

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

PROPAGAÇÃO DE ONDAS GUIADAS EM BARRAS RETANGULARES: O PROBLEMA DA
ATENUAÇÃO NA PROPAGAÇÃO

por

Cassiê Fernanda Longhi

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

Porto Alegre, novembro de 2016



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

PROPAGAÇÃO DE ONDAS GUIADAS EM BARRAS RETANGULARES: O PROBLEMA DA
ATENUAÇÃO NA PROPAGAÇÃO
por

Cassiê Fernanda Longhi

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: M.sc. Eng. Eduardo Becker Groth

Comissão de Avaliação:

Prof. Herbert M. Gomes

Prof. Jakson M. Vassoler

Prof. Rogério José Marczak

Porto Alegre, 28 de novembro de 2016.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, Fernando e Flávia Longhi, ao meu namorado Marcos Tocchetto Agostini, e a todos os professores que se dedicaram a passar seus conhecimentos da melhor forma possível.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao meu professor orientador Ignacio Iturrioz e ao co-orientador Eduardo Groth, pois sem a paciência e empenho deles a me orientar durante esse trabalho não teria sido possível desenvolver este estudo.

Agradeço também a meus pais por serem sempre meu porto seguro. Me apoiando e sempre sabendo as palavras certas para me dizer nos momentos mais difíceis.

Agradeço ao meu namorado por estar presente todos os dias, em cada minuto que eu precisasse. Por me ouvir e estar sempre atento a me cuidar.

Agradeço aos amigos e amigas que fiz nesses 6 anos de estudo. As parcerias e apoio para todos os momentos.

Longhi, C. F. **Propagação de ondas guiadas em barras retangulares: o problema da atenuação na propagação**. 2016. 22 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

RESUMO

A necessidade de contar com métodos que permitam determinar defeitos tem cada vez mais importância na engenharia moderna, para evitar acidentes catastróficos e racionalizar a sua manutenção. Muitas das estruturas utilizadas na Engenharia são laminares, onde pelo menos uma das dimensões predomina sobre as outras duas, nestas tipologias se encontram os vasos de pressão, tubulações, trilhos de trem, mangueiras, entre outras. Nestas estruturas tem tipos de ondas que se propagam na direção da maior dimensão chamadas de ondas guiadas. Nas últimas décadas, técnicas baseadas na propagação deste tipo de ondas tem sido aplicadas com sucesso na determinação de defeitos em estruturas laminares. O estudo da atenuação de este tipo de onda é de grande importância para poder determinar os limites da sua aplicação. Neste contexto o trabalho aqui apresentado consiste no estudo da atenuação de ondas guiadas que viajam numa haste retangular metálica. Esta haste forma parte da camada estrutural de um raiser, tubulação flexível utilizada na tecnologia de extração de petróleo submarina. No trabalho se apresentam resultados experimentais onde a atenuação foi medida. Um modelo em elementos finitos da estrutura em estudo é montado no programa LS-Dyna, calibrando o mesmo empregando a informação experimental disponível. Finalmente os resultados obtidos são discutidos e conclusões sobre o trabalho realizado são apresentadas.

PALAVRAS-CHAVE: haste, ondas guiadas, atenuação, Elementos Finitos.

Longhi, C. F., **Guided waves's propagation in rectangular bars: the problem of attenuation in propagation**. 2016. 22 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

ABSTRACT

The need for defect detection methods has become increasingly important in modern engineering to prevent catastrophic accidents and to rationalize their maintenance. Many of the structures used in engineering are laminar, where at least one of the dimensions prevails over the other two, in these typologies are pressure vessels, pipes, train tracks, hoses, among others. In these structures there are types of waves that propagate in the direction of the larger dimension called guided waves. In the last decades, techniques based on the propagation of this type of waves have been successfully applied in the determination of defects in laminar structures. The study of the attenuation of this type of wave is of great importance to be able to determine the limits of its application. In this context the work presented here consists of the study of the attenuation of guided waves traveling on a rectangular metal rod. This rod forms part of the structural layer of a raiser, flexible tubing used in the underwater oil extraction technology. In the work we present experimental results where the attenuation was measured. A finite element model of the structure under study is assembled in the LS-Dyna program, calibrating it using the available experimental information. Finally the results obtained are discussed and conclusions about the work performed are presented.

KEY WORDS: rod, guided waves, attenuation, finite elements.

ÍNDICE

	Pág.
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Objetivos.....	2
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	2
2.1. Materiais viscoelásticos lineares.....	2
2.2. Atenuação em sólidos.....	4
2.3. Integração numérica explícita.....	7
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	8
3.1. Descrição do ensaio.....	8
3.2. Curva de dispersão da haste retangular.....	9
3.3. Simulação.....	11
4. RESULTADOS.....	12
4.1. Medições experimentais.....	12
4.2. Modelo numérico.....	13
5. CONCLUSÃO.....	14
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	14

1. INTRODUÇÃO

A acústica estuda os fenômenos associados à geração, transmissão e recepção de energia em forma de vibrações. As ondas ultrassônicas podem ser introduzidas no material através de um elemento emissor que vibra com uma frequência específica. As ondas guiadas são condicionadas pelas fronteiras para propagar-se. As ondas de Lamb em placas são exemplo deste tipo de ondas. Com este tipo de onda se propaga grandes distâncias na direção das maiores dimensões, a principal vantagem é inspecionar estruturas enterradas ou imersas em meios agressivos ou de difícil acesso. Assim, a propagação de ondas elásticas em sólidos apresenta potencial quando se deseja estimar a integridade de determinada estrutura [Groth, 2016]. Na Figura 1 se ilustra a utilização de ondas guiadas na identificação de defeitos em estruturas laminares.

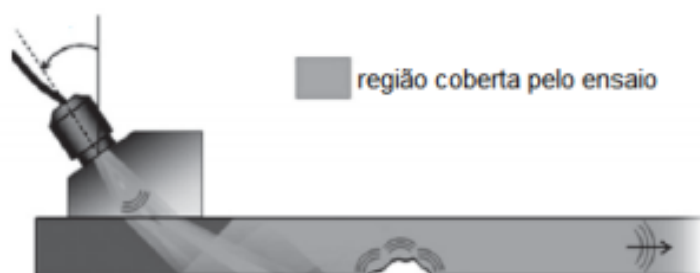


Figura 1. Excitação oblíqua de ondas guiadas, [Rose 2014].

As vibrações causadas pelas ondas mecânicas fazem essas se repetirem durante um determinado tempo. Assim, com o passar do tempo a onda sofre um decaimento que está relacionado a diversos mecanismos físicos. Os mecanismos que produzem a atenuação das ondas guiadas são: atenuação geométrica, atenuação por dispersão, atenuação por espalhamento e difração, atenuação por mecanismos de dissipação de energia, veremos uma descrição sucinta destas, será apresentado na seção 2. Lembrando que um ou mais mecanismos de atenuação podem ocorrer ao mesmo tempo numa estrutura. No presente trabalho se estudará a atenuação de ondas guiadas numa barra prismática metálica. A qual forma parte da camada estrutural de um raiser flexível – tubo flexível utilizado para levar o petróleo do fundo do mar até as plataformas ou navios. Na Figura 2 se apresenta duas vistas da estrutura mencionada. Este tipo de tubo é a todo o momento submetido altas solicitações por isso, técnicas para poder avaliar sua integridade são de grande interesse técnico e econômico.

Para realizar este estudo foram feitas ensaios visando determinar a atenuação das ondas guiadas e sua simulação numérica empregando o modelo de elementos finitos empregando o sistema comercial LS-DYNA 4.3-x64, [LS-DYNA, 2006].

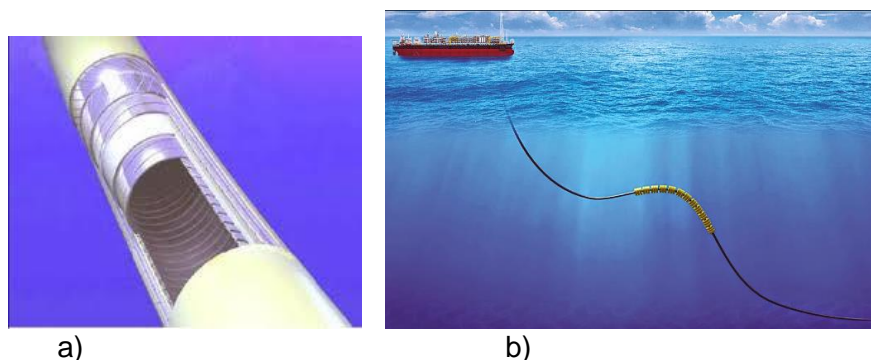


Figura 2. Raiser, a) tubulação flexível que leva petróleo, b) Raiser fazendo conexão do fundo do mar com o navio petroleiro.

1.1. Objetivos

Objetivo geral: Explorar o fenômeno de atenuação de estruturas laminares metálicas.

Objetivos específicos

- (a) Compreender como as ondas guiadas propagam em estruturas laminares e como é possível através das curvas de dispersão interpretar as características da propagação.
- (b) Compreender as características da atenuação das ondas guiadas dando ênfase à produzida pelas características intrínsecas do material (amortecimento estrutural).
- (c) Interpretar ensaios realizados numa barra metálica visando determinar a atenuação das ditas ondas.
- (d) Simular os ensaios, realizando calibração característica do material do modelo numérico empregando os ensaios realizados, visando aplicar no modelo senários de propagação mais complexos.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Materiais viscoelásticos lineares

De acordo com a resistência dos materiais sabe-se que para a maioria dos materiais a tensão σ e a deformação ε estão relacionadas com a lei linear $\sigma = E\varepsilon$ (Lei de Hooke), onde E é o módulo de Young. Isso somente é verdade para tensões e deformações que são invariáveis com o tempo. Caso elas variem com o tempo, sua relação com a viscoelasticidade devem incluir taxas de variação.

A equação que relaciona tensão e deformação num material visco elástico linear submetido a uma solitação uniaxial é segundo Dimarogonas [1996]:

$$\left[a_0 + a_1 \frac{d(\cdot)}{dt} + a_2 \frac{d^2(\cdot)}{dt^2} + \dots \right] \sigma = \left[b_0 + b_1 \frac{d(\cdot)}{dt} + b_2 \frac{d^2(\cdot)}{dt^2} + \dots \right] \varepsilon \quad (2.1)$$

Onde σ é a tensão, ε é a deformação, e a_i, b_i representam constantes do material. Considerando na Figura 3 uma barra de seção circular A submetida a uma tensão axial.

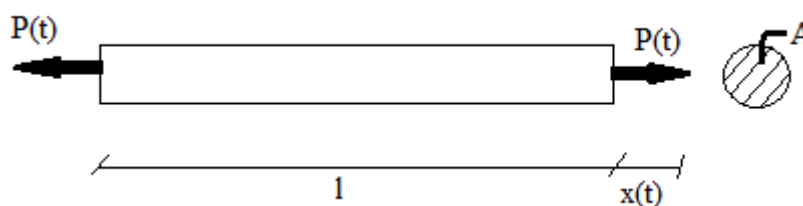


Figura 3. Barra com solitação uniaxial e seção circular.

Na expressão (2.1) é possível substituir a tensão e deformação pelas relações apresentadas a seguir:

$$\sigma(t) = A \cdot P(t) \quad (2.2)$$

$$\varepsilon(t) = \frac{x(t)}{l} \quad (2.3)$$

onde A é a área da seção transversal, l o comprimento da barra, $P(t)$ a força uniaxial.

Multiplicando $A \cdot l$ em ambos os lados da Equação 2.1, e substituindo (2.2) e (2.3), tem-se:

$$\left[a_0 + a_1 \frac{d(\cdot)}{dt} + a_2 \frac{d^2(\cdot)}{dt^2} + \dots \right] \frac{l.P(t)}{A} = \left[b_0 + b_1 \frac{d(\cdot)}{dt} + b_2 \frac{d^2(\cdot)}{dt^2} + \dots \right] x(t) \quad (2.4)$$

onde $P(t)$ é a força e $x(t)$ é o deslocamento axial na barra. Assim, aplicando a transformada de Fourier na Equação (2.4).

$$\left[a_0 + a_1(-i\omega) + a_2(-i\omega)^2 + \dots \right] \frac{l.P(\omega)}{A} = \left[b_0 + b_1(-i\omega) + b_2(-i\omega)^2 + \dots \right] X(\omega) \quad (2.5)$$

Reescrevendo a Equação (2.5):

$$\left[(a_0 - a_2\omega^2 + a_4\omega^4 - \dots) + i(-a_1\omega + a_3\omega^3 - \dots) \right] \frac{l.P(\omega)}{A} = \left[(b_0 - b_2\omega^2 + b_4\omega^4 - \dots) + i(-b_1\omega + b_3\omega^3 - \dots) \right] X(\omega) \quad (2.6)$$

Que em forma mais compacta fica:

$$\left[A_1(\omega) + iA_2(\omega) \right] \frac{l.P(\omega)}{A} = \left[B_1(\omega) + iB_2(\omega) \right] X(\omega) \quad (2.7)$$

Sendo A_1, B_1 funções reais pares de ω e A_2, B_2 funções reais ímpares de ω . Isolando $P(\omega)$ na equação anterior.

$$P(\omega) = \frac{A}{l} \frac{[B_1(\omega) + iB_2(\omega)]}{[A_1(\omega) + iA_2(\omega)]} X(\omega) \quad (2.8)$$

O termo entre colchetes é conhecido como Módulo de Elasticidade Complexo, $E^*(\omega)$ e pode ser reescrito como segue:

$$E^*(\omega) = E(\omega)[1 + i\gamma(\omega)] \quad (2.9)$$

$$E(\omega) = \frac{A_1 B_1 + A_2 B_2}{A_1^2 + A_2^2} \quad (2.10)$$

$$\gamma(\omega) = \frac{A_1 B_2 + A_2 B_1}{A_1 B_1 + A_2 B_2} \quad (2.11)$$

onde $E(\omega)$ é o módulo de elasticidade e $\gamma(\omega)$ é o fator de perda do material, estes são em geral, funções da temperatura para cada material específico. Mais informações em [Dimaragonas 1996].

Considerando materiais com modelos constitutivos simples, representados em forma esquemática na Figura 4:

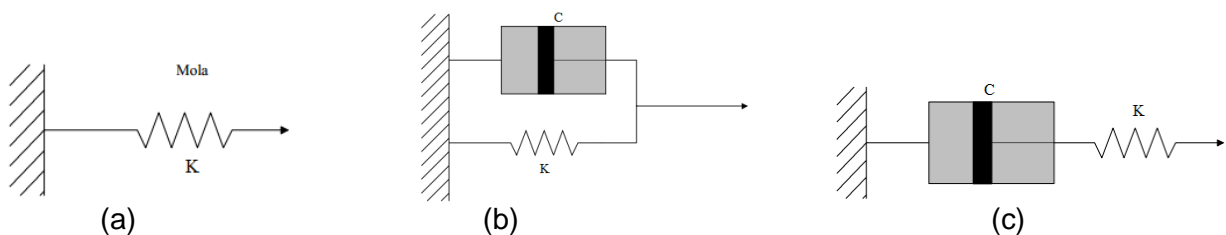


Figura 4: Modelos constitutivos simples: (a) Sistema Elástico, (b) Sistema Kelvin, (c) modelo Maxwell.

Para os modelos clássicos da Figura 4 tem-se:

a) Onde k é a constante de rigidez da mola. Sabe-se que $K = \frac{E.A}{l}$, então $E(\omega) = E_0$, $\gamma(\omega) = 0$, pode-se escrever:

$$P(\omega) = \frac{A}{l} E_0 X(\omega) \quad (2.12)$$

b) Modelo de Kelvin – considera-se a barra representada como uma mola e um amortecedor em paralelo. Onde C é a constante de amortecimento. Sabendo que $\sigma = \left[K + C \frac{d(\cdot)}{dt} \right] \varepsilon$, assim, $E(\omega) = K$ e $\gamma(\omega) = -\frac{C\omega}{K}$, chegando a expressão complexa:

$$P(\omega) = \frac{A}{l} K \left[1 - \frac{iC\omega}{K} \right] X(\omega) \quad (2.13)$$

c) Modelo de Maxwell - considera-se a barra representada como uma mola e um amortecedor em série. Sendo $\sigma \left[\frac{1}{K} \right] = \left[C \frac{d(\cdot)}{dt} \right] \varepsilon$, chega-se a $E(\omega) = 0$ e $\gamma(\omega) = \infty$, e então:

$$P(\omega) = \frac{A}{l} (-C\omega i) X(\omega) \quad (2.14)$$

2.2. Atenuação em Sólidos

Neste trabalho se estudará a atenuação de uma onda em relação ao meio pelo qual esta se propaga.

Na prática, uma onda em uma estrutura está sujeita a diversos tipos de atenuação, todos ocorrendo simultaneamente, mas com intensidades diferentes. De forma geral, a atenuação em estruturas pode ser representada pela equação abaixo:

$$u = U e^{-\alpha x} e^{i(kx - \omega t)} \quad (2.15)$$

onde U é o deslocamento inicial da perturbação, x a posição atual a partir do posição de referencia (fonte excitadora), α é o coeficiente de atenuação em nepers por unidade de comprimento. Um neper é uma escala logarítmica natural correspondente a redução de amplitude de e^{-1} vezes o valor inicial (α também pode ser expresso em decibéis por metro. [Eagle, 2005]. Na Figura 5 se apresenta em forma esquemática a expressão 2.15 onde a atenuação a indicaria a curvatura da curva exponencial que caracteriza a atenuação.

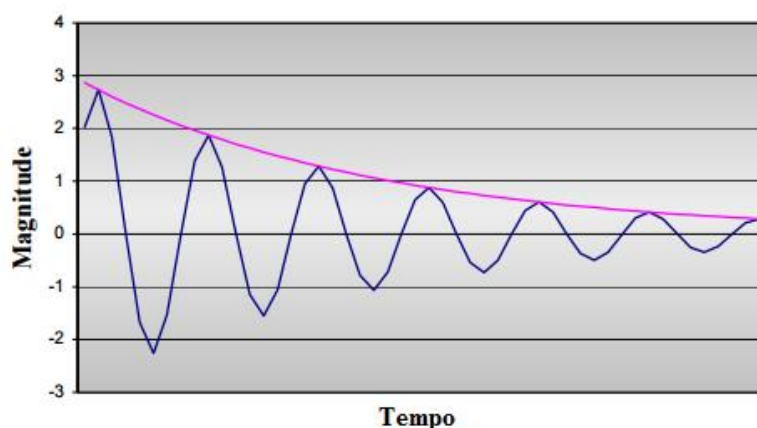


Figura 5. Curva de decaimento para um sistema com um grau de liberdade com amortecimento viscoso linear.

Existem diversos mecanismos que produzem a atenuação, os quais se comentam brevemente a continuação:

(i) *Atenuação Geométrica*: Acontece normalmente em ondas com frente esférica ou cilíndrica, onde a área da frente de onda aumenta enquanto a onda se afasta do ponto de emissão. O comportamento de atenuação já é esperado para esse tipo de onda, pois a energia contida nela se redistribui sob a frente de onda. Como a quantidade de energia é sempre a mesma, a amplitude do deslocamento causado pela passagem da onda sob as partículas do sólido diminui.

Propagações com frente de onda plana e ondas em uma dimensão não estão sujeitas a atenuação geométrica.

(ii) *Atenuação por dispersão*: A atenuação por dispersão ocorre devido a dependência da velocidade de propagação com a frequência. A dispersão está diretamente ligada a propagação em estruturas onde pelo menos uma dimensão predomina sobre as outras duas, como é o caso de estruturas laminares ou vigas. Neste caso a amplitude da onda diminui a medida que a mesma propaga pelo guia de ondas, [Rose 2014].

Para o estudo deste tipo de atenuação é necessário apresentar o conceito de curvas de dispersão. O qual vamos introduzir a continuação.

A propagação de uma onda num sólido se pode decompor na combinação linear de ondas harmônicas do tipo apresentado a seguir:

$$u(x, t) = A \cos(\omega t - kx) \quad (2.16)$$

Onde ω é a frequência e k é o número de onda. Abaixo tem-se: $T[s]$ que representa o período da onda e $\lambda[m]$ que representa o comprimento da onda, sendo possível apresentar as seguintes relações entre os parâmetros definidos:

$$\omega = 2\pi/T, \quad k = 2\pi/\lambda, \quad \lambda = cT \text{ e } c = \omega/k \quad (2.17)$$

Onde c representa a velocidade de propagação da onda.

Num domínio infinito as ondas de volume e de corte propagam a velocidades que são propriedades características do material, é o caso das ondas de corte e de volume apresentadas nas expressões a seguir e em forma esquemática na Figura 6.

$$c_2 = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad c_1 = \sqrt{\frac{\hat{\lambda} + 2\mu}{\rho}} \quad (2.18)$$

Onde μ e $\hat{\lambda}$ indicam as constantes elásticas de lame e ρ a densidade do material.

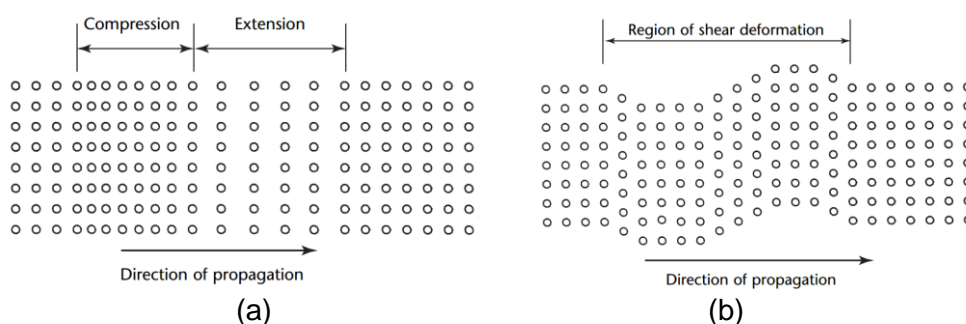


Figura 6. Propagação em meio infinito. (a) Ondas-P. (b) Ondas-S. [Moore, et. al., 2005].

No caso de estruturas laminares, além das ondas antes mencionadas, a interação da onda propagante com as fronteiras do sólido faz com que apareçam diversos tipos de ondas, sendo características deste tipo de estrutura. As que propagam na direção da máxima dimensão estrutural, neste caso é possível decompor a onda propagante como uma combinação linear de ondas modais. A propriedade destas ondas modais que tem uma distribuição espacial característica e que sua velocidade de propagação é função da frequência da onda. Isto faz com que uma determinada perturbação que se decompõe na combinação linear de uma série de ondas modais, quando propagam estas ondas, o farão, em geral, à velocidades, diferentes em função da frequência da perturbação. Produzindo o típico efeito de dispersão, uma das formas características de atenuação de estruturas laminares. Cada estrutura laminar terá um tipo particular de vinculação entre a velocidade de dispersão das ondas modais e da frequência da excitação, a informação sobre este particular é apresentado em forma de curvas chamadas curvas modais, que para o caso de uma placa isotrópica tem solução analítica apresentada por Lamb [apud Auld 1973], mas para outro tipo de geometria deve ser calculada em forma numérica. Sobre as características da propagação de ondas guiadas e da sua dispersão se recomenda consultar Rose [2014].

Na Figura 7 se apresenta a modo de exemplo a curva de dispersão de uma placa isotrópica.

Apresentamos aqui dito conjunto de curvas como no domínio número de onda (k) vs frequência (ω) e velocidade de fase: $c_f = \omega/k$ vs freq. ω .

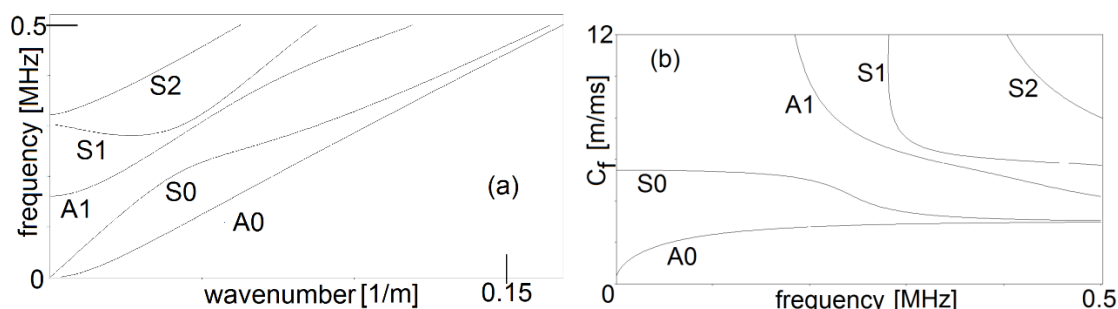


Figure 7: Curva de dispersão no domínio frequência vs k e velocidade de fase vs f para uma placa isotrópica de titânio de 10mm de espessura. Fonte: Groth 2016

(iii) *Atenuação por espalhamento e difração*: As perdas produzem reduções na amplitude da onda propagante por mudanças na direção de propagação, causadas pelo próprio material ou por discordâncias no núcleo da estrutura.

Quando uma onda propagante se encontra com imperfeições, mudança de seção, trincas ou complexidades geométricas, se produz o efeito de espalhamento ou difração. Assim, parte da energia da onda irá se separar do grupo principal.

(iv) *Atenuação por dissipação de energia*: Os meios de propagação não idealizados são ditos não conservativos, pois a energia mecânica, ora potencial, ora cinética, não é conservada durante a troca, o que gera uma atenuação na propagação de uma perturbação [Groth, 2016]. A atenuação devido a dissipação de energia por calor é essencial em qualquer meio. O fenômeno termoelástico está associado à deformação plástica, criando novas superfícies onde se propagam trincas ou movimentos de deslocamento de material [Eagle, 2005].

A viscoelasticidade também pode ser vista como uma forma de atenuação. Em materiais metálicos, para além dos efeitos viscoelásticos lineares, existem outros mecanismos de dissipação de energia, tais como a não-linearidade, a deformação plástica e o amortecimento associado ao atrito entre regiões internas do sólido chamado de amortecimento de Coulomb.

Para considerar o amortecimento viscoso basta assumir a força de amortecimento como diretamente proporcional a velocidade. Porém, nos sistemas oscilatórios reais, mesmo quando o amortecimento real é mais complexo que este, ainda assim é possível simplificar utilizando a

ideia de um amortecimento viscoso equivalente. Para um sistema de um grau de liberdade, cujo amortecimento não seja do tipo viscoso linear, pode-se definir um coeficiente de amortecimento viscoso equivalente:

$$C_{eq} = -\frac{W_D}{\pi\Omega U^2} \quad (2.19)$$

onde W_D é a energia dissipada pelo mecanismo de amortecimento não viscoso para um ciclo do movimento harmônico com frequência de excitação Ω .

O método do amortecimento viscoso equivalente tem sido usado para obter uma média desses efeitos.

Como dito no início dessa sessão, a atenuação da amplitude da onda se dá de forma exponencial, na qual α é o coeficiente de atenuação que pode estar em neper/m ou decibel/m. Na dissertação de Groth pode-se ver que quando o coeficiente é apresentado em neper, a amplitude do sinal é entendida como:

$$A = A_0 e^{-\alpha x} \quad (2.20)$$

2.3. Integração numérica explícita

Quando se aplica o método dos elementos finitos para simular a propagação de ondas no domínio do tempo, após a discretização espacial se chega a uma equação de movimento como a apresentada a seguir:

$$M\ddot{u} = P - I \quad (2.21)$$

onde M é a matriz de massa, u é a aceleração nodal, P são as forças externas e I são as forças internas.

A integração dessa equação no domínio do tempo pode ser realizada de duas formas diferentes, empregando métodos implícitos ou métodos explícitos. Estes são usados na análise numérica para obter soluções que dependam do tempo, isso normalmente é feito em simulações computacionais para processos físicos.

Para a análise estudada utilizou-se o método explícito empregado pelo LS-Dyna, caracterizado por calcular o estado do sistema num tempo posterior ao atual. A vantagem deste método é que permite a análise de estruturas hipostáticas.

A desvantagem do método é que o mesmo é condicionalmente estável para um incremento de tempo relativamente pequeno, este incremento crítico pode ser estabelecido por meio da expressão (2.19)

$$\Delta t_{m\acute{a}x} = \frac{L^e}{c_d} \quad (2.22)$$

onde $\Delta t_{m\acute{a}x}$ é o maior incremento de tempo de integração possível sem comprometer a estabilidade da solução, L^e é o tamanho do menor elemento e c_d é a maior velocidade de propagação da onda no sólido, definida como c_1 na expressão 2.18.

Propagação de ondas guiadas é um tema que tem tido grande desenvolvimento nos últimos anos, existem textos clássicos que tratam a propagação de ondas em estruturas laminares entre eles se destaca [Auld 1973], mas um livro onde se apresenta este tópico associado a sua aplicação em particular em ensaios não destrutivos é mandatório citar o livro de Rose[2014]. Publicações em revistas existem um volume enorme, nos limitamos aqui a citar dois que estão referidos a aplicação de ondas guiadas em materiais viscoelásticos que são o

trabalho clássico de [Lee and Kanter de 1953] e em [Bacon 1998]. Este tópico também é desenvolvido num dos capítulos do livro de Rose [2014].

No âmbito da UFRGS é possível citar a dissertação de mestrado de Groth 2016, o qual avalia o comportamento de ondas guiadas numa haste metálica numa faixa de frequências de 0 a 100kHz. Este trabalho foi utilizado como base do presente estudo e parte do mesmo será comentado a seguir. Também cabe mencionar os trabalhos de conclusão de curso defendidos no curso da Engenharia Mecânica da UFRGS, recentemente, Paulo Menin [2016], e Erik Radke [2016].

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Descrição do Ensaio

O teste foi realizado no LAMEF, Laboratório de Metalurgia Física da UFRGS, utilizando uma haste retangular de aço 1020 com seção transversal 15001x5x5 mm. Nesta haste foi acoplada num extremo uma cerâmica piezoelétrica que tem como função aplicar na barra uma excitação do tipo Tone Burst. A resposta é medida em termos de deslocamentos em determinadas regiões da barra com um vibrômetro Laser da marca Polytec. Na Figura 8 se apresenta um esquema de como foi realizado o ensaio e detalhe da cerâmica piezoelétrica fixada num extremo da haste. Após excitar a barra se mede o passo da onda pelo mesmo lugar da barra (ponto em roxo) com o objetivo de medir a atenuação total sofrida pela onda.

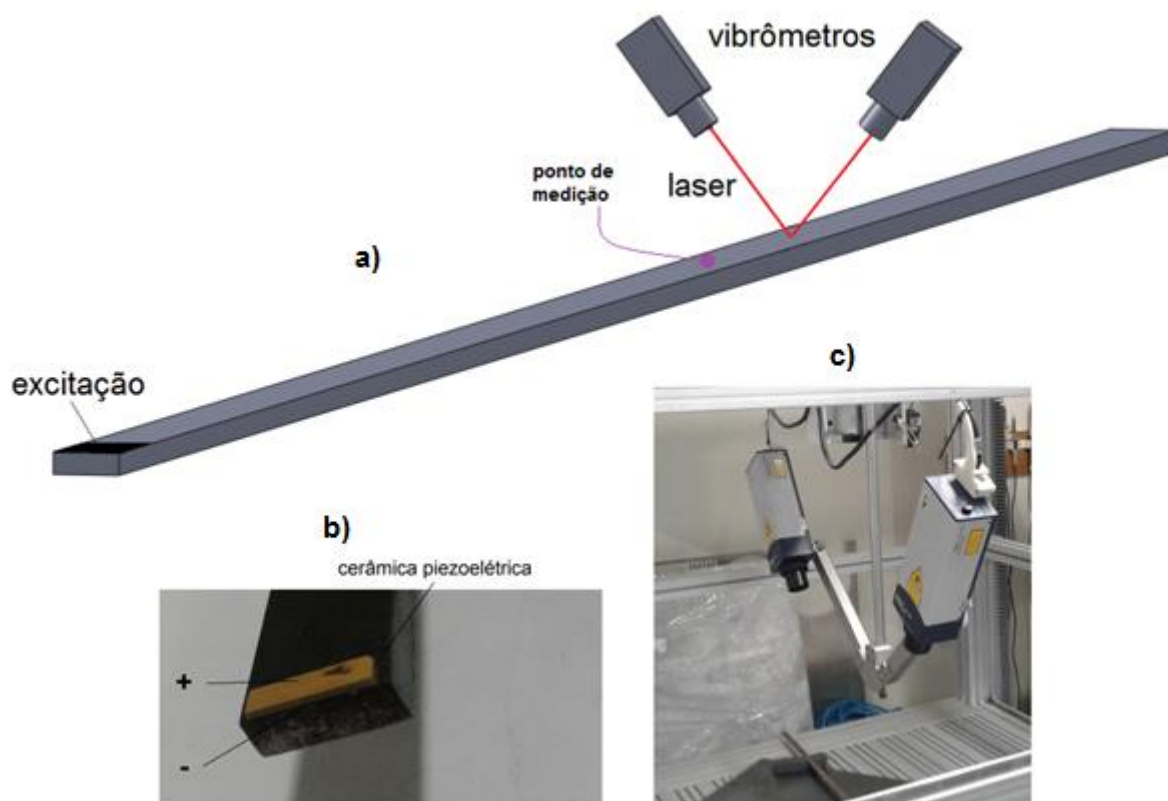


Figura 8: Ensaio sobre a haste metálica (a) esquema do ensaio, (b) detalhe da cerâmica piezoelétrica que permite introduzir a excitação. c) Detalhe dos medidores de deslocamento laser.

A excitação aplicada consiste numa forma que varia no tempo com uma função chamada Tone Burst, que consiste numa harmônica dentro de um envelope que pode ser uma harmônica de frequência menor ou uma função gaussiana, esta função permite introduzir excitações de curta duração nas estruturas com uma frequência definida. Na Figura 9 se ilustra a função Tone Burst utilizada no presente caso, ficando em evidência que se quer excitar a barra com uma força longitudinal excitando os 50kHz.

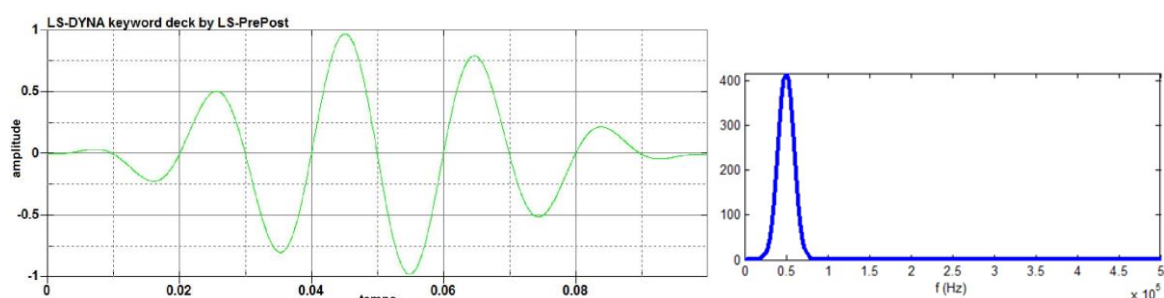


Figura 9. Função Tone Burst retirada da simulação.

3.2. Curva de dispersão da haste retangular

Em Groth [2016] foi realizado o cálculo das curvas de dispersão da haste metálica em estudo na faixa de frequências [0,100KHz]. Na Figura 10 se apresentam as mesmas em termos frequência (f) vs numero de onda (k) e em termos velocidade de fase (c) vs frequência (f), lembrando que $c=f/k$. Do lado de cada uma das curvas se apresenta um pequeno esquema que ilustra a forma da onda modal associada a cada curva. Ao analisar as curvas notam-se quatro modos de propagação. Essas quatro linhas que partem da origem chamam-se linhas fundamentais. Sendo A a curva de tração-compressão, as curvas B e D tem-se flexão e em C tem-se torção.

Note também que os modos A e C mantêm suas velocidades praticamente constantes para as diferentes frequências apresentadas, já os outros modos apresentam uma dependência da velocidade significativa da frequência.

Neste trabalho se deseja estudar a atenuação sofrida pelas ondas ao viajar na haste analisada.

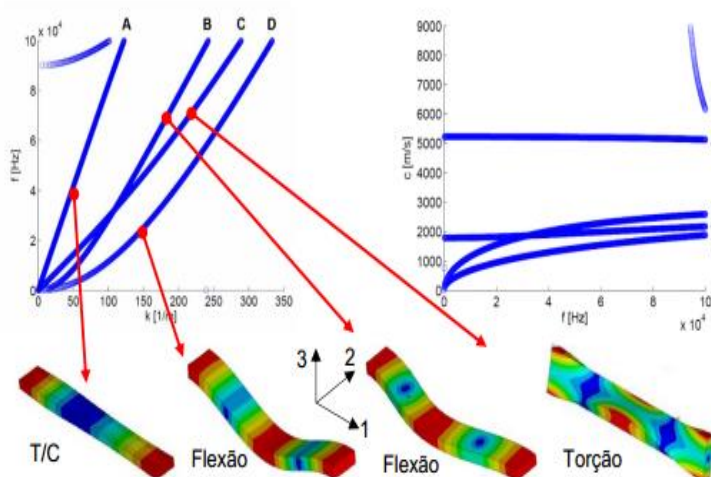


Figura 10. Curvas de dispersão. À esquerda números de onda vs. Frequência. À direita frequência vs. velocidade de fase. Abaixo, modos de propagação. (Fonte: Groth [2016]).

Quando se aplica sobre a haste uma excitação longitudinal tipo Tone Burst com uma frequência principal de 50 kHz, a mesma excita principalmente duas ondas modais (observe linha tracejada na Fig. 10 à direita), a onda modal associada a curva A e curva D. Na Figura 11 se pode também observar como as perturbações da onda A viajam como era esperado a uma velocidade maior que a onda D, sendo que esta diferença da velocidade produz o fenômeno chamado atenuação por dispersão mencionado na fundamentação teórica deste trabalho.

A curva de dispersão da haste retangular mostra que o modo longitudinal (curva A na Figura 10) possui uma atenuação por dispersão muito baixa, ver discussão em Graff [1975], como se vê na Figura 10 a direita, a curva indica que a velocidade praticamente não se modifica com a frequência. Em uma primeira análise o referido modo possui as melhores

característica de propagação para compor um ensaio não destrutivo, pois tem a menor dispersão e tem as maiores amplitudes de deslocamento no sentido da propagação e baixas amplitudes nos movimentos secundários, os chamados movimentos fora do plano de propagação. O modo longitudinal é indicado também para guias de onda que estão inseridos em meios de alta atenuação (concreto altamente aderido, por exemplo), pois a interação com o meio que envolve o guia de ondas é minimizada.

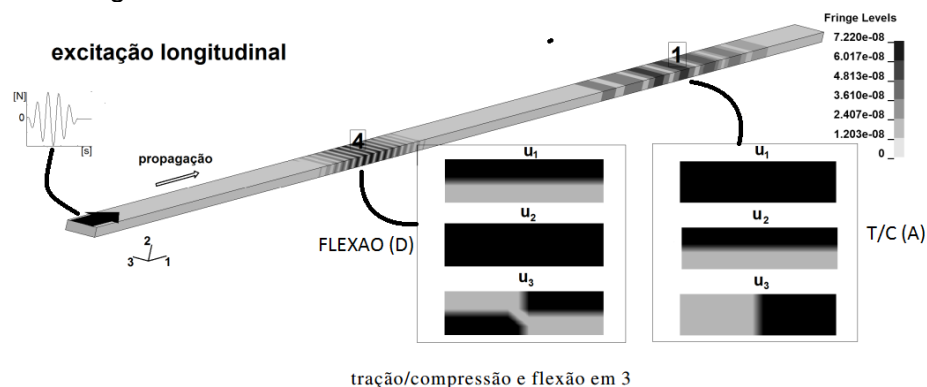


Figura 11: Esquema que mostra uma onda longitudinal se dispersando na sua propagação pela barra. (Fonte: Adaptada de Groth [2016])

Como se viu na fundamentação teórica no caso de considerar o comportamento viscoelástico do material implica em que vamos ter um tensor constitutivo viscoelástico (teríamos que generalizar a expressão 2.9) e ao construir as curvas de dispersão para cada frequência vamos ter associado um número de onda complexo. Como observa Rose [2014], o número de onda complexo se pode escrever:

$$k^* = k(\omega)' + i k(\omega)'' = k(\omega)' + i\alpha(\omega) \quad (3.1)$$

onde $k(\omega)'$ é o número de onda real, pode-se definir a velocidade de fase complexa

$$c_p^*(\omega) = [1/c_p(\omega) - i\alpha(\omega)/\omega]^{-1} \quad (3.2)$$

Na expressão anterior $c_p(\omega)$ representa a parte real da velocidade de fase medida da velocidade em que a onda se desloca no sólido, e α representa a atenuação relacionada a natureza viscoelástica do material estudado.

Como ilustrações se apresentam a continuação os modos SH de uma placa viscoelástica, estes modos se propagam na direção da guia de ondas e a o modo acusa movimento na outra direção propagante.

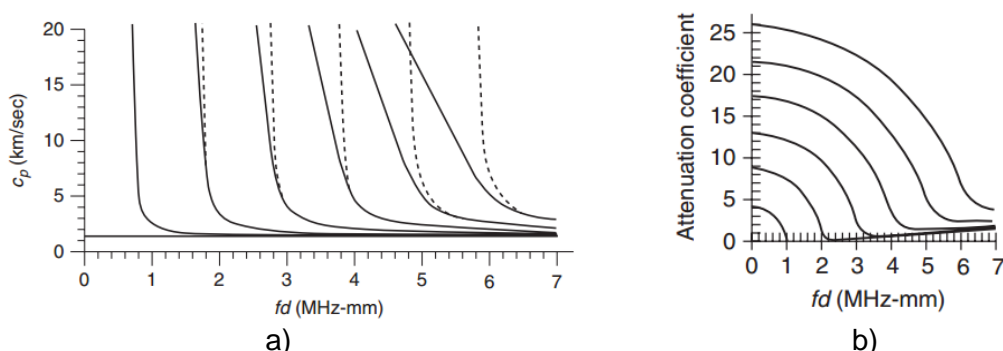


Figura 12: Curva de dispersão das ondas SH, de uma placa isotrópica viscoelástica, a) curva em termos da parte real da velocidade de fase C_p vs a frequência x espessura da placa (linha contínua e da placa isotrópica viscoelástica, linha tracejada e da placa isotrópica elástica, b) atenuação relacionada com a natureza viscoelástica do material α vs frequência.

Para o caso da viga retangular em análise se fosse considerada viscoelasticidade também teríamos para cada valor de frequência um número de onda complexo, e curvas similares as apresentadas na Figura 12 poderiam ser computadas.

3.3. Simulação

A simulação numérica do teste realizado e feito no software LS-DYNA que permite realizar uma análise de elementos finitos para realizar a discretização espacial e utiliza um esquema de integração explícita para realizar a integração no tempo.

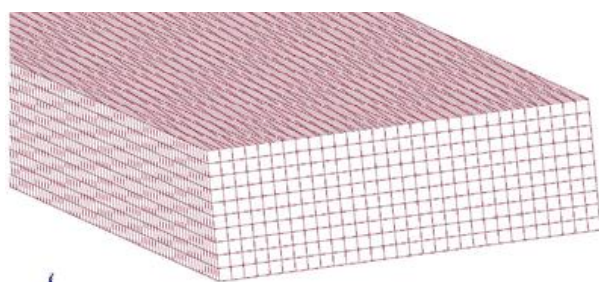
O programa resolve a equação de movimento abaixo indicada:

$$Mx'' + Cx' + Kx = F \quad (3.3)$$

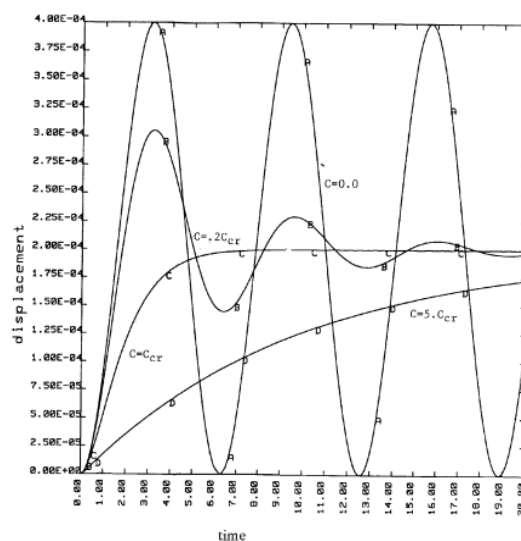
onde x'' , x' e x representam a aceleração, velocidade e deslocamento respectivamente. M representa a matriz de massa, C o amortecimento viscoso, e K a matriz de Rigidez, x representa o vetor de deslocamentos, e F o vetor das forças externas.

A haste foi discretizada com elementos finitos hexaédricos, um detalhe da discretização utilizada se apresenta na Figura 13 a), com o tempo de 0,01s. Na Figura 13 b) se apresenta como o amortecimento viscoso modifica a oscilação de um sistema de um grau de liberdade. Se apresentam na figura diversos casos de amortecimento tomando como referência o chamado amortecimento crítico C_{cr} que se pode obter num sistema de um grau de liberdade como $C_{cr} = (m * rigidez)$, onde m representa a massa associada a dito sistema. Se o amortecimento introduzido no sistema for maior ou igual que o crítico o sistema perde energia sem vibrar, se o amortecimento introduzido for menor que o crítico o sistema perde energia atenuando a magnitude de vibração em cada ciclo. Maiores informações sobre este particular se pode encontrar em textos clássicos de vibrações como o Dimarogonas [1996]. O Sistema LS-DYNA permite introduzir o amortecimento como uma fração do amortecimento crítico com o comando CDAMP, associando dito coeficiente a uma frequência preferencial, neste caso foi adotada a frequência de $FREQ=50kHz$.

Esta modalidade de aplicar amortecimento se denomina no programa de Relative Damping. O sistema é amortecido se excitado em outros modos, mas na frequência indicada o amortecimento será o determinado. Desta forma, deve-se considerar o modelo com viscoelasticidade segundo o modelo de Kelvin (ver Figura 4.b), onde se pode especificar o coeficiente de atenuação na frequência relacionada.



a)



b)

Figura 13: Detalhe do modelo discretizado. Curvas que ilustram como um sistema de um grau de liberdade amortece.

Para a análise da atenuação na haste estudada, foi desenvolvida uma simulação. Esta contém a haste engastada em uma extremidade e na outra extremidade será aplicada uma força com uma frequência de 50kHz. Essa força representa o modo longitudinal e será aplicada como mostra a Figura 14, onde também é possível ver a tensão de Von Mises se propagando na haste.



Figura 14. Simulação Numérica, ilustração da onda viajando sobre a haste em termos de tensões de Von Mises.

4. RESULTADOS

4.1. Medições

O ensaio analisado neste trabalho foi desenvolvido no LAMEF. Foi utilizada uma bancada experimental onde o sensor piezoelétrico excita a frequência oscilatória, o laser coleta o sinal e por fim, esses dados coletados foram processados via MATLAB e chegando-se ao seguinte gráfico da amplitude do sinal de atenuação, cabe salientar que se esta medindo aqui a atenuação devida a todos os efeitos interagindo (viscoelasticidade, dispersão e etc). Para melhor entendimento gerou-se o gráfico de atenuação no espaço, Figura 15 (b). Para fazer essa transformação do tempo para o espaço utilizou-se entre eles a relação de velocidade, ou seja, multiplicou-se cada ponto no tempo pela velocidade que se mantém praticamente constante.

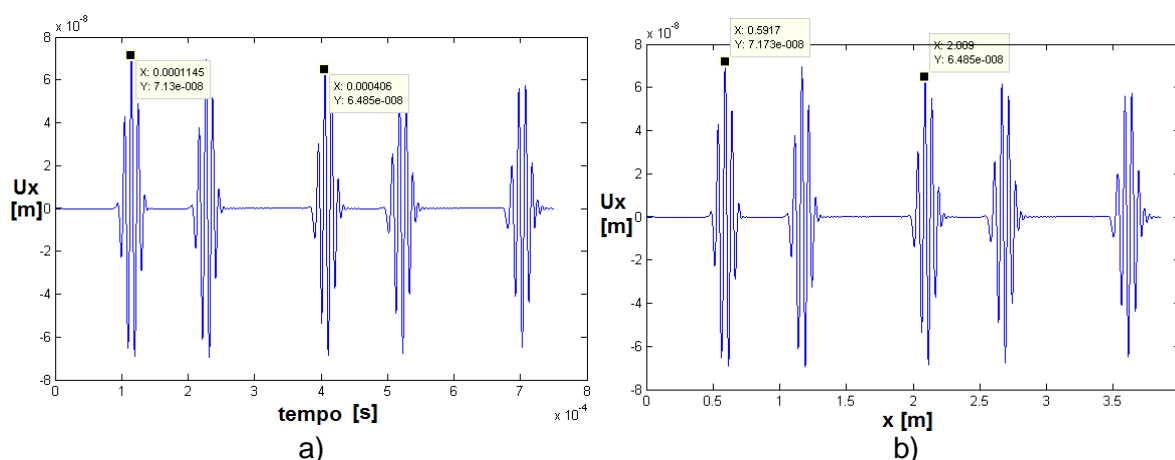


Figura 15. Resultados Experimentais, onde se ilustra como a onda vai atenuando quando se translada no tempo e no espaço.

A frequência de aquisição do gráfico gerado é de $2e6$ pontos por segundo. Com base na figura obtida é possível calcular utilizando a equação (2.20), o coeficiente de atenuação da barra levando em consideração todos os tipos de atenuação citados anteriormente e também a viscoelasticidade do material.

$$A_1 = A_0 e^{-\alpha x_1} \quad (4.1)$$

$$A_2 = A_0 e^{-\alpha x_2} \quad (4.2)$$

Isolando A_0 na equação 4.2 e substituindo na equação 4.1, tem-se $\frac{A_1}{A_2} = e^{\alpha(-x_1+x_2)}$, ou seja, $\alpha = -0,0633$ neper/m.

Como dito em seções anteriores, o decaimento da atenuação ocorre de forma exponencial, e isso se comprova pela Figura 16:

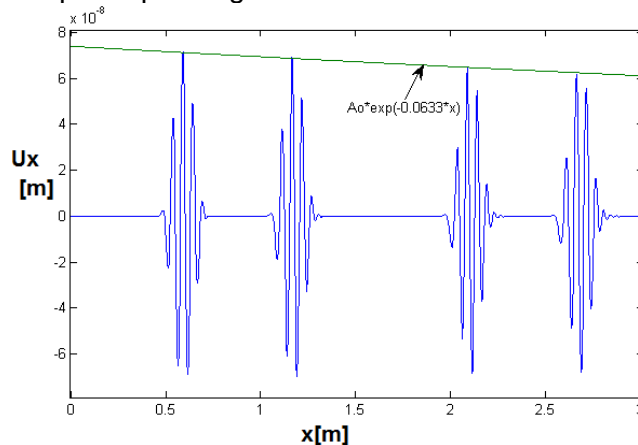


Figura 16. Decaimento da atenuação no ensaio experimental.

4.2. Modelo Numérico

No primeiro modelo simulado não foi considerado o efeito viscoelástico. A única fonte de atenuação nesse caso foi a dispersão, uma vez que a atenuação geométrica não ocorre em frentes de onda plana e também não ocorre espalhamento e difração pois não há nenhuma anomalia (defeito) no guia de ondas. Obtendo-se os resultados apresentados a seguir:

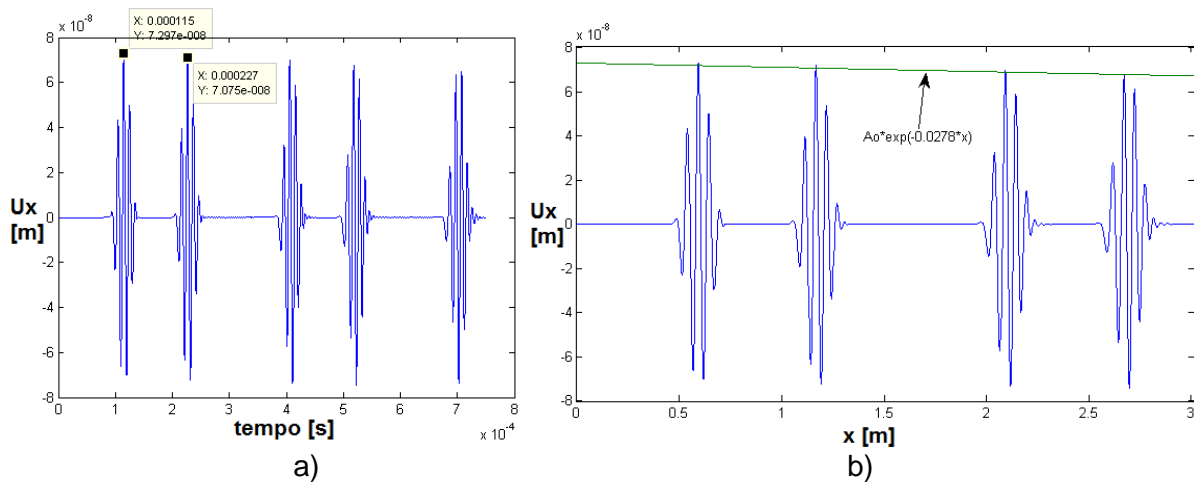


Figura 17. Atenuação sem amortecimento viscoso

Com base nessa figura e seguindo o passo a passo das equações 4.1 e 4.2, pode-se encontrar o coeficiente de atenuação para esse caso, $\alpha = -0,0278$ neper/m.

Na Figura 17 (b) tem-se a curva de decaimento da atenuação no espaço. A atenuação obtida corresponde a curva A da Figura 10 a qual apresenta uma atenuação devida a dispersão muito pequena imperceptível na figura mais conhecida pelas observações de autores respeito a propagação de ondas em vigas entre eles Graff [1975].

Para considerar o amortecimento no LS-DYNA foi considerado como explicada na seção da metodologia a modalidade DAMPING-RELATIVE considerando um amortecimento (fração do amortecimento crítico de 0.4%), introduzido como parâmetro CDAMP, e forçando a frequência na qual este amortecimento atua seja de 50kHz (frequência principal da função Tone Burst da excitação). Por tentativa e erro se chegou a estes valores para realizar a calibração do modelo com os resultados experimentais. Na figura 18 se apresentam os resultados obtidos. Seguindo novamente os passos das equações 5.1. e 5.2, encontra-se o resultado para o coeficiente de atenuação de - 0,68 neper/m.

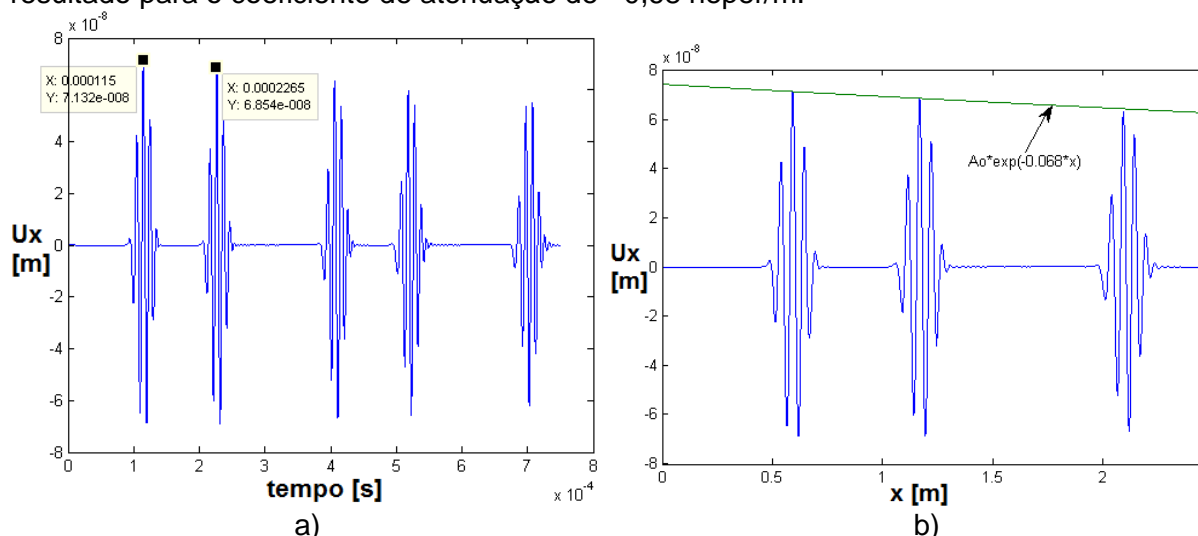


Figura 18. Resultados Numéricos obtidos considerando o amortecimento viscoso.

5. CONCLUSÃO

No presente trabalho se calculou a atenuação na propagação de ondas numa haste metálica prismática. Para isso se analisaram resultados experimentais, nos quais uma haste foi ensaiada determinando a atenuação produzida durante a propagação de uma onda longitudinal sobre ela. Foi também realizada a calibração de um modelo numérico para poder simular a propagação de ondas na haste considerando a sua atenuação devida a dispersão e ao comportamento viscoelástico da mesma. Para a realização do trabalho foi necessário compreender conceitos que estão fora do curriculum normal de cursos de engenharia mecânica. No transcurso do trabalho foi possível obter as seguintes conclusões.

- Na simulação da haste metálica sem considerar o modelo como viscoelástico foi possível observar que ainda sendo o modo longitudinal pouco dispersivo este apresenta uma atenuação mensurável.
- No ensaio realizado foi possível determinar uma atenuação total (dispersão + viscoelasticidade do material) de 0.068 e este valor é aproximadamente 3 vezes maior que a atenuação obtida por dispersão.
- O valor de amortecimento adotado para calibrar o modelo numérico (razão de amortecimento crítico de 0.4%) é usualmente utilizado em estruturas metálicas para levar em conta o comportamento viscoso que este tipo de estruturas pode ter quando vibram. Ver [Dimaragons, 1996].

Como continuação deste trabalho se pretende calcular as curvas de dispersão da haste metálica levando em conta a suas características viscoelásticas, e verificar experimentalmente se em outros modos de vibração a atenuação se comporta como esperado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

Bacon, C., “**An Experimental Method for Considering Dispersion and Attenuation in a Viscoelastic Hopkinson Bar**” *Journal Experimental Mechanics*, Vol. 38, No. 4, December 1998.

Dimaragonas, A., “**Vibration for Engineers**”, segunda edição, Washington University, 1996.

dos Santos, M. J. F. “**Ondas ultra-sonoras guiadas na caracterização e controlo não destrutivo de materiais**”. Doutorado, Universidade de Coimbra, 2008.

Eagle, D. M., “**Acoustic Emission Testing**”, volume XI of Nondestructive Testing Handbook, chapter Fundamentals of Acoustic Emission Testing. American Society for Nondestructive Testing, Columbus U.S.A., 3rd edition, 2005.

Graff, K. F. “**Wave Motion in Elastic Solids**” volume I. Dover Publications, New York U.S.A, 1975.

Groth Ed. 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.

Lee, E. H., Kanter, I., “**Wave Propagation in Finite Rods of Viscoelastic Material**” Citation: *Journal of Applied Physics* 24, 1115, 1953.

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

MATLAB®, “**Documentation**”, The MathWorks Inc, 2015.

Menin, P. D.; “**Análise da propagação de ondas guiadas em estruturas com uma dimensão predominante**”, Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de 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**”, 3rd edition, American Society for Nondestructive Testing, 2005.

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

Rose, J. L., “**Ultrasonic Guided Waves in Solid Media**”, volume 1. Cambridge University Press, 2014.