

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

ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE CURVAS DE DISPERSÃO DE ONDAS-GUIADAS EM
ESTRUTURAS DE SEÇÃO TRANSVERSAL COM EIXOS DE SIMETRIA

por

Angelo Saorin Filho

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 2018.



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

ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE CURVAS DE DISPERSÃO DE ONDAS-GUIADAS EM
ESTRUTURAS DE SEÇÃO TRANSVERSAL COM EIXOS DE SIMETRIA

por

Angelo Saorin Filho

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^a. Thamy Cristina Hayashi
Coordenadora do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Mecânica dos Sólidos**

Orientador: Prof. Dr. Ignacio Iturrioz

Co-Orientador: Ms. Eduardo Groth

Comissão de Avaliação:

Prof. Ignacio Iturrioz

Prof. Juan Pablo Raggio Quintas

Prof. Walter Jesus Paucar Casas

Porto Alegre, Junho de 2018.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente meu orientador Ignácio, não só pela grande ajuda neste trabalho, mas também pelos ensinamentos transmitidos durante a faculdade, que foram fundamentais para minha formação como engenheiro mecânico. Ao meu co-orientador Eduardo e ao Boris, pelo constante apoio e disponibilidade que ajudaram na confecção deste trabalho. Agradeço também ao Paulo Menin, pela sua participação na banca de avaliação deste trabalho e pela ajuda fornecida.

Agradeço também aos meus amigos, tanto de Palotina quanto de Porto Alegre pelo suporte, à Brianna pelo apoio mesmo estando longe e principalmente à minha família, que durante todos estes anos me apoiou de todas as maneiras possíveis incondicionalmente.

SAORIN FILHO, A., **Estudo do Comportamento de Curvas de Dispersão de Ondas-Guiadas em Estruturas de Seção Transversal com Eixos de Simetria**. 2018. 17p. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

Este trabalho foi enviado ao XII Congresso Argentino de Mecânica Computacional (MECON/ENIEF 2018) e será apresentado em Tucumán em novembro de 2018.

RESUMO

O estudo da propagação de ondas em sólidos apresenta diversas aplicações na área de engenharia estrutural, entre elas, destaca-se a determinação de defeitos através de ensaios não destrutivos. No caso de estruturas em que pelo menos uma das dimensões é muito maior que as outras duas, existe um tipo particular de onda propagante chamada de onda guiada. O estudo dos tipos de ondas que se propagam em um sólido depende das particularidades da dimensão finita do guia de onda, ou seja, sua seção transversal. O estudo destas particularidades é fundamental para a identificação da frequência e do comprimento de onda que deve ser excitado na estrutura para possibilitar a exploração de seu domínio espacial na procura de defeitos potenciais específicos, como trincas ou corrosão. Neste contexto, o presente trabalho apresenta um estudo de perfis que apresentam um ou mais eixos de simetria, como o caso do duto quadrado e diferentes perfis poligonais. Como ferramenta fundamental deste estudo serão confeccionadas curvas de dispersão dos perfis em estudo, possibilitando a identificação das frequências e comprimentos de onda que se propagam. Ao simular um perfil do tipo tubo quadrado, o mesmo é comparado com perfis que são partes deste perfil alvo completo, como o perfil do tipo U e do tipo L, utilizando condições simétricas e antissimétricas em busca de reproduzir o perfil alvo original de duto quadrado. É apresentada também a viabilidade do método de sobreposição de perfis para a obtenção de um perfil completo, resultando em um decréscimo de 30% a 40% no tempo computacional de confecção das curvas de dispersão. Também é estudada a variação das curvas de dispersão com a mudança de seção passando de um duto quadrado, por cinco polígonos com quantidade de lados crescente. Estes resultados são comparados com a curva de dispersão de um tubo circular o qual tem solução analítica. Discussões sobre os resultados obtidos e sobre o comportamento dos perfis estudados são apresentadas.

PALAVRAS-CHAVE: curvas de dispersão, ondas guiadas, simetria axial.

SAORIN FILHO, A., **A Study of the behavior of dispersion curves for guided waves in profiles with axisymmetric cross section.** 2018. 17p. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

ABSTRACT

The understanding of wave propagation in solid structures is very useful for several non-destructive testing methods (NDT), including structural health monitoring. Geometries in which at least one of the dimensions is sufficiently larger than the others have a particular case of wave propagation, known as guided waves. Guided waves are strongly dependent on the geometry's cross-section: the wave-guide's finite dimension. Understanding both how the geometry behaves and its particularities is essential before using a NDT method, like guided wave propagation, in order to isolate the exact frequency and wave number needed to monitor the structure for defects, such as cracks or corrosion. The present study focuses on the following: calculating the dispersion curves for geometries with one or more symmetry axes, including a square tube and several polygon-shaped tubes; identifying the frequencies and wave numbers for several points; and analyzing how the waves propagate. The results for the square tube will be superimposed on the dispersion curves of U-shaped and L-shaped profiles. Different boundary conditions will be used in order to simulate the original square-shaped profile with a decrease of around 30% to 40% in computation time to create the dispersion curves. Finally, the behavior of the dispersion curves will be analyzed while changing the geometry's profile. The profile will begin as a square and continue with an increasing number of sides. The final results will be compared to guided wave propagation in a circular tube, which has an analytical solution for its dispersion curves..

KEYWORDS: dispersion curves, guided waves, axisymmetric.

ÍNDICE

	Pág.
1. INTRODUÇÃO	1
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	2
2.1 Ondas em meio infinito.....	2
2.2 Atenuação de Ondas Mecânicas.....	4
2.3 Reflexão e transmissão de ondas mecânicas.....	4
2.4 Ondas guiadas em placas	5
2.5 Ondas Mecânicas em hastes semi-infinitas.....	6
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
4. METODOLOGIA.....	7
4.1 Método Axissimétrico	8
5. APLICAÇÕES.....	9
5.1 Perfil duto quadrado obtido a partir dos perfis U e L com condições de contorno adequadas.....	9
5.1.1 Curvas de dispersão para o duto quadrado.....	9
5.1.2 Geração das curvas de dispersão do duto quadrado através da superposição das curvas de dispersão de perfis U com condições de contorno específicas.....	12
5.1.3 Geração das curvas de dispersão do duto quadrado através da superposição das curvas de dispersão de perfis L com condições de contorno específicas.	13
5.1.4 Análise do comportamento das curvas de dispersão com a variação do perfil transversal do guia.	14
6. CONCLUSÕES	14
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	15
APÊNDICE A	16
APÊNDICE B	17

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1 – Diferença de regiões inspecionadas entre ensaios de ultrassom por ondas guiadas. a) Método de ondas guiadas. b) Método convencional por ultrassom. [Adaptado de UltraSonic Guided Wave, 2018]	1
Figura 2.1 – a) Ondas longitudinais P , onde a energia é transmitida através de um movimento de tração e compressão. b) Ondas transversais S . [Adaptado de Braile, 2018]	3
Figura 2.2 – Reflexão total de uma onda mecânica com fronteira livre. [Groth, 2016]	5
Figura 2.3 – (a) Placa de alumínio. (b) Barra quadrada de aço.	6
Figura 3.1 – Método axissimétrico. (a) Princípio básico de um modelo de malha 2D. (b) Modelo aproximado pelo método axissimétrico. [Adaptado de Wilcox et al., 2002]	7
Figura 4.1 – Curvas de dispersão geradas para uma barra de aço de 30 mm por 1 mm. [Adaptado de Cegla, 2008]	8
Figura 5.1 – Perfis simulados livres e com condições de contorno apropriadas.	9
Figura 5.2 – Curvas de dispersão de um duto quadrado. Região analisada: f : 0; 40 kHz, K : 0; 44 kHz (80 modos).	10
Figura 5.3 – Curvas de dispersão de um duto quadrado para domínio $[f, K]$ reduzido. Região analisada: f : 0; 2 kHz, K : 0; 5 rad/m.	10
Figura 5.4 – Deslocamentos em metros para número de onda $K = 1.25$ rad/m. a) Torção, b) Flexão.	11
Figura 5.5 – Curvas de dispersão para perfil U com diferentes condições de contorno.	12
Figura 5.6 – Sobreposição das curvas do perfil U com o duto quadrado.	12
Figura 5.7 – Curvas de dispersão para diferentes condições de contorno do perfil L.	13
Figura 5.8 – Sobreposição dos resultados do perfil L com o duto quadrado.	13
Figura 5.9 – Seções transversais estudadas. Dimensão característica igual a 0.2 m e espessura de 0.01 m para todos os casos.	14
Figura A.1 – Curva de dispersão de um duto quadrado com marcações dos pontos estudados.	16
Figura A.2 – Deslocamentos em metros nas direções x, y e z de um duto quadrado para $K = 1.25$ rad/m e para $K = 2.5$ rad/m.	16
Figura B.1 – Curvas de dispersão de um tubo, comparadas com um quadrado e hexágono.	17
Figura B.2 – Comparação entre tubo e octógono, decágono e tetradecágono.	17

LISTA DE SÍMBOLOS

f	Frequência	[Hz]
K	Número de Onda	[rad/m]
ω	Frequência angular	[rad/s]
λ	Comprimento de onda	[m]
u	Deslocamento	[m]
t	Tempo	[s]
c_o	Velocidade de propagação	[m/s]
c	Velocidade de fase	[m/s]
A	Amplitude	[m]
x	Posição	[m]
σ	Tensão	[Pa]
λ_L	Constante de Lamé	[Pa]
μ	Constante de Lamé	[Pa]
ε	Deformação	[adim]
E	Módulo de elasticidade longitudinal	[Pa]
ν	Constante de Poison	[adim]
c_p	Velocidade da onda dilatacional	[m/s]
c_s	Velocidade da onda equivoluminal	[m/s]
ρ	Massa específica	[kg/m ³]
c_T	Velocidade da onda torcional	[m/s]
G	Módulo de elasticidade transversal	[Pa]
J	Módulo torcional	[m ⁴]
I_o	Momento de inércia polar	[m ⁴]
θ_i	Ângulo de incidência	[rad]
θ_{rt}	Ângulo de reflexão da onda transversal	[rad]
θ_{rl}	Ângulo de reflexão da onda longitudinal	[rad]
h	Espessura	[m]

1. INTRODUÇÃO

O estudo da interação de ondas em materiais sólidos é de grande importância em vários campos da engenharia, tendo resultado em grandes avanços tecnológicos. Como exemplo é possível citar as aplicações em medicina, onde são utilizados desde os simples estetoscópios até as complexas máquinas de ultrassonografia, na física e na engenharia, onde o mercado ligado a este setor cresce constantemente. O ramo da acústica, essencial para a área de ensaios não destrutivos (END), se apoia nos fenômenos relacionados com a propagação de ondas, e as primeiras observações e experiências conhecidas sobre este assunto datam de 2500 anos a.C., época em que foram fabricadas as primeiras peças de estanho puro e o “grito do estanho” era um fenômeno de curiosidade e interesse [Palacios, 2004]. Nas últimas décadas o estudo da propagação de ondas em materiais observou um significativo incremento no número de pesquisas, influenciado fortemente pelo rápido avanço no poder computacional atualmente disponível.

Estruturas de aço, comuns em projetos de engenharia, exigem um cuidado especial não somente em seu projeto e comissionamento, mas também em sua manutenção durante sua vida útil. Métodos baratos, rápidos e eficientes que possibilitam uma inspeção para detecção de falhas baseados na propagação de ondas são a saída para a adequação aos padrões de qualidade e segurança que são cada vez mais rígidos em estruturas que, caso apresentem falha inesperada, podem colocar em risco perdas humanas, econômicas e problemas ambientais. Sendo assim, o método de ondas guiadas ultrassônicas se destaca entre os tradicionais métodos de END para a inspeção de estruturas de aço. Esta técnica pode ser utilizada em estruturas que possuam pelo menos uma das dimensões significativamente maior que as outras duas, como em tubos de diferentes seções transversais, cabos e trilhos de trem. Este método tem se mostrado extremamente útil devido à sua capacidade de propagação por longas distâncias nas estruturas a partir de um único ponto de acesso, eliminando a necessidade de inspeção ponto a ponto, como é o caso do ensaio por ultrassom convencional [Rose, 2014]. Esta diferença se ilustra na figura 1.1 a seguir apresentada, onde no método de ondas guiadas o perfil é tratado como um guia de ondas modais e o método convencional o trata como um espaço semi-infinito.

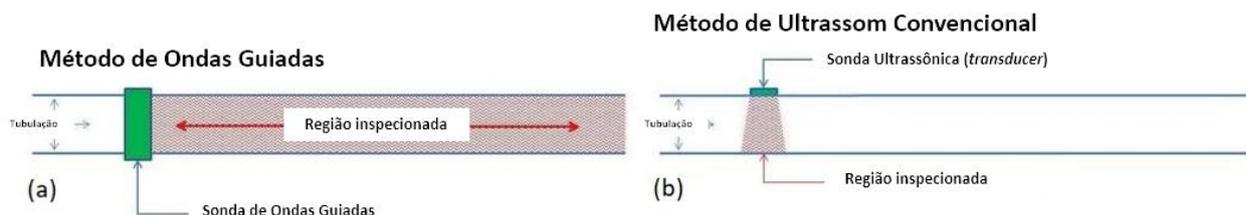


Figura 1.1 – Diferença de regiões inspecionadas entre ensaios de ultrassom por ondas guiadas. a) Método de ondas guiadas. b) Método convencional por ultrassom. [Adaptado de UltraSonic Guided Wave, 2018]

Para poder propor metodologias de detecção de danos em estruturas específicas e interessantes do ponto de vista prático, é fundamental conhecer os tipos de onda que se propagam nas mesmas. A ferramenta utilizada para realizar este estudo são as chamadas curvas de dispersão, que consistem em um mapa que depende das características geométricas e mecânicas da estrutura em análise e que, geralmente, estabelece também os tipos de ondas modais que se propagam na estrutura no domínio de frequência x número de onda (o inverso do comprimento de onda).

Diversos métodos são utilizados para determinar as curvas de dispersão, alguns métodos analíticos são aplicáveis apenas para geometrias simples, outros métodos híbridos misturam soluções analíticas com métodos de elementos finitos, caracterizados por sua sigla em inglês *SAFE (Semi Analytical Finite Element)*. Uma referência sobre o desenvolvimento do método citado encontra-se no estudo de Groth et al., 2018. Desta forma, é possível apresentar os objetivos do presente trabalho.

Como **Objetivo Geral** considera-se:

- Explorar os tipos de ondas propagantes em perfis com eixos de simetria utilizando como ferramenta as curvas de dispersão e os deslocamentos para cada ponto com o uso do método SAFE axissimétrico.

Como **Objetivos Específicos**, consideram-se:

- Entender a forma como um perfil do tipo duto quadrado funciona como um guia de ondas no domínio $[f, K]$ estudado.
- Explorar a possibilidade de obter, a partir de perfis do tipo L e U com condições de simetria e antissimetria, as curvas de dispersão de um duto quadrado.
- Determinar a transição das curvas de dispersão entre um duto quadrado e um tubo circular.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Ondas acústicas (ou elásticas) são excitações em um meio deformável fluido ou sólido que se propagam de partícula a partícula, não podendo existir no vácuo [Potel et al., 2009]. Para fins de engenharia o meio considerado é contínuo, ou seja, não serão levadas em conta as interações à nível atômico ou molecular e as suas propriedades, como massa específica ou constante elástica, são uma média dos valores microscópicos.

A maior parte das equações utilizadas no ramo da acústica é derivada da equação da onda, equação 2.1, que é uma equação diferencial parcial hiperbólica e suas soluções descrevem a propagação de excitações à uma velocidade constante em uma ou mais direções. *D’Alambert*, em 1746, propôs a solução da equação 2.1 para a propagação de ondas em uma dimensão sem distorções ou perdas, que ao ser aplicada para o caso particular de excitações harmônicas tem seu comportamento descrito pela equação 2.2, onde A é a amplitude, K é o número de onda, x a posição, c_o a velocidade de propagação definida como a relação entre a frequência e o número de onda da propagação, t o tempo, u o deslocamento e ∇ o operador diferencial espacial [Idzi, 2017].

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \nabla^2 u \quad (2.1)$$

$$u(x, t) = A \cos(Kx - \omega t) = A \cos K(x - c_o t) \quad (2.2)$$

2.1 Ondas em meio infinito

Ao assumir um meio contínuo em que o material estudado é composto por uma série de massas discretas conectadas por molas, considera-se que toda excitação aplicada ao sistema é logo transmitida para as demais, de modo a propagar esta energia através do meio e que os parâmetros elásticos e de massa são distribuídos em termos de massa específica e módulo elástico [Graff, 1975]. Em um meio considerado infinito, as ondas mecânicas podem ser divididas em duas grandes categorias, ondas longitudinais, conhecidas como ondas P (*primary*) e ondas transversais, conhecidas como ondas S (*secondary*) mostradas na figura 2.1.

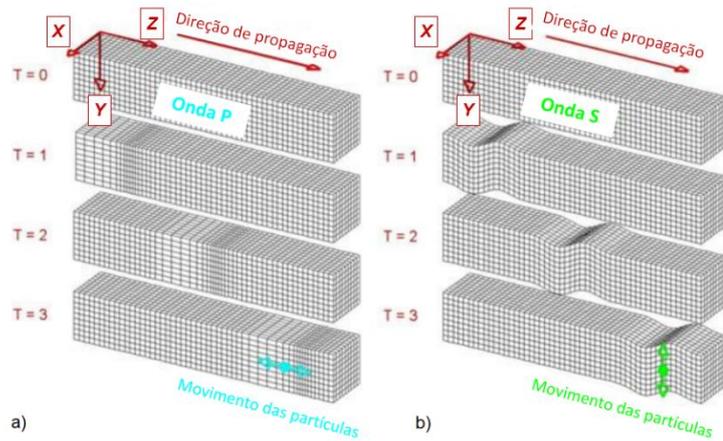


Figura 2.1 – a) Ondas longitudinais P , onde a energia é transmitida através de um movimento de tração e compressão. b) Ondas transversais S . [Adaptado de Braile, 2018]

As ondas da figura 2.1 são descritas matematicamente utilizando a equação de equilíbrio, equação 2.3, que relaciona os deslocamentos u_i de um material de massa específica ρ , com o campo de tensões dado pelo tensor σ_{ij} . Utilizando a relação constitutiva linear elástica apresentada na equação 2.4 e a relação entre os deslocamentos e deformações infinitesimais dada pela equação 2.5, chega-se à equação de Navier, 2.6.

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_i} = \rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} \quad (2.3)$$

$$\sigma_{ij} = \lambda_L \delta_{ij} \varepsilon_{kk} + 2\mu \varepsilon_{ij} \quad (2.4)$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.5)$$

$$(\lambda_L + \mu) \frac{\partial^2 u_j}{\partial x_i \partial x_j} + \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} = \rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} \quad (2.6)$$

Derivando a equação 2.6 em relação a x_i , somando as três direções e comparando com o resultado da equação da onda de *D'Alembert*, é possível deduzir que a velocidade de propagação dilatacional (onda P) de uma onda em um sólido é dada pela eq. 2.7. Analogamente, derivando a equação 2.6 com $i = 2$ em relação a x_3 e vice-versa, subtraindo as duas equações resultantes e comparando com a *solução de D'Alembert*, a velocidade de propagação equivolumial (onda S) de uma onda em um sólido é dada pela equação 2.8 [Groth, 2016].

$$c_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2.7)$$

$$c_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (2.8)$$

As equações 2.7 e 2.8 mostram a velocidade de propagação das ondas P e S para um corpo elástico linear, homogêneo e isotrópico, onde λ e μ são as constantes de *Lamé* e E o módulo de elasticidade para o material..

Caso a estrutura seja submetida a uma torção, a mesma sofrerá esforços axiais. Este tipo de carregamento tem alta dependência com a geometria da seção transversal, onde o caso mais simples é para uma seção circular por não apresentar empenamento de sua seção. A velocidade de propagação desta onda é dada pela expressão 2.9 [Groth, 2016], onde G representa o módulo de elasticidade transversal, J representa o módulo torcional, neste caso dado pela expressão derivada da analogia de membrana [Rose, 2014] e I_0 representa o momento de inercia polar.

$$c_T = \sqrt{\frac{GJ}{\rho I_0}}, \quad (2.9)$$

2.2 Atenuação de Ondas Mecânicas

Ondas mecânicas viajando por um meio sólido podem sofrer diversos tipos de atenuação, como a atenuação geométrica, na qual a frente de onda, ao se espalhar pela estrutura, tem um aumento em sua área que faz com que sua amplitude diminua devido à redistribuição de energia nesta área crescente, lembrando que para frentes de onda planas em que sua área frontal é constante este tipo de dispersão não ocorre. Existe também a atenuação por mecanismos de dissipação de energia não-conservativos, como a perda de energia por calor.

Outro tipo de atenuação muito importante para o estudo de ondas guiadas ultrassônicas é a atenuação por dispersão, que ocorre em estruturas que apresentam no mínimo uma dimensão na ordem do comprimento de onda e é causada pela dependência da velocidade de propagação da onda com sua frequência. Caso exista uma perturbação em uma estrutura que possa ser um guia de ondas, esta será decomposta em perturbações harmônicas, que irão se propagar com diferentes velocidades e com amplitudes menores com o passar do tempo.

O efeito global percebido pelo fenômeno de dispersão é a diminuição da amplitude da onda a medida que a mesma se espalha. Este fenômeno é evidenciado pelas curvas de dispersão, que variam conforme a geometria e o material do elemento estudado. Estas curvas de dispersão dependem fortemente da geometria e contemplam todos os possíveis modos de propagação de ondas para os pares $[f, K]$, ou seja, uma excitação aplicada em uma geometria vai, necessariamente, se decompor em combinações de ondas modais representadas nas curvas de dispersão. Por este motivo, o conhecimento destas curvas é essencial para o entendimento do fenômeno de ondas guiadas pois possibilita o uso desse efeito para fins práticos e, mais ainda, permite obter proveito das particularidades dos diferentes tipos de ondas que podem propagar na estrutura estudada. Ao conhecer o comportamento e o significado das curvas de dispersão de um perfil, é possível entender por qual região do guia de ondas a onda viaja, ou seja, um pesquisador interessado em detectar defeitos na parte externa de, por exemplo, um duto de uma tubulação de petróleo, irá primeiro estudar a curva de dispersão da geometria de interesse, detectar qual é o modo que melhor se propaga na região espacial onde se deseja detectar os defeitos e excitar a estrutura com uma onda que seja governada pelo modo de interesse. Na figura 4.1 se apresentam as curvas de dispersão para uma seção prismática.

2.3 Reflexão e transmissão de ondas mecânicas.

Uma onda mecânica viajando em um sólido, considerando que este está imerso em vácuo, (meio não-propagante de ondas mecânicas), sofrerá somente reflexão, sem transmissão, sendo esta uma boa aproximação para um sólido imerso em ar. A reflexão de ondas mecânicas segue a *Lei de Snell-Descartes* que teve sua solução desenvolvida para a luz, porém é aplicável também para ondas elásticas. Uma onda mecânica viajando em um sólido, ao colidir com sua fronteira, obrigatoriamente irá se decompor em uma onda longitudinal (P) e transversal (S), independentemente da onda original ser uma mistura destas duas, puramente longitudinal ou puramente transversal, conforme fig. 2.2. O ângulo de reflexão destas duas ondas é função do ângulo de incidência onde c_p e c_s são as velocidades de propagação das ondas longitudinais e transversais, θ_{rl} e θ_{rt} os ângulos de reflexão e θ_i o ângulo de incidência respectivamente, conforme as equações 2.10 e 2.11 e a figura 2.2.

$$\frac{\text{sen}\theta_{rl}}{c_p} = \frac{\text{sen}\theta_i}{c_s} \quad (2.10)$$

$$\frac{\text{sen}\theta_{rt}}{c_s} = \frac{\text{sen}\theta_i}{c_p} \quad (2.11)$$

Seguindo este raciocínio, é intuitivo pensar que uma onda que se propaga em um sólido, após poucas interações com a fronteira terá gerado um número muito grande de novas ondas, porém, percebe-se que após um certo tempo de propagação transiente, muitas delas irão se sobrepor destrutivamente e o resultado final da propagação destas ondas geram os modos de propagação propriamente ditos.

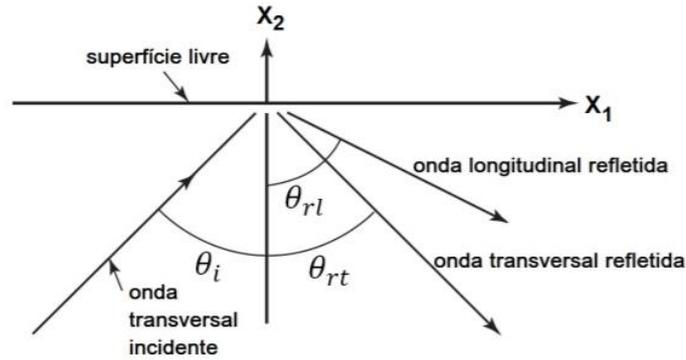


Figura 2.2 – Reflexão total de uma onda mecânica com fronteira livre. [Groth, 2016]

2.4 Ondas guiadas em placas

Estruturas tipo placas são a seguir utilizadas para introduzir o conceito de ondas guiadas pois suas curvas de dispersão podem ser calculadas analiticamente. As ondas que viajam em estruturas que podem ser consideradas como placas, onde uma dimensão é muito menor que as outras duas, apresentam diversas formas de propagação. Além das ondas *P* e *S* mencionadas anteriormente, também surgem as ondas de *Rayleigh*, *Lamb*, *Stonely* e *Love*. As ondas de *Stonely* e *Love* são estudadas em mais detalhe pela área de sismologia e não são relevantes para o uso de detecção de defeitos por ondas guiadas ultrassônicas.

As ondas de *Rayleigh* e *Lamb* são as mais importantes no método de ondas guiadas, a primeira viaja pela superfície do sólido e apresenta amplitude relativamente maior e velocidade de propagação menor, sendo útil para a inspeção de defeitos na superfície dos materiais. As ondas de *Lamb* surgem devido ao acoplamento das ondas longitudinais e transversais e apesar de apresentarem caráter dispersivo, o que pode levar a dificuldades na interpretação dos sinais obtidos em situações práticas, são as ondas mais usadas para a detecção de defeitos em guias de ondas. Durante o século XIX, *Rayleigh* e *Lamb* desenvolveram as equações de *Rayleigh-Lamb*, que governam a propagação de ondas oblíquas em uma placa de espessura h [Auld, 1990], estas equações apresentam todas as possibilidades dos modos propagadores de ondas, evidenciadas pelas equações abaixo.

$$p^2 = \frac{\omega^2}{c_p^2} - K^2 \quad (2.12)$$

$$q^2 = \frac{\omega^2}{c_s^2} - K^2 \quad (2.13)$$

$$\frac{\tan(qh)}{\tan(ph)} = -\frac{4K^2pq}{(q^2 - K^2)^2} \quad (2.14)$$

$$\frac{\tan(qh)}{\tan(ph)} = -\frac{(q^2 - K^2)^2}{4K^2pq} \quad (2.15)$$

A equação 2.14 representa os modos de propagação simétricos, *S*, e a equação 2.15 os modos antissimétricos, *A*, das ondas em placas sólidas. Onde c_p representa a velocidade de propagação da onda *P*, c_s a velocidade da onda *S*, λ o comprimento de onda, ω a frequência angular e f a frequência, relacionadas pelas equações 2.16 e 2.17.

$$K = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (2.16)$$

$$\omega = 2\pi f \quad (2.17)$$

As curvas de dispersão para uma placa são apresentadas em termos de velocidade de propagação x frequência na figura 2.3a. É importante também lembrar que as ondas guiadas apresentam um número infinito de modos de propagação.

2.5 Ondas Mecânicas em hastes semi-infinitas

Paradoxalmente a modelagem de ondas guiadas em estruturas com uma dimensão infinita, ou 1D como é o caso das hastes, é mais complicada que a modelagem de estruturas com duas dimensões infinitas como nas placas [Wilcox et al, 2002]. As equações de *Rayleigh-Lamb* apresentadas anteriormente podem ser resolvidas analiticamente apenas para placas ou tubos, para outras geometrias é necessário o auxílio de simulações numéricas que combinam soluções analíticas com o método de elementos finitos (métodos SAFE).

As estruturas semi-infinitas são, muitas vezes, chamadas pelo nome de guia de ondas devido ao fenômeno de dispersão e reflexão mencionado anteriormente, onde a estrutura se comporta como um guia para as ondas mecânicas. A figura 2.3 compara as curvas de velocidade de fase e frequência para dois casos distintos, uma placa de alumínio e uma barra quadrada de aço. Ao analisar os dois resultados é possível observar a maior complexidade obtida à medida que é inserida mais uma dimensão finita ao problema. Os modos A_n e S_n representam, respectivamente, os modos assimétricos e simétricos comentados na seção anterior.

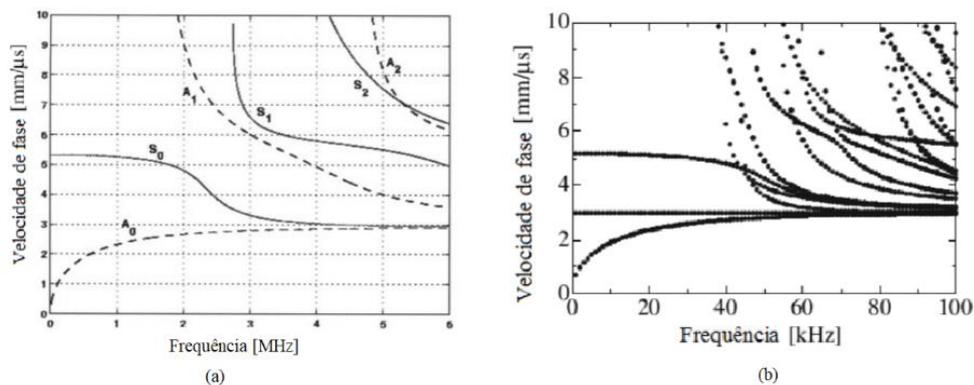


Figura 2.3 – (a) Placa de alumínio. (b) Barra quadrada de aço.

Diversos métodos já foram estudados para o cálculo numérico das curvas de dispersão em geometrias com apenas uma dimensão infinita. Para modelar como uma onda se propaga nestes sólidos, é necessário refinar não somente a dimensão espacial, utilizando uma malha com elevado número de elementos em *softwares* numéricos, como também o tempo, visto que a análise da propagação de ondas mecânicas depende de intervalos de tempo muito pequenos. Para contornar o problema imposto pela necessidade de uma alta discretização destas duas dimensões, o cálculo de curvas de dispersão para este tipo de geometria utiliza a metodologia SAFE.

As curvas de dispersão são gráficos que contém uma grande quantidade de informações úteis para END's. A simples observação da quantidade e disposição dos modos presentes em determinado intervalo de frequência permite inferir características da seção transversal do guia de ondas, além das informações indispensáveis, como velocidade de propagação e dispersão que essa coleção de curvas oferece. O desenvolvimento de técnicas que utilizam o fenômeno da propagação de ondas guiadas tem estreita relação com a confecção e a correta interpretação das curvas de dispersão do guia de ondas. Por este motivo, diversos pesquisadores se dedicam a desenvolver novas e eficientes maneiras de calcular as curvas de dispersão e nesse contexto está inserido o principal objetivo deste trabalho.

A metodologia SAFE é baseada na combinação de soluções analíticas para a direção de propagação das ondas e soluções numéricas discretizadas para a seção transversal da geometria em análise. Desta maneira, é possível obter um problema de valores próprios que pode ser resolvido utilizando métodos de autovalores e autovetores. Esta metodologia reduz drasticamente o custo computacional para simulações de guias de ondas com seções não triviais.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A teoria de como as ondas de Lamb se comportam em materiais sólidos e sua utilização para a detecção de falhas em estruturas vem sendo estudada desde os anos 60, como observado no livro de Viktorov, *Rayleigh and Lamb waves: physical theory and applications*, 1967, no qual foi utilizado ultrassom para comparar os resultados experimentais com os resultados obtidos numericamente. Em 1960, Mindlin e Fox [Mindlin et al., 1960] publicaram o estudo de um método para modelar os modos de propagação de ondas em uma barra isotrópica de seção retangular de comprimento infinito utilizando uma superposição dos resultados longitudinais, de flexão e de cisalhamento para uma placa infinita com espessura igual a cada uma das dimensões da barra quadrada, rotacionando em 90° os resultados para uma das dimensões. Este método, apesar de sua eficácia e robustez, não é capaz de modelar todos os modos presentes em uma barra retangular de comprimento infinito pois, ao realizar a superposição de resultados de placas infinitas, diversos modos de torção e flexão presentes unicamente em barras não são considerados, ou seja, o resultado final é um espectro de frequências correto, porém incompleto.

Com o avanço da tecnologia computacional e a possibilidade de utilizar métodos numéricos, diversos pesquisadores aproveitaram estes avanços para resolverem problemas até então impossíveis. Cawley, em 1978, apresentou um dos primeiros artigos sobre a detecção de defeitos em estruturas utilizando propagação de ondas com o auxílio do método de elementos finitos.

A metodologia SAFE já foi utilizada para estudar seções complicadas como trilhos de trem, tubulações com perturbações ou acessórios tipo “joelhos” e materiais com propriedades viscoelásticas. Numerosas referências se destacam ao falar sobre ondas guiadas para a detecção de defeitos em estruturas, porém entre elas se sobressai o livro de Rose, *Ultrasonic Guided Waves in Solid Media*, 2014. Para o presente trabalho, a metodologia SAFE utilizada será o modelo proposto por Wilcox et al., 2002 que, conforme a figura 3.1 utiliza um guia de ondas circular com a mesma seção transversal de interesse, de maneira que, quando o raio de simetria utilizado é grande o suficiente, os resultados convergem rapidamente para um guia de ondas reto [Wilcox et al., 2002].

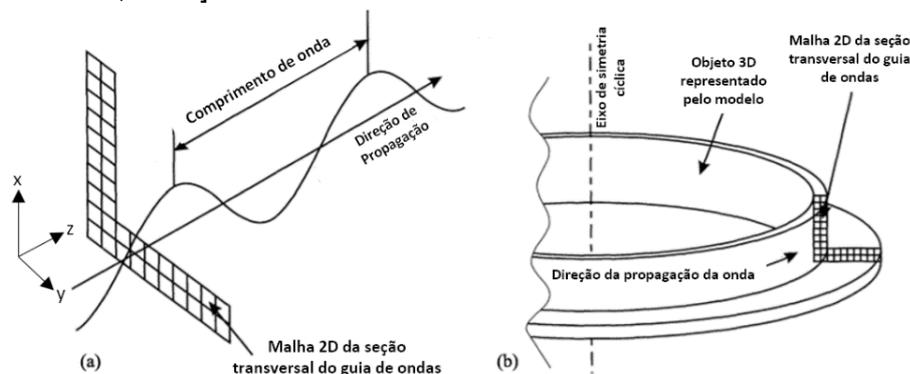


Figura 3.1 – Método axissimétrico. (a) Princípio básico de um modelo de malha 2D. (b) Modelo aproximado pelo método axissimétrico. [Adaptado de Wilcox et al., 2002]

Cegla, em 2008, otimizou o modelo proposto por Wilcox para o uso em geometrias delgadas e facilitou o uso deste método, propondo uma maneira fácil e rápida de obtenção das curvas de dispersão utilizando softwares comerciais. Este método também foi utilizado para traçar as curvas de dispersão de uma haste retangular no trabalho de Groth, 2016, e será discutida em mais detalhes na seção 4.

4. METODOLOGIA

Conforme mencionado na seção 2, para a confecção completa das curvas de dispersão em estruturas com uma dimensão infinita, é necessário utilizar algum método numérico. Neste trabalho é utilizada a metodologia SAFE, implementada no software comercial *Ansys APDL* [Ansys, 2009].

4.1 Método Axissimétrico

O método axissimétrico consiste em especificar a quantidade de comprimentos de onda λ com que a estrutura está sujeita a vibrar, considerando que esta possui um eixo de simetria e forma um “anel” em volta deste eixo, conforme a figura 3.1b. Para este tipo de análise, os eixos x e y fazem parte do plano que compõe a seção transversal da geometria e o comprimento está disposto na direção z . No caso de um guia de ondas de seção transversal do tipo duto quadrado, com lados de 200 mm e espessura de 10 mm, considerando um raio de simetria de 500 mm, ou seja, muito maior que as dimensões da seção transversal, é possível assumir que as ondas que viajam por este perfil se comportam da mesma maneira que uma estrutura reta e uniforme.

O comprimento da estrutura pode ser descrito como o perímetro do anel que é formado em volta do eixo de simetria, calculado pela expressão $2\pi R$. Como a quantidade de comprimentos de onda em que a estrutura vibra é fixada, é possível calcular o comprimento de onda pela equação 4.1 onde o termo C_{order} representa esta quantidade de comprimentos de onda com que a estrutura vibra. Por exemplo, caso seja fixado que a estrutura vibre com dois comprimentos de onda, o termo C_{order} é fixado em dois e é possível calcular λ com a seguinte expressão:

$$\lambda = \frac{2\pi R}{C_{order}} \quad (4.1)$$

Ao calcular a frequência natural para cada valor de C_{order} e sabendo que o comprimento de onda e o número de onda estão relacionados pela equação 2.16, é possível obter os valores de frequência para uma linha vertical localizada em um determinado número de onda no gráfico de curva de dispersão. A cada iteração ocorre um incremento de K que permite a construção de todas as curvas dentro do domínio de $[K_{min}, K_{max}]$, $[f_{min}, f_{max}]$ estipulado. Como o método consiste em avaliar vários pontos de maneira incremental, os resultados são discretos, apresentando-se como uma série de pares $[f, K]$ dispersos de maneira que, quanto maior for a discretização do incremento de K , mais a resposta se aproxima de um resultado contínuo. A figura 4.1 ilustra as possibilidades do método apresentado no traçado das curvas de dispersão.

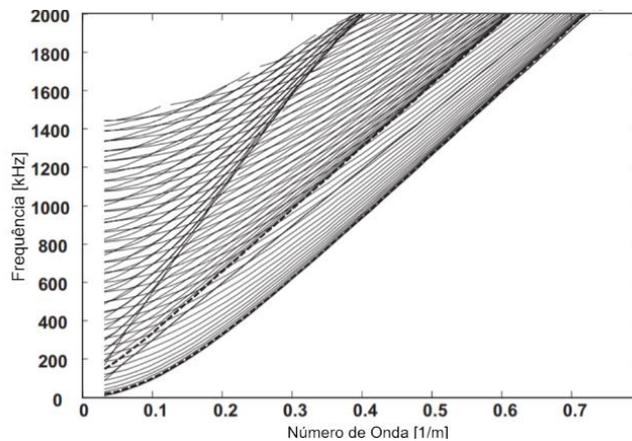


Figura 4.1 – Curvas de dispersão geradas para uma barra de aço de 30 mm por 1 mm.
[Adaptado de Cegla, 2008]

Uma vez obtidos os valores das curvas de dispersão em termos de f e K , é possível também apresentar estas curvas em função da velocidade de fase C_{ph} vs frequência ou número de onda, como aquelas apresentadas na fig. 2.3. A expressão para calcular C_{ph} surge da equação 4.2 e este tipo de gráfico é ideal para ilustrar as regiões onde um modo possui velocidade de propagação constante, representado por uma linha horizontal no gráfico. [Cegla, 2008].

$$C_{ph} = \frac{f}{K} \quad (4.2)$$

5. APLICAÇÕES

Nesta seção apresentam-se duas análises diferentes. Na primeira as curvas de dispersão de um duto quadrado são calculadas de três maneiras: Cálculo para a seção completa (duto quadrado), cálculo para perfil U e cálculo para perfil L, ambos com condições de contorno adequadas de modo a reproduzir a seção completa. Na segunda aplicação é estudado o comportamento das curvas de dispersão com a transição da geometria do perfil, começando com um duto quadrado, passando por tubos poligonais com um número crescente de lados e finalmente um tubo circular com solução analítica.

5.1 Perfil duto quadrado obtido a partir dos perfis U e L com condições de contorno adequadas.

O duto quadrado estudado tem suas dimensões apresentadas na figura 5.1 juntamente com as seções U e L e as diferentes condições de contorno utilizadas.

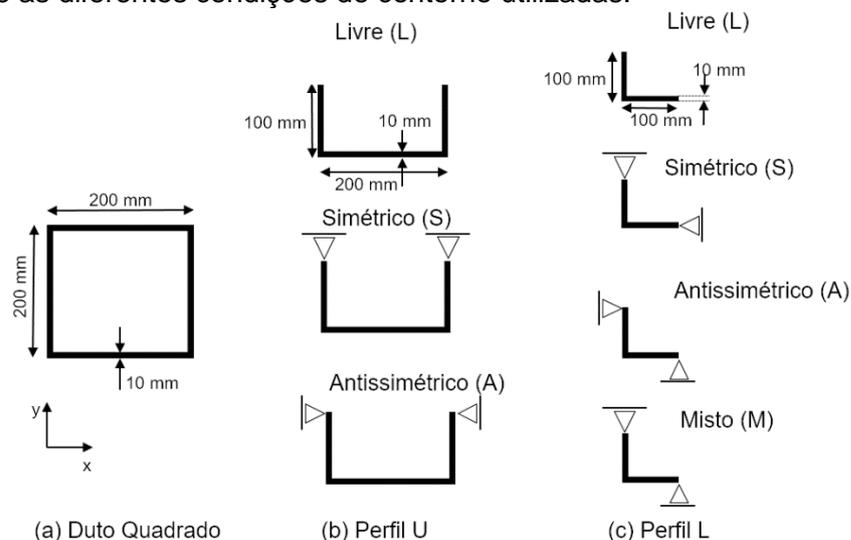


Figura 5.1 – Perfis simulados livres e com condições de contorno apropriadas.

5.1.1 Curvas de dispersão para o duto quadrado

Foi estudado um perfil do tipo duto quadrado de aço conforme indicado na figura 5.1a considerando as seguintes propriedades mecânicas: Módulo de elasticidade longitudinal (E) igual a 210 GPa, massa específica (ρ) igual a 7850 kg/m³, momento de inércia polar (I_0) igual a 9.17×10^5 m⁴, módulo torcional (J) igual a 6.86×10^4 m⁴, módulo de elasticidade transversal (G) igual a 80.76 GPa e coeficiente de *Poisson* de 0.3. Para a confecção das curvas foi utilizado o método SAFE apresentado na seção 4.1. Este método assume um modelo axissimétrico da seção de interesse com um raio de revolução de 500 m e uma malha com elementos de tamanho característico de 1 mm, totalizando 10 elementos na direção da espessura. Para o traçado das curvas foi utilizado um incremento no número de onda de $\Delta K = 0.05$ rad/m. O intervalo de frequência e número de onda analisado foi de $[0, 40]$ kHz e $[0, 44]$ rad/m.

Ao calcular as curvas de dispersão para este perfil, foram identificados 80 modos neste domínio $[f, K]$, os quais estão apresentados na figura 5.2, sendo possível notar uma grande complexidade na disposição das curvas que dificulta sua análise.

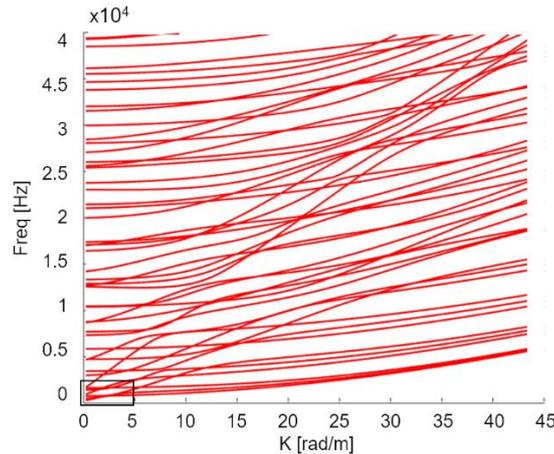


Figura 5.2 – Curvas de dispersão de um duto quadrado. Região analisada: f : 0; 40 kHz, K : 0; 44 rad/m (80 modos).

Para diminuir a complexidade da resposta e permitir um estudo mais minucioso de cada modo, será analisada uma janela $[f, K]$ reduzida de $[0, 2]$ kHz e $[0, 5]$ rad/m. Nesta região, ampliada na figura 5.3, foi possível identificar 7 curvas, onde cada uma delas está associada a uma onda modal.

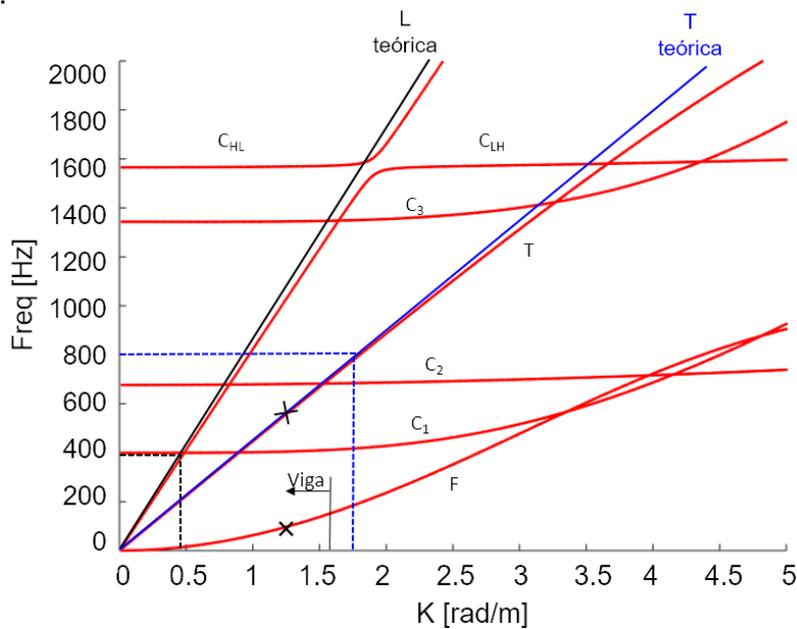


Figura 5.3 – Curvas de dispersão de um duto quadrado para domínio $[f, K]$ reduzido. Região analisada: f : 0; 2 kHz, K : 0; 5 rad/m.

Uma vez confeccionado o gráfico das curvas de dispersão para o duto quadrado, é possível estudar cada modo apresentado e compará-los com os modos teóricos de propagação longitudinal e torcional.

A curva $L_{teórica}$ indicada pela cor preta na figura 5.3 corresponde ao modo longitudinal teórico, que tem velocidade de propagação constante igual a velocidade da onda primária P definida pela eq. 2.7. A solução desta equação para as propriedades utilizadas é $c_p = 5712$ m/s. Verificando este valor sobre o gráfico, utilizando a equação $c_p = \frac{2\pi f}{K}$ para o ponto $f = 400$ Hz e $K = 0.455$ rad/m sob a curva C_{LH} , obtém-se $c_p = 5523$ m/s, valor aproximado ao teórico previamente calculado. Os valores adotados para efetuar esta verificação são indicados com uma linha tracejada preta sob a curva de dispersão na figura 5.3.

A curva T está associada ao modo torcional, que no modelo teórico possui velocidade de propagação constante. Utilizando a teoria da torção uniforme [Graff, 1975] e a equação 2.9 com as propriedades mecânicas descritas anteriormente, a velocidade de propagação teórica é de $c_T = 2774$ m/s (Curva $T_{\text{teórica}}$ azul). Utilizando o mesmo procedimento feito para a curva $L_{\text{teórica}}$, utilizando o ponto $f = 800$ Hz e $K = 1.85$ rad/m sob a curva T indicado com linhas tracejadas azuis, obtém-se $c_T = 2717$ m/s. Sendo assim, observa-se que o modo associado à curva T se sobrepõe ao teórico até aproximadamente $K = 2.5$ rad/m como observado na fig. 5.3. Após este ponto, o modo torcional tem comportamento dispersivo e passa a se distanciar da curva teórica devido ao efeito do empenamento de sua seção transversal [Graff, 1975].

A curva F está associada a um modo de flexão que, devido à simetria do perfil quadrado, é uma superposição de dois modos flexionais idênticos. Nessa curva observa-se uma maior variação de sua derivada, ou seja, uma maior variação da velocidade de fase do modo de propagação. Quando o comprimento de onda é grande em relação às dimensões da seção transversal do guia de onda, a relação de dispersão pode ser estimada utilizando a teoria de vigas de *Euler Bernoulli* ($\frac{\lambda}{2h} > 10$), onde h é a máxima dimensão da seção transversal. Quando esta condição não é satisfeita, este modelo analítico não é mais representativo. Para a geometria em estudo o ponto em que a seção muda de comportamento é indicado por uma linha de cor preta na fig. 5.3 no ponto $K = 1.57$ rad/m.

A curva indicada pela legenda C_{LH} coincide com a curva teórica do modo longitudinal L até um número de onda de $K = 1.85$ rad/m. Após este ponto as curvas se separam e a curva indicada pela legenda C_{HL} se superpõe à teórica. Tanto o modo associado a curva C_{LH} e C_{HL} tem uma propagação caracterizada como longitudinal quando está superposto com o modo teórico L , fora desta região a topologia do modo se modifica. Esta variação no modo é apresentada em mais detalhes no apêndice A na figura A.1 e A.2. A variação do modo longitudinal e a explicação desta súbita alteração em sua topologia é estudada em mais detalhes em Graff [1975] fora do escopo deste trabalho.

Quando uma curva de dispersão que representa um determinado modo não tem início na origem do gráfico $[f, K]$, este é chamado de evanescente e a frequência que limita o modo (ponto em que a curva intersecciona o eixo y) é chamada de frequência de corte [Rose, 2014]. Na figura 5.3 as curvas C_1 , C_2 , C_3 e C_{HL} são modos evanescentes. Os modos evanescentes possuem pouca aplicação em END's justamente por se propagarem por curtas distâncias.

Na figura 5.4 são apresentados os campos de deslocamentos nas direções x , y e z para os modos associados as curvas F e T para a ordenada $K = 1.25$ rad/m. Os pontos $[f, K]$ associados aos deslocamentos abaixo estão indicados com um X no gráfico da figura 5.3.

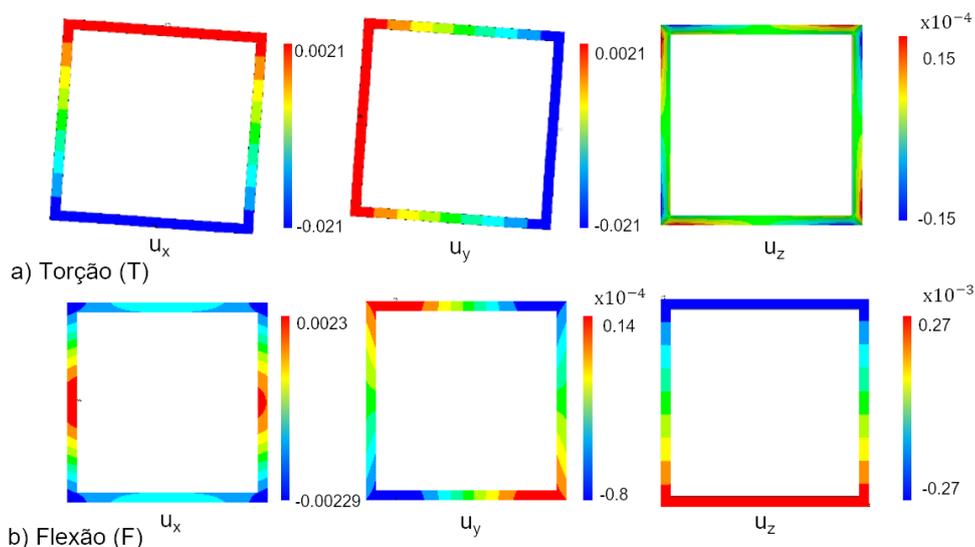


Figura 5.4 – Deslocamentos em metros para número de onda $K = 1.25$ rad/m. a) Torção, b) Flexão.

5.1.2 Geração das curvas de dispersão do duto quadrado através da superposição das curvas de dispersão de perfis U com condições de contorno específicas.

Com o objetivo de confeccionar as curvas de dispersão de um guia de ondas de perfil tipo duto quadrado de uma maneira alternativa, foram geradas as curvas de dispersão de perfis U com diferentes condições de contorno, conforme a figura 5.1, utilizando a metodologia SAFE apresentada na seção 4.1 e com os mesmos parâmetros da seção anterior. Os resultados obtidos são apresentados na figura a seguir.

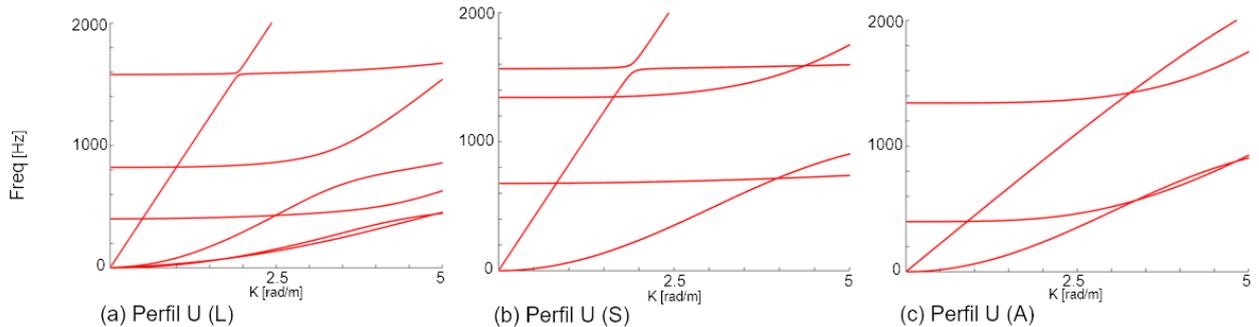


Figura 5.5 – Curvas de dispersão para perfil U com diferentes condições de contorno.

Ao observar as figuras 5.5a, 5.5b e 5.5c verifica-se que ao adicionar restrições o número de curvas modais diminui quando comparadas com a condição livre (L). Comparando as curvas de dispersão do perfil U livre (L), figura 5.5a, e o duto quadrado, figura 5.3, se observam diversos modos similares, porém o perfil U livre não apresenta o modo de torção presente no duto quadrado. A seguir, os resultados foram sobrepostos e comparados com o duto quadrado.

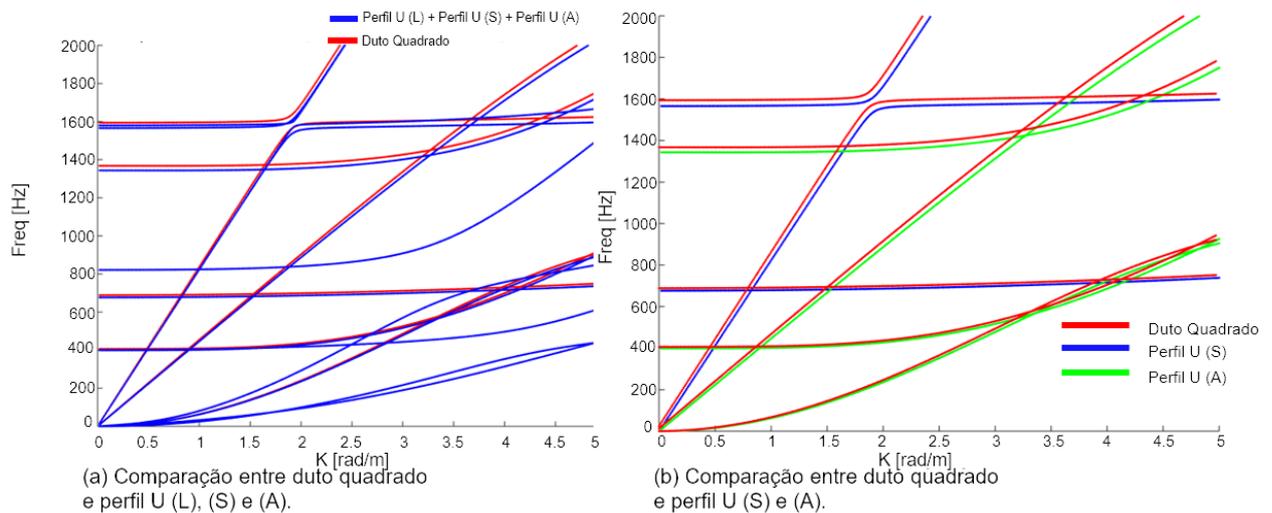


Figura 5.6 – Sobreposição das curvas do perfil U com o duto quadrado.

Verifica-se na figura 5.6a que, ao sobrepor todas as respostas do perfil U, são gerados mais modos que o perfil do tipo duto quadrado. Estes modos extras são decorrentes das curvas geradas pelo perfil U livre (L) indicado na figura 5.1a que possui modos não existentes em um duto quadrado. Na figura 5.6b observa-se que a superposição das curvas de dispersão dos perfis U com condições simétricas e assimétricas se igualam à resposta do duto quadrado, confirmando a aplicabilidade deste método de superposição. Tanto as figuras 5.6a e 5.6b foram deslocadas em 1% para facilitar a visualização de tal superposição.

5.1.3 Geração das curvas de dispersão do duto quadrado através da superposição das curvas de dispersão de perfis L com condições de contorno específicas.

Analogamente à seção 5.1.2 foram confeccionadas as curvas de dispersão para perfis L com condições de contorno do tipo livre (L), simétrica (S), antissimétrica (A) e mista (M), sendo esta última uma combinação da condição (S) e (A), com o objetivo de reproduzir as curvas do duto quadrado. Os resultados são apresentados na figura a seguir.

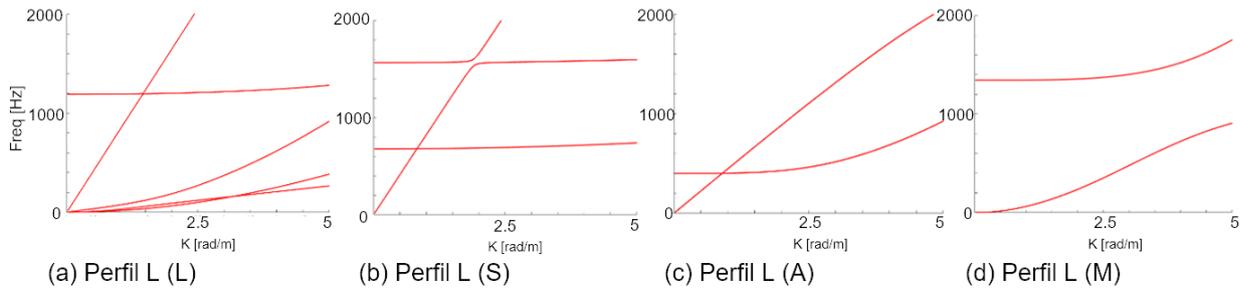


Figura 5.7 – Curvas de dispersão para diferentes condições de contorno do perfil L.

A curva característica representada pelo modo longitudinal teórico do perfil alvo do tipo duto quadrado (figura 5.3), que possui uma inflexão no ponto $K = 1.85$ rad/m, está presente nas curvas do perfil L sem restrições (L) e com simetria (S), porém para o perfil L antissimétrico (A) e com condição mista (M) o modo longitudinal não existe. Nota-se também que o perfil L antissimétrico e misto são os que possuem menos modos, contendo apenas dois dentro do intervalo proposto para o presente estudo. A seguir, as respostas são sobrepostas e comparadas.

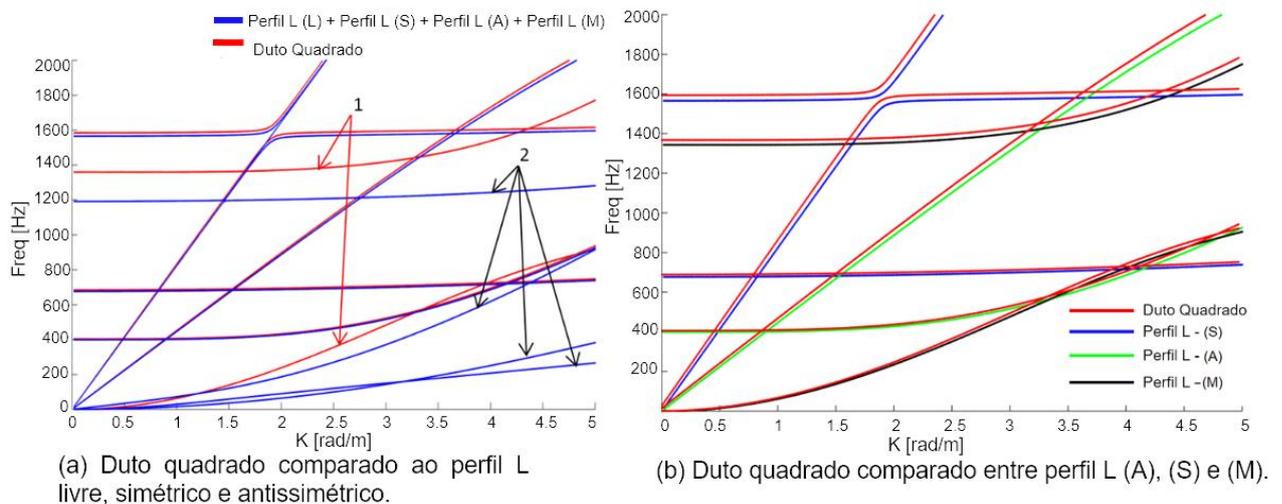


Figura 5.8 – Sobreposição dos resultados do perfil L com o duto quadrado.

Na figura 5.8a observa-se que ao comparar o perfil do tipo duto quadrado em vermelho com os perfis L com condições livres, simétricas e antissimétricas, análogo ao procedimento realizado na seção 5.1.2, não é possível gerar todas as curvas de dispersão do perfil alvo tipo duto quadrado. Na figura 5.8a as curvas indicadas pelo número 1 são os modos do perfil do tipo duto quadrado que não são representadas pela combinação dos perfis L (L + S + A) e as curvas indicadas por 2 são modos do perfil L (L) que não aparecem nas curvas do perfil duto quadrado, efeito similar ao ocorrido anteriormente na figura 5.6a.

Para poder representar fielmente todos os modos presentes no perfil duto quadrado utilizando o perfil L com restrições, é necessário adicionar a condição mista (M) apresentada na figura 5.1c. Esta superposição é ilustrada na figura 5.8b, onde o perfil alvo é totalmente

representado. Ambas as figuras 5.8a e 5.8b sofreram um deslocamento de 1% para facilitar a visualização da superposição das curvas.

5.1.4 Análise do comportamento das curvas de dispersão com a variação do perfil transversal do guia.

Nesta seção é estudada a mudança das curvas de dispersão com a variação da seção transversal, partindo de um duto quadrado, passando por tubos poligonais até um tubo circular. O tamanho característico igual à 0.2 m foi mantido em todos os perfis (quadrado, hexágono, octógono, decágono, tetradecágono e círculo) juntamente com sua espessura de 0.01 m. As seções analisadas estão apresentadas na figura 5.9.

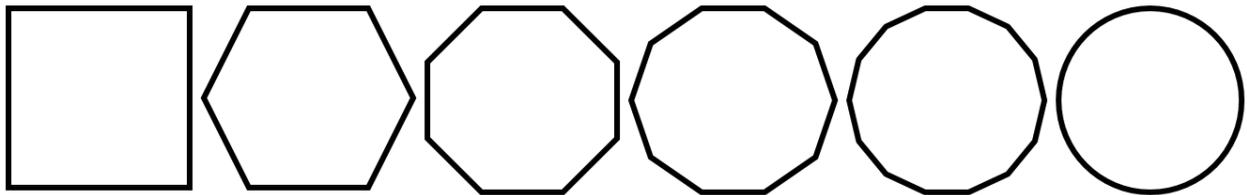


Figura 5.9 – Seções transversais estudadas. Dimensão característica igual a 0.2 m e espessura de 0.01 m para todos os casos.

A análise de diferentes polígonos tem importantes implicações práticas pois as curvas de dispersão de uma tubulação circular são simples, quando comparadas com geometrias mais complexas, e possuem soluções analíticas. Nos demais casos somente é possível a obtenção de todas as curvas de dispersão utilizando algum recurso numérico. As simulações utilizaram os mesmos parâmetros físicos das seções anteriores, porém, foi analisado um domínio maior de frequência $[0, 10]$ kHz e de menor número de onda $[0, 4.5]$ rad/m. Os resultados obtidos encontram-se no apêndice B.

O objetivo deste estudo é avaliar a possibilidade de obter as curvas de dispersão de um guia de ondas utilizando outro guia de geometria similar. A comparação destes perfis deixa em evidência que, até para polígonos com uma baixa quantidade de lados como o hexágono, alguns modos nas curvas de dispersão se aproximam da resposta para um perfil tubular circular. Nas figuras B.1 e B.2, ao observar a comparação das curvas de um guia de seção poligonal e circular, verifica-se que o modo axial e flexural possuem valores muito similares, já o modo torcional por sua vez apresenta a maior distorção. Este fenômeno pode ser explicado pois a seção circular, diferente das seções poligonais, não apresenta empenamento.

6. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram exploradas as características de propagação de ondas guiadas para um perfil do tipo duto quadrado indicando peculiaridades em suas curvas de dispersão. Também foi implementada a obtenção das curvas de dispersão do perfil tipo duto quadrado com a superposição das curvas para perfis U e L com diferentes tipos de condições de contorno. Finalmente, foi realizada a comparação entre curvas de dispersão de um perfil tubular circular com solução analítica com perfis tubulares poligonais com diferentes números de lados.

No transcurso do trabalho, concluiu-se que o estudo das particularidades do perfil tubular quadrado permite o entendimento de algumas características de suas curvas de dispersão na região analisada e como estas se relacionam com o funcionamento do perfil como um guia de ondas.

A possibilidade de construir as curvas de dispersão de um perfil do tipo duto quadrado com a superposição de perfis de geometria mais simples com condições de contorno particulares é de interesse do ponto de vista computacional. Verificou-se que, dentro do domínio $[f, K]$ estudado, o tempo total utilizado para confeccionar as curvas de dispersão de um duto quadrado reduz aproximadamente 30% caso seja utilizado um perfil U. Ao utilizar um perfil L, o tempo total

de computação é reduzido cerca de 40%. Esta redução total no tempo de computação ocorre devido à diminuição do número de elementos utilizados no software de elementos finitos.

Ao comparar as curvas de dispersão entre o perfil tubular circular e os perfis poligonais ficou evidente a presença de modos fundamentais que dependem fortemente da forma do perfil, como o caso do modo torcional. Para o modo longitudinal, observou-se que este modo depende pouco da geometria do perfil. Foi possível também observar que para perfis octogonais ou com mais lados as curvas de dispersão praticamente se superpõem com as do perfil tubular circular.

A metodologia apresentada neste estudo permite conhecer melhor as características do perfil estudado, fator que é de suma importância para a aplicação do método de ondas guiadas para a detecção de danos em estruturas. Além disso, esta metodologia de superposição de perfis com condições de contorno específicas, para a obtenção de perfis mais complexos, facilita e diminui o tempo para a confecção das curvas de dispersão de uma geometria. Para continuar na linha de desenvolvimento iniciada, recomenda-se em trabalhos futuros a realização do estudo de outros aspectos importantes não avaliados no presente trabalho, como a viabilidade da confecção das curvas de dispersão de guias de ondas mais complexos, com múltiplas células e diferentes materiais, de modo a tornar o método mais robusto e aplicável em situações práticas do uso de ondas guiadas para a avaliação da integridade estrutural e fatores que influenciam na propagação de ondas guiadas, e que por consequência, podem se beneficiar deste método.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ansys, I.; **“Programmer’s Manual for Mechanical APDL”**. Ansys Inc., 2009.
- Auld, B. A.; **“Acoustic fields and waves in solids”**, John Wiley and Sons, Vol II, 1973.
- Braile, L. W.; **“Seismic Waves and the Slinky: A Guide for Teacher”**, Purdue University, <http://web.ics.purdue.edu/~braile/edumod/slinky/slinky.htm>, Acesso em 08/04/2018.
- Cawley, P.; **“Defect Location in Structures by a Vibration Technique”**, Department of Mechanical Engineering, Bristol University, 1978.
- Cegla, F. B.; **“Energy concentration at the center of large aspect ratio rectangular waveguides at high frequencies”**, Journal of Acoustical Society of America, vol. 123, p. 4218-4226, 2008.
- Mindlin, R. D., Fox, E. A.; **“Vibrations and Waves in Elastic Bars of Rectangular Cross Section”**, ASME, 1960.
- Graff, K. F.; **“Wave Motion in Elastic Solids”**, volume I, Dover Publications, New York U.S.A., 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.
- 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.
- Palacios, T. A.; **“Antecedentes Históricos de la Emisión Acústica em Latinoamérica”**, Comisión Nacional de Energía Atómica, San Martín Argentina, 2004.
- Potel, C. and Bruneau, M.; **“Materials and Acoustic Handbook”**, ISTE Ltd, 1st Edition, 2009.
- Rose, J. L.; **“Ultrasonics Guided Waves in Solid Media”**, Cambridge University press, 2014.
- Ultrasonic Guided Wave**, <http://www.usguidedwave.com/the-mss-system.html>. Acesso em 12/05/2018.
- Wilcox, P., Evans, M., Diligent, O., Lowe, M. and Cawley, P.; **“Dispersion and excitability of guided acoustic waves in isotropic beams with arbitrary cross section”**, American Institute of Physics, Department of Mechanical Engineering, Imperial College, London, 2002.

APÊNDICE A

Análise do modo longitudinal (fundamental e primeiro harmônico). Um dos modos mais úteis para o desenvolvimento de ENDS por ondas guiadas, nesse apêndice é apresentado um estudo centrado numa região de transição da curva de dispersão do modo longitudinal.

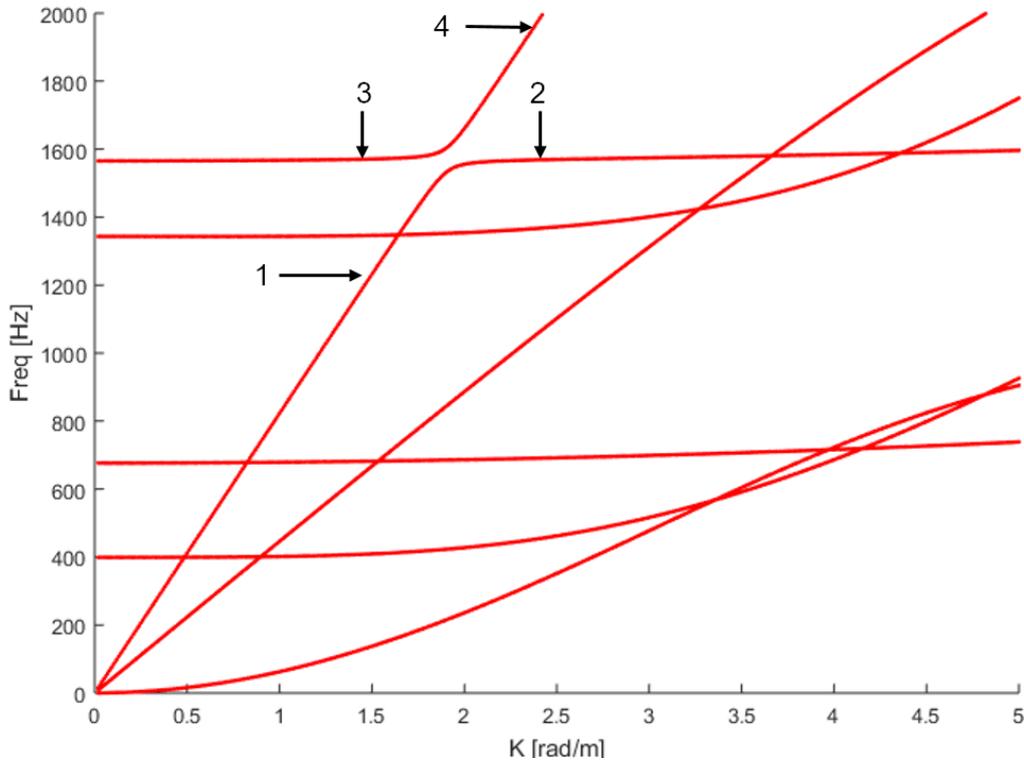


Figura A.1 – Curva de dispersão de um duto quadrado com marcações dos pontos estudados.

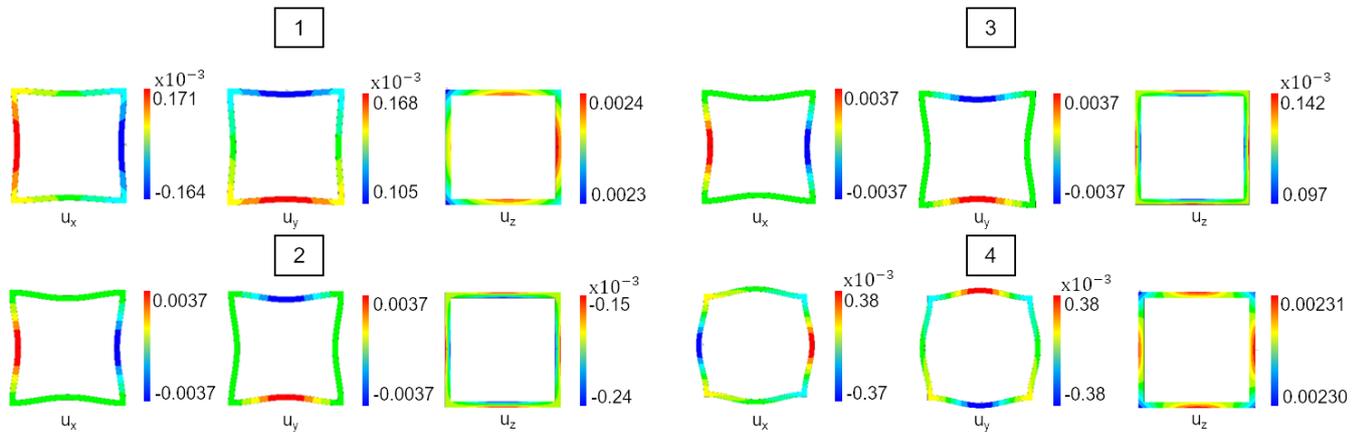


Figura A.2 – Deslocamentos em metros nas direções x, y e z de um duto quadrado para $K = 1.25$ rad/m e para $K = 2.5$ rad/m.

APÊNDICE B

Nesse apêndice são comparadas as curvas de dispersão de diversos perfis, passando do circular ao quadrado.

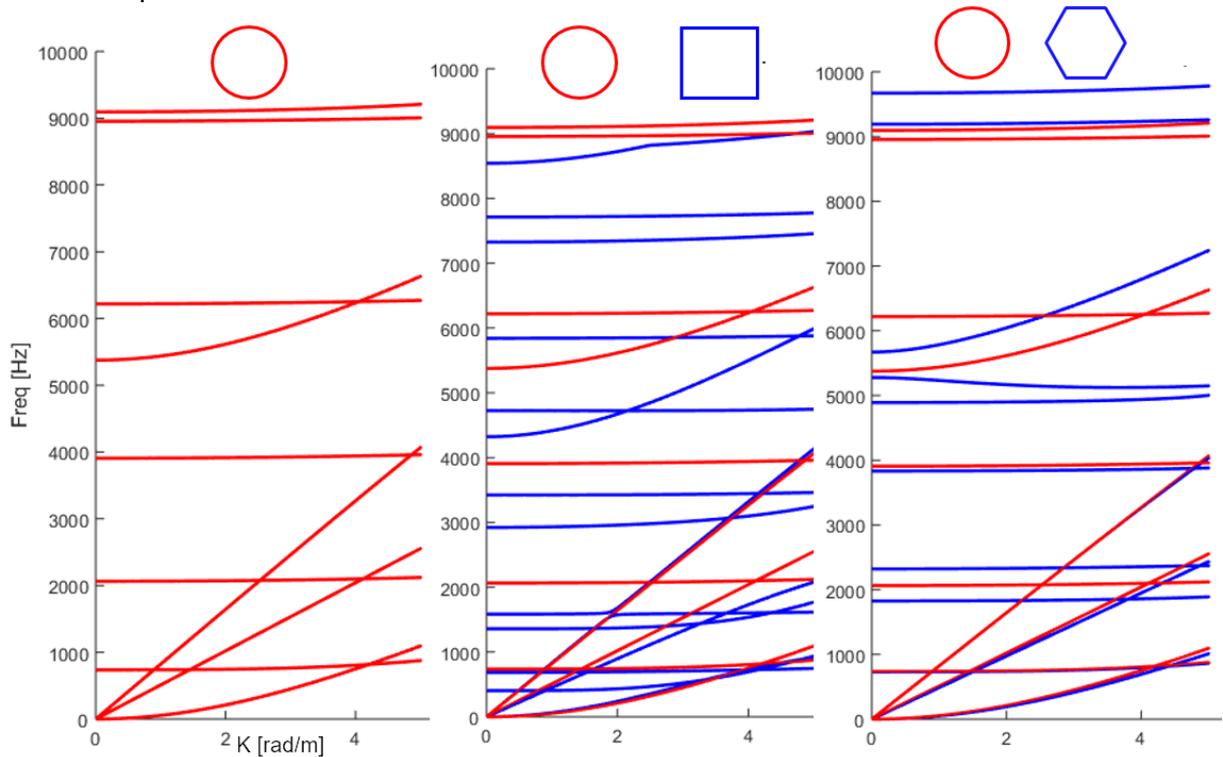


Figura B.1 – Curvas de dispersão de um tubo, comparadas com um quadrado e hexágono.

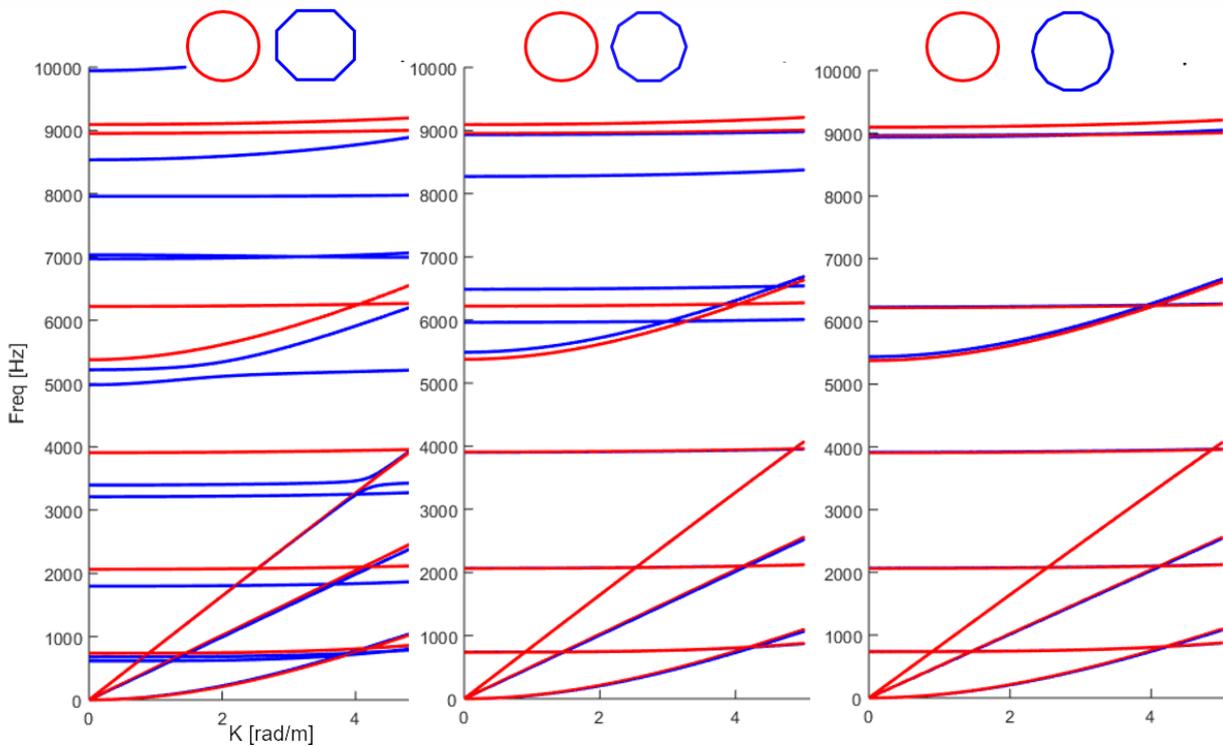


Figura B.2 – Comparação entre tubo e octógono, decágono e tetradecágono.