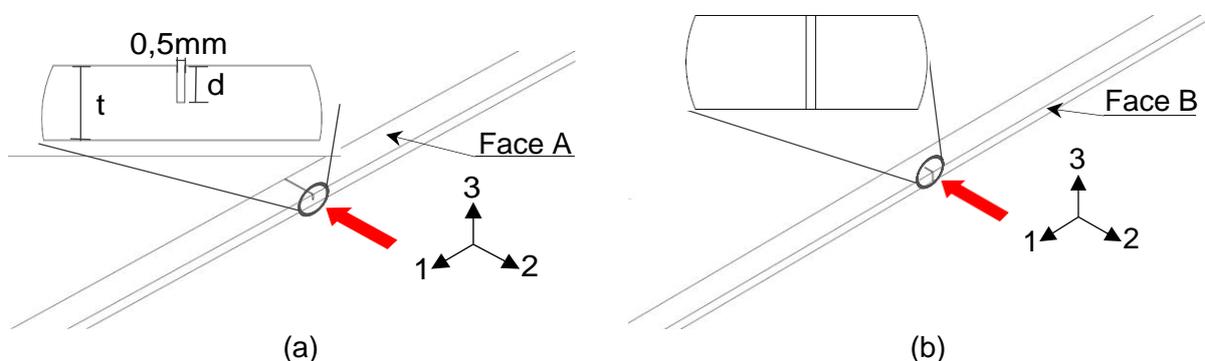
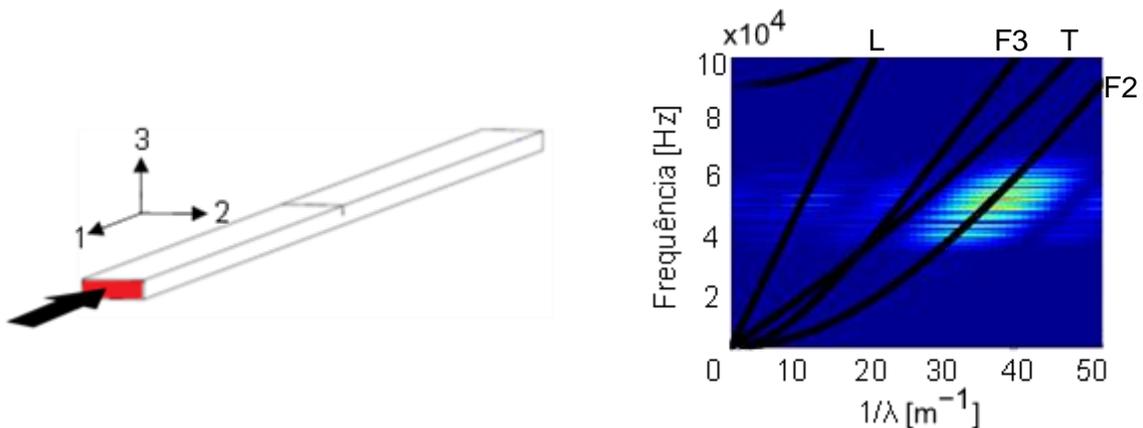
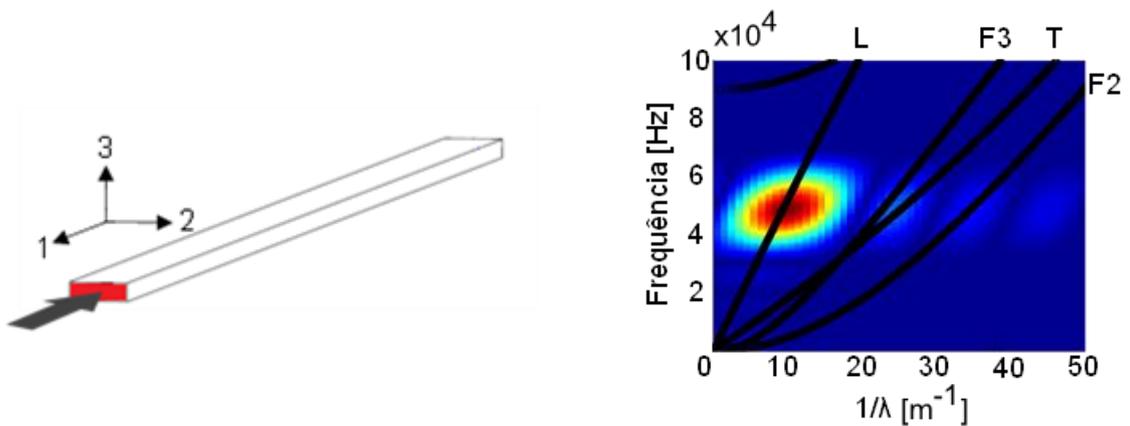


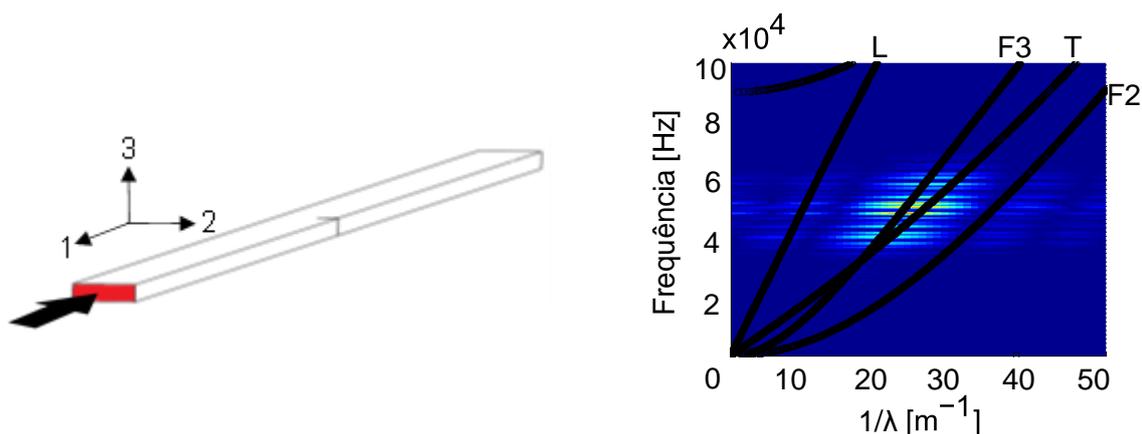
Figura 5.4: Geometria dos defeitos estudados: (a) Defeito 1, ao longo da face A. (b) Defeito 2, ao longo da face B.

A Tabela A.1 no apêndice A resume os diferentes modelos realizados, onde os modos de flexão em torno do eixo 2 e 3 são representados por F(2) e F(3) respectivamente, longitudinal por L e de torção por T.

5.5 Análise 2: Interação defeito-onda.

Orientação do defeito: Foram obtidos os deslocamentos calculados para os pontos demonstrados na Figura 5.1, desta forma foram retirados os deslocamentos do sinal incidente, e após interação do sinal com o defeito na parte central do guia de ondas este é refletido e passa novamente sobre os pontos. Lembrando que o modo do sinal incidente é puramente longitudinal, foi realizada uma FFT2d dos deslocamentos causados pelo sinal refletido e comparados com a FFT2d para um guia de ondas sem defeito. Percebe-se que apesar do sinal incidente ser longitudinal, a onda refletida retorna em dois modos diferentes quando há um defeito, estes dependentes da face em que a falha se localiza. Quando está sobre a face A o modo de flexão em torno do eixo 2 (Figura 5.5(b)) é gerado e refletido na interação com defeito, a concentração das frequências sobre a curva fundamental que representa o modo concorda com esta afirmação. Quando está sobre a face B o modo de flexão em torno do eixo 3 (Figura 5.5(c)) é gerado e refletido, podendo ser vistas as maiores magnitudes na região da linha fundamental que representa este modo de propagação da onda.



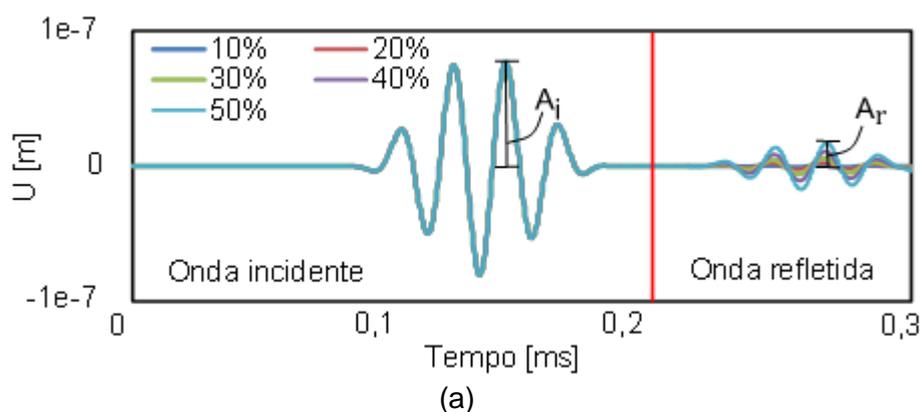


(c)

Figura 5.5: FFT2d para guias de ondas (a) sem defeito, (b) defeito A (c) defeito B.

A geração destes outros modos de vibração é esperada. Isto é devido à geometria dos defeitos 1 e 2, onde ao chegar a onda longitudinal, cria-se um momento fletor, fazendo com que uma onda transversal retorne juntamente com a onda longitudinal refletida.

Dimensão dos defeitos: Para as simulações 5 a 29 demonstradas na Tabela A.1 do Apêndice A, foram calculados os coeficientes de reflexão (relação entre a amplitude do sinal e a amplitude da onda refletida). A Figura 5.6 sobrepõe as respostas no tempo para o ponto central da linha de coleta de dados para a frequência de 50kHz. Percebe-se que as ondas refletidas aumentam de amplitude conforme é aumentada a profundidade relativa dos defeitos, indicando dependência direta entre tamanho do defeito e onda refletida e são vistas também as ondas no guia para um instante de tempo antes da interação com o defeito e após a interação, observa-se as ondas refletidas retornando em dois modos distintos separados por suas diferentes velocidades de propagação. A relação entre o coeficiente de reflexão e a profundidade relativa do defeito é demonstrada na Figura 5.7, onde são comparados os diferentes valores calculados para as 5 frequências diferentes. Percebe-se que a relação é aparentemente exponencial, diferentemente dos resultados obtidos por Demma et al, em que para a mesma faixa de profundidade relativa a relação era aproximadamente linear. Fazendo um ajuste de curva para os pontos de uma frequência, pode ser calculada uma equação que para ser utilizada em uma inspeção por ondas guiadas deste tipo de geometria. Então poderia ser calculada a profundidade do defeito através da aferição da onda refletida e utilização da equação 5.3.



(a)

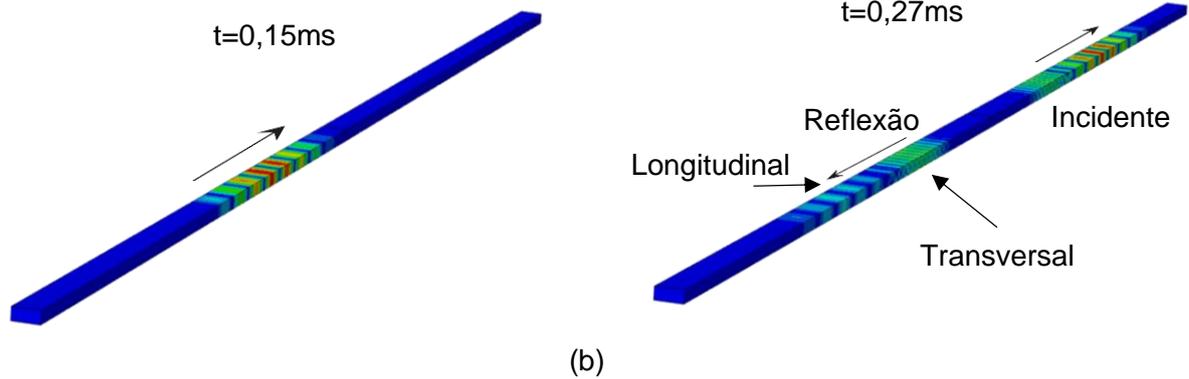


Figura 5.6: (a) Deslocamentos para o ponto central no tempo comparando onda incidente com onda refletida para 5 tamanhos de defeito diferente e (b) guia de ondas vistos para $t=0,15\text{ms}$ e $t=0,27\text{ms}$, antes e após interação com o defeito.

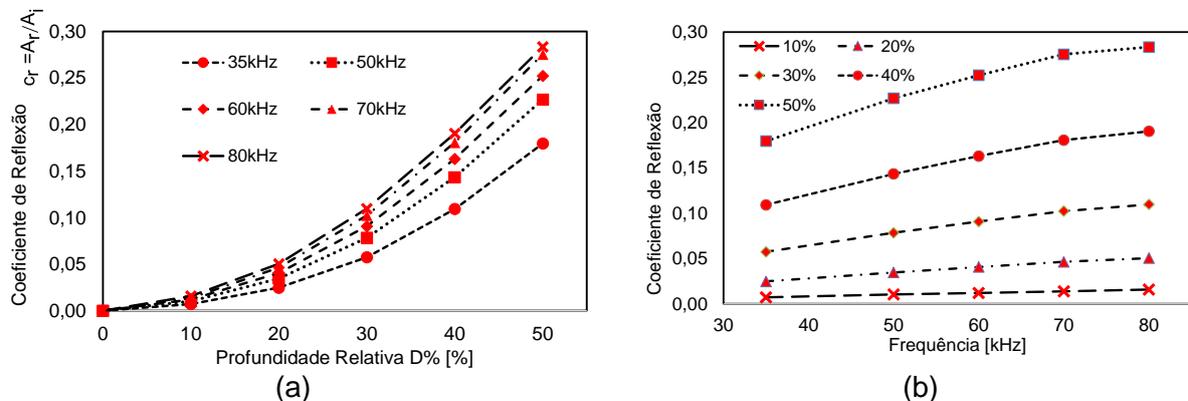


Figura 5.7: (a) Comparação entre a evolução da relação entre profundidade relativa e os coeficientes de reflexão calculados nos modelos para 5 frequências distintas. (b) Coeficiente de reflexão em relação à frequência de excitação.

Destaca-se uma relação entre a frequência de excitação e o aumento da amplitude da onda refletida, que com o uso de frequências de excitação maiores, para um mesmo tamanho de defeito, retorna ondas de amplitude maior, ou seja, frequências mais elevadas são mais sensíveis a defeitos. Observa-se também que as curvas de coeficiente de reflexão se mantêm aproximadamente paralelas, mesmo com mudanças na frequência de excitação ou no tamanho dos defeitos, variando proporcionalmente junto com a mudança dos parâmetros.

Mesmo não sendo linear, esta relação permite o uso de ondas guiadas em ENDs. Com isso é proposta a equação 5.3 relacionando o coeficiente de reflexão com a profundidade dos defeitos para a frequências trabalhadas.

$$d = at \left(\frac{A_r}{A_i} \right)^b \quad (5.3)$$

Onde d é a profundidade do defeito em milímetros, t é a espessura da haste em milímetros, A_r é a amplitude da onda refletida, A_i é a amplitude da onda incidente e a e b são constantes obtidas no ajuste de curvas, descritas para as frequências trabalhadas na Tabela B.1 do apêndice B. A Figura B.1 do apêndice B mostra estas relações sobrepostas aos pontos calculados.

6 CONCLUSÃO

O presente trabalho estudou a interação de um modo fundamental não dispersivo de onda guiada. Sendo testadas diferentes dimensões de uma geometria específica de defeitos para uma

haste de aço com seção transversal retangular. Foi elaborado um modelo de elementos finitos que foi validado por resultados experimentais realizado por outros autores.

Dois tipos de modelos principais foram elaborados, sendo o primeiro uma haste sem defeitos e o outro com defeitos orientados de duas maneiras diferentes. Após foi variada a profundidade dos mesmos, onde foi possível uma função de ajuste que relaciona a magnitude da onda refletida e incidente com a magnitude do defeito. Também se realizou um estudo paramétrico do coeficiente de reflexão com profundidade relativa do defeito para diferentes frequências de excitação.

De maneira geral constatou-se uma relação exponencial entre profundidade relativa do defeito e coeficiente de reflexão. Notou-se também que maiores frequências de excitação interagem mais com um mesmo defeito na forma de uma amplitude de reflexão da onda maior. Também que outros modos são gerados dependendo da orientação do defeito.

Como trabalhos futuros é sugerido explorar em forma intensiva outros tipos de defeitos. Também seria interessante estudar outros parâmetros como a extensão axial do defeito em relação ao comprimento de onda, largura do defeito em relação a largura do guia de ondas, e outras geometrias características de outros tipos de defeito também podem ser estudadas. Também poderiam ser feitas validações experimentais em barras com defeitos e realizados estudos que levem em consideração a atenuação intrínseca do material, que para longas distâncias torna-se relevante.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abaqus (2014) “**ABAQUS Documentation**”, Dassault Systèmes, Providence, RI, USA.

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

Bathe K.J; Wilson E.L.; “**Numerical Methods in Finite Element Analysis**”, 2nd Edition, 2014.

Corrêa, L. A.; “**Obtenção de curvas de dispersão através do método semi-analítico de elementos finitos**”, Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011

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.

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

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.

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.

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

Apêndice A

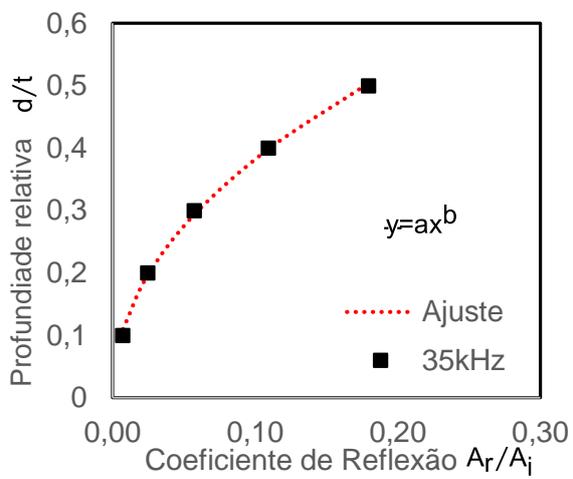
Resumo dos modelos simulados.

Tabela A.1: Detalhes dos modelos simulados.

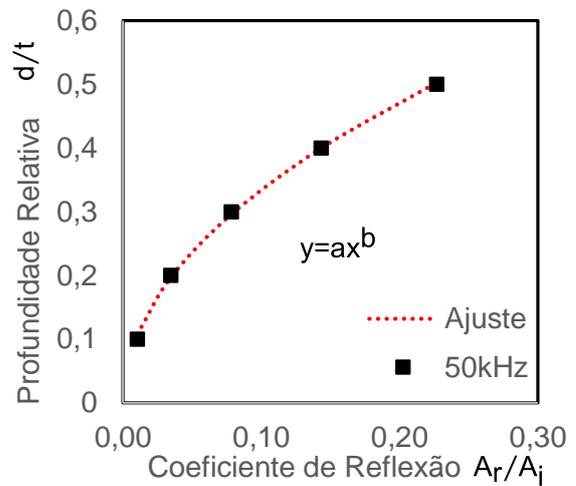
Nº	Modo excitado	Frequência [kHz]	D% [%]	Face
1	L	50	Sem defeito	-
2	F(2)	50	Sem defeito	-
3	F(3) e T	50	Sem defeito	-
4	L	50	10	B
5	L	50	50	A
6	L	50	10	A
7	L	50	20	A
8	L	50	30	A
9	L	50	40	A
10	L	35	10	A
11	L	35	20	A
12	L	35	30	A
13	L	35	40	A
14	L	35	50	A
15	L	60	10	A
16	L	60	20	A
17	L	60	30	A
18	L	60	40	A
19	L	60	50	A
20	L	70	10	A
21	L	70	20	A
22	L	70	30	A
23	L	70	40	A
24	L	70	50	A
25	L	80	10	A
26	L	80	20	A
27	L	80	30	A
28	L	80	40	A
29	L	80	50	A

Apêndice B

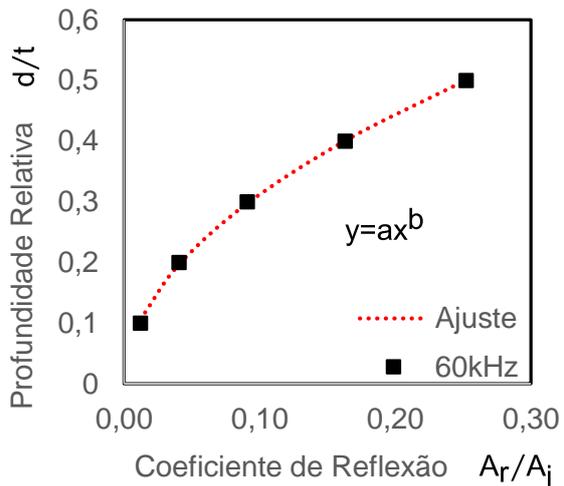
Curvas ajustadas para equação 5.3.



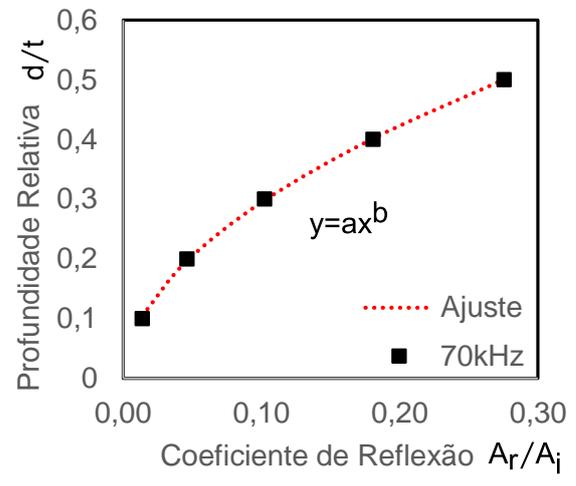
(a)



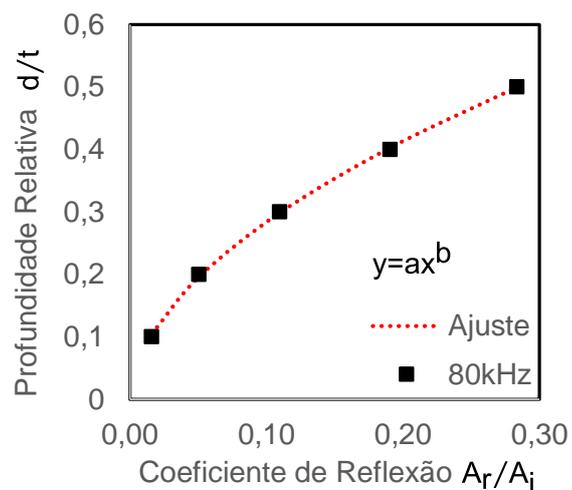
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura B.1: Ajuste para coeficiente de reflexão e profundidade relativa para (a) 35, (b) 50, (c) 60, (d) 70 e (e) 80 kHz.

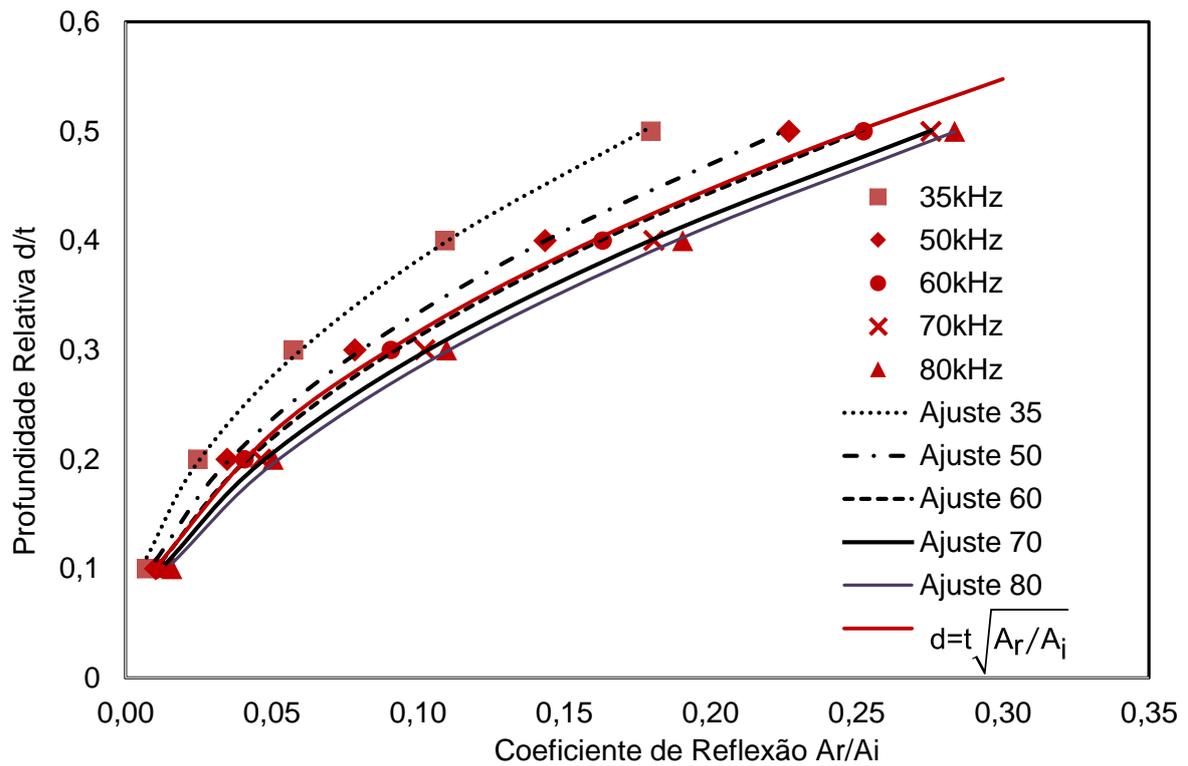


Figura B.2: Sobreposição dos ajustes juntamente com uma curva de raiz quadrada

Tabela B.1: Coeficientes ajustados para cada frequência e erro para os dados obtidos.

Frequência [kHz]	a	b	Erro R^2
35	1,13509	0,47301	0,99836
50	1,05187	0,49826	0,99912
60	1,01255	0,51094	0,99507
70	0,98191	0,52291	0,99645
80	0,98908	0,54208	0,99954