

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

ANÁLISE ESTRUTURAL DE TUBULAÇÕES COM REVESTIMENTO POLIMÉRICO
ATRAVÉS DE SUAS PROPRIEDADES ELASTODINÂMICAS

por

Kelly Robert-Svendsen Rassier

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 Engenheira Mecânica.

Porto Alegre, Maio de 2021.

Kelly Robert-Svendsen Rassier

ANÁLISE ESTRUTURAL DE TUBULAÇÕES COM REVESTIMENTO
POLIMÉRICO ATRAVÉS DE SUAS PROPRIEDADES ELASTODINÂMICAS

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
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Mário Roland Sobczyk Sobrinho
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Mecânica dos Sólidos**

Orientador: Prof. Ignacio Iturrioz

Co-Orientador: Boris N. Rojo Tanzi

Comissão de Avaliação:

Prof. Prof. Rogério José Marczak

Prof. Prof. Rodrigo Rossi

Prof. Ignacio Iturrioz

Porto Alegre, Maio de 2021.

RESUMO

Na indústria de petróleo offshore é comum o uso de tubos com camadas internas de aço anticorrosivo, mecanicamente ou metalurgicamente unidas com a parte interna de aço, ou com uma camada externa construída com um material polimérico para mitigar cargas de impacto durante sua vida útil. É útil conhecer a interação entre as diferentes partes desses tubos para entender seu comportamento mecânico em condições distintas e monitorar sua integridade usando alguns métodos não destrutivos como os baseados na propagação de ondas como emissão acústica e ultrassom. No presente contexto, estuda-se a configuração de um tubo de aço com revestimento externo polimérico, computando-se o gráfico da curva de dispersão que caracteriza sua resposta elastodinâmica. Duas metodologias numéricas são utilizadas para construir as curvas de dispersão, ambas implementadas nos pacotes de elementos finitos comerciais usuais, sendo a primeira baseada na análise modal de um modelo axissimétrico e a outra realizada utilizando condições de contorno periódicas sobre um modelo 3D. Também é realizado um modelo de análise explícita da estrutura estudada, utilizando uma onda transiente com uma frequência de excitação definida. A resposta desta simulação é registrada sobre uma série de pontos da estrutura durante um intervalo de tempo. A resposta assim registrada foi adicionada no domínio frequência versus número de onda, sobrepondo às curvas de dispersão calculadas. A discussão dos resultados experimentais apresentados permite entender como a camada polimérica e o tubo de aço interagem frente a ondas com diferentes frequências características.

PALAVRAS-CHAVE: Ondas guiadas; Polímeros; ensaios não destrutivos; propagação de ondas em dutos.

ABSTRACT

In the offshore oil industry is usual to use pipes with internal anti-corrosion steel alloy layers mechanically or metallurgically joined with the back steel part, or an external layer built with a polymeric material to mitigate impact loadings during the structural life cycle. It is useful to know the interaction between the different parts of these pipes to understand its mechanical behavior in distinct conditions and to monitor its integrity using some non destructive methods like the ones based on wave propagation as acoustical emission. In the present context, a configuration of a steel pipe with an external polymeric coat is studied, computing the dispersion curve chart that characterizes its elastodynamic response. Two numerical methodologies are used to build the dispersion curves, both implemented in the usual commercial finite element packages, being the first one based on the modal analysis of an axisymmetric model and the other performed using periodic boundary conditions over a 3D model. An explicit analysis model of the studied structure is also carried out, excited using a transient wave with a defined excitation frequency. The response of this simulation is recorded over a series of points in the structure over a period of time. The response thus recorded was transformed to the frequency domain wave number superimposing it on the calculated dispersion curves. The discussion of the experimental results presented allows us to understand how the polymeric layer and the steel tube interact in front of waves with different characteristic frequencies.

KEYWORDS: Guided waves; Polymers; non-destructive testing; wave propagation in pipelines.

ÍNDICE

INTRODUÇÃO	6
1. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	9
2. METODOLOGIA	10
2.1. CURVAS DE DISPERSÃO	10
2.2. VERIFICAÇÃO DAS CURVAS DE DISPERSÃO ACHADAS	12
2.3. MODELOS ANALISADOS	13
3. RESULTADOS	14
3.1. ANÁLISE DAS CURVAS DE DISPERSÃO PARA AS DIVERSAS CONFIGURAÇÕES ESTUDADAS	14
3.2. EXCITAÇÃO DA GUIA DE ONDAS	17
4. CONCLUSÃO	19
BIBLIOGRAFIA	20
APÊNDICE A	21
APÊNDICE B	22
ANEXO A	23

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Materiais	13
Tabela 2 - Diâmetros dos casos estudados.	13

LISTAS DE FIGURAS

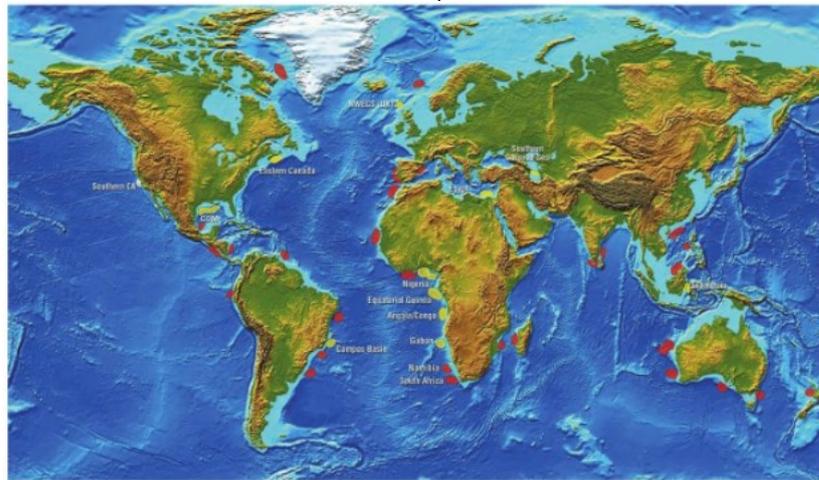
Figura 1 - Exploração de petróleo em águas profundas. Regiões com jazidas de alto potencial indicados em cor vermelha sobre o mapa.	6
Figura 2 - (a) Curva de pressão de colapso versus variação do volume interno dentro da tubulação. (b) Configuração final numa tubulação colapsada por pressão externa. (c) Esquema que mostra como se pode produzir a pressão de propagação (d) duas configurações típicas de colapso devido a pressão de propagação numa tubulação com algum tipo de imperfeição.	7
Figura 3 – (a) Ensaio por ultrassom convencional com excitação normal à viga. (b) Inspeção por ondas guiadas com excitação angular na viga.	8
Figura 4 - Ondas num meio infinito (a) Ondas-P. (b) Ondas de corte S.	9
Figura 5 - (a) Axissimétrico, (b) Malha de axissimétrico, (c) Periódico, (d) Malha periódico.	11
Figura 6 – (a) Esquema do modelo de dinâmica explícita com a excitação e representação dos nós (linha vermelha) no qual foi realizado o processamento dos dados com a FFT-2. (b) Malha utilizada no modelo de dinâmica explícita.	12
Figura 7 - (a) Polímero (b) Aço (c) Aço Polímero 1, Aço Polímero 2 e Aço Polímero 3 (d) Aço Polímero multicamadas.	13
Figura 8 – $f \times k$ e $v \times f$ para os casos Aço, Polímero e Aço Polímero 1.	15
Figura 9 - Curvas de dispersão de diversas configurações testadas onde as ondas longitudinais e torção são apresentadas em forma isolada. Também as velocidades de Raleigh do polímero e aço são colocadas em evidência.	15

Figura 10 - Curvas de dispersão de diversas configurações testadas onde as ondas de flexão e Lamb são apresentadas em forma isolada. Também as velocidades de Raleigh do polímero e aço são colocadas em evidência.....	16
Figura 11 - Curvas de dispersão no domínio $f \times k$ e os modos 3D para três valores de número de onda.....	17
Figura 12 - (a) Distribuição espacial do modo e indicação de onde a onda Tone Burst é medida (b) distribuição da energia elástica (c) distribuição da energia cinética no aço e no polímero (d) Curvas de dispersão e amplitude do deslocamento para a excitação de 0.5 kHz de frequência característica.	17
Figura 13 - (a) Distribuição espacial do modo e Indicação de onde a onda Tone Burst é medida (b) distribuição da energia elástica (c) distribuição da energia cinética no aço e no polímero (d) curvas de dispersão e amplitude do deslocamento para a excitação de 1,0 kHz de frequência característica .	18
Figura 14 - (a) Distribuição espacial do modo (c) distribuição da energia elástica (b) distribuição da energia cinética no aço e no polímero (d) curvas de dispersão e amplitude do deslocamento para a excitação de 1,7 kHz de frequência característica.	19
Figura 15 - Aço Polímero multicamada.....	21
Figura 16 - Modelo 2D e 3D para $f \times k$ de $y=(2)$	22
Figura 17 - Transformada de Fourier.	23

INTRODUÇÃO

O petróleo é um dos recursos naturais não renováveis mais empregados atualmente, tendo várias aplicações no nosso cotidiano. Com os avanços tecnológicos, tornou-se possível descobrir e explorar poços de petróleo em locais cada vez mais profundos, como pode ser visto na Figura 1, o que fez a exploração do petróleo e do gás natural tornar-se mais desafiadora devido as crescentes profundidades de operação. A Figura 1 indica em vermelho as regiões onde foram descobertas jazidas de hidrocarbonetos a grandes profundidades, com um potencial econômico enorme.

Figura 1 - Exploração de petróleo em águas profundas. Regiões com jazidas de alto potencial indicados em cor vermelha sobre o mapa.



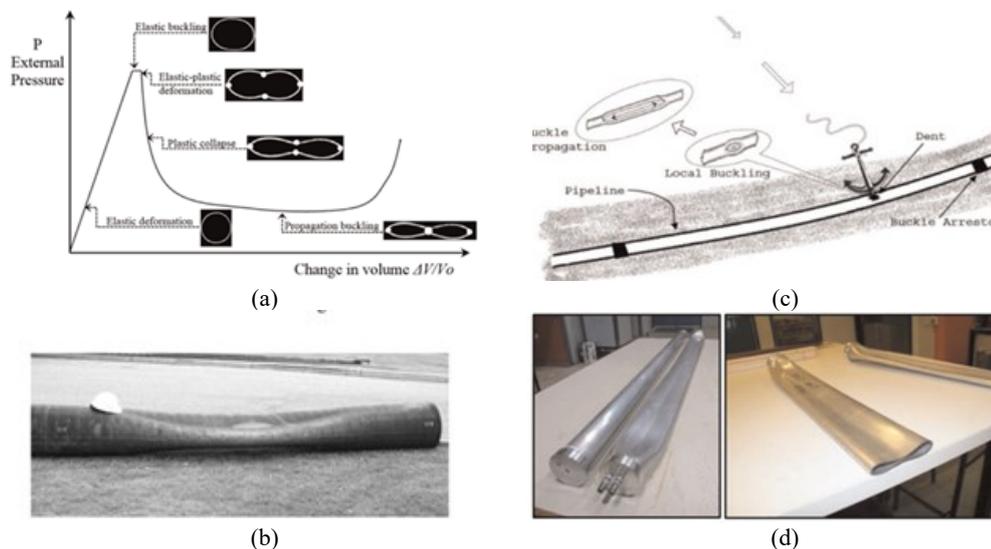
Fonte: (Kyriakides & Corona, 2007).

Para preservar a temperatura do fluxo de fluido, impedindo assim a formação de precipitados de hidrocarbonetos e a perda de pressão, os oleodutos costumam ser revestidos com camadas de revestimento polimérico isolante (Vestrum, Sture Hopperstada, Edvard Blystad Dæhli, & Børvikab, 2019). A cobertura com polímero também tem a função de proteger a tubulação frente a impactos acidentais evitando o surgimento e propagação de ondas de colapso. Durante os últimos anos vem se tornando frequente na engenharia o uso de dutos rígidos multicamadas para extração e transporte de petróleo, são estruturas compostas que contém camadas metálicas e poliméricas com distintas funções. O aço confere à tubulação resistência às altas pressões do fundo do mar e o polímero provê isolamento térmico para manter a temperatura do óleo e do gás evitando que solidifiquem e bloqueiem a tubulação. Dutos rígidos podem ser considerados elementos tubulares esbeltos feitos de aço, podendo ser de titânio em alguns casos específicos. Este tipo de duto tem sido empregado na exploração em águas profundas, pois possuem, usualmente, grande rigidez e resistência a cargas axiais, radiais e de flexão. No entanto, são

mais suscetíveis à falha por fadiga quando submetidos a carregamentos cíclicos devidos à onda e aos movimentos oscilatórios produzidos pela água.

A interação entre as diversas camadas que compõem a tubulação e como elas influenciam em seu funcionamento mecânico, não é trivial e tem sido tema de numerosas pesquisas, tanto experimentais como teóricas. A principal solicitação durante a operação destas tubulações é a pressão externa produzida pela coluna hidrostática. Outro cenário crítico é a propagação da flambagem que acontece sob um nível de pressão externa menor numa tubulação que tenha algum defeito localizado. Na Figura 2 são ilustrados estes tipos de colapsos.

Figura 2 - (a) Curva de pressão de colapso versus variação do volume interno dentro da tubulação. (b) Configuração final numa tubulação colapsada por pressão externa. (c) Esquema que mostra como se pode produzir a pressão de propagação (d) duas configurações típicas de colapso devido a pressão de propagação numa tubulação com algum tipo de imperfeição.

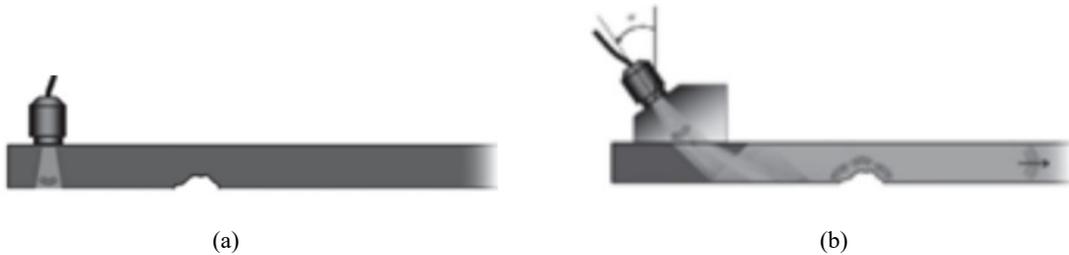


Fonte: (Kyriakides & Corona, 2007)

A propagação de ondas em sólidos é amplamente utilizada na indústria para a realização de ensaios não destrutivos com o objetivo de detectar defeitos em estruturas, no caso em que pelo menos uma das dimensões é muito maior que as demais, as dimensões finitas da estrutura condicionam o tipo de ondas que podem propagar. O estudo de tipos de ondas guiadas permite entender como a estrutura em questão se comporta. Ondas guiadas podem se propagar por dezenas de metros e tornam financeiramente viável inspecionar áreas de difícil acesso. O estudo dos tipos de ondas que se propagam em um sólido depende das particularidades da dimensão finita do guia de onda, ou seja, da sua seção transversal. O conhecimento do comportamento das ondas através de uma determinada Seção permite construir sensores que possam através da excitação de ondas guiadas detectarem falhas nas estruturas e prevenir futuros colapsos. Na Figura 3 há dois esquemas um no qual a aplicação de ultrassom em forma convencional e a

outra a aplicação baseada na propagação de ondas guiadas. A figura deixa evidente como esta segunda alternativa é eficiente por abranger um domínio espacial maior e permitir a propagação de ondas em regiões sem acesso direto.

Figura 3 – (a) Ensaio por ultrassom convencional com excitação normal à viga. (b) Inspeção por ondas guiadas com excitação angular na viga.



Fonte: adaptado de (Rose 2014)

A informação antes apresentada contextualiza o presente trabalho, sendo descritos os objetivos do mesmo:

Objetivo Geral: Estudar a propagação de ondas de uma tubulação metálica com revestimento polimérico.

Objetivos específicos:

- (i) Calcular as curvas de dispersão da estrutura objeto de estudo utilizando duas metodologias.
- (ii) Numa análise de dinâmica explícita, enviar uma onda com energia em uma frequência específica e verificando como a mesma viaja no domínio das curvas de dispersão calculadas.
- (iii) Discutir os resultados visando compreender a interação entre o polímero e o aço da tubulação composta.

Este trabalho está organizado em cinco seções. Após a presente introdução, onde foi apresentado a motivação e os objetivos do trabalho, a Seção 2, contém a fundamentação teórica, onde são discutidas as principais chaves teorias nas quais o estudo é embasado e se propõem a ajudar na interpretação dos dados e na discussão dos resultados. A Seção 3 contém a metodologia utilizada para encontrar os resultados que são apresentados na Seção 4. Finalmente na Seção 5 se apresenta as conclusões tiradas da interpretação dos resultados e as considerações finais, assim como as possíveis respostas para o problema apresentado na introdução do presente trabalho.

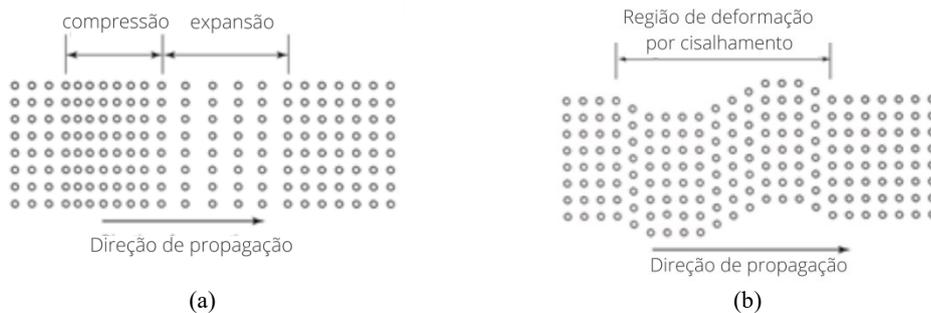
1. Fundamentação Teórica

Propagação de ondas em um meio infinito: O meio de propagação é dito infinito quando o comprimento de onda (L_λ) é muito inferior às dimensões da seção transversal do corpo pelo qual essa onda atravessa. Em um meio considerado infinito as ondas mecânicas podem ser divididas em velocidade de propagação longitudinal e transversal, as Equações 1 e 2 determinam respectivamente essas velocidades de propagação, onde λ e μ são as constantes elásticas de Lamê. A Figura 4 exemplifica o movimento das ondas.

$$c_1 = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad (1)$$

$$c_2 = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (2)$$

Figura 4 - Ondas num meio infinito (a) Ondas-P. (b) Ondas de corte S.



Fonte: adaptado de (MOORE, 2005).

No caso de o meio semi-infinito, ou seja, no caso de ter uma superfície livre, a interação das ondas P e S com a superfície livre induz a aparição de outros tipos de ondas, a mais popular é a chamada onda de Raleigh, que tem velocidade e distribuição espacial que a caracteriza. Se as dimensões do meio de propagação se aproximam do comprimento de onda (L_λ), o meio passa a ser finito e, nesse caso, os fenômenos de reflexão e refração das ondas afeta a propagação passando o meio a ser dispersivo. Quando o meio de propagação deixa de ser infinito, as ondas interagem com a superfície do material, gerando ondas que são combinações lineares das ondas modais, e suas características estão diretamente ligadas a geometria da estrutura analisada, no caso dessa geometria ter al menos uma dimensão infinita ela é chamada de guia de ondas. Para analisar as ondas que propagam numa guia de ondas é possível construir famílias de curvas chamadas de curvas de dispersão.

Atenuação de ondas mecânicas: A atenuação das ondas em relação ao meio pelo qual esta se propaga é decorrente de vários fatores, os principais são citados abaixo:

- **Atenuação geométrica:** Ocorre em propagações onde a área da frente de onda aumenta à medida que a onda se afasta do ponto de emissão. Como a energia da onda é constante, ela se redistribui na frente de onda fazendo com que a amplitude dos deslocamentos causados pela onda diminua conforme a frente se afasta do ponto emissor.

- **Atenuação por dispersão:** A dispersão é causada pela dependência da velocidade de propagação da onda com a sua frequência e esta diretamente ligada à propagação em meios finitos, onde pelo menos uma dimensão predomina sobre as outras duas. Em domínio infinito as ondas de volume e de corte propagam-se a velocidades que são propriedades características do material, mas no caso de estruturas finitas, além das ondas P e S, a interação das ondas propagantes com as fronteiras do sólido faz com que apareçam diversos tipos de ondas.

- **Atenuação por espalhamento e difração:** As reduções na amplitude da onda propagante ocorre por causa de mudanças na direção de propagação, causadas pelo próprio material ou por discordâncias no núcleo da estrutura.

- **Atenuação por dissipação de energia:** Em meios de propagação não ideal, ditos não conservativos, há a perda de energia durante a conversão da forma de energia, ora potencial ora cinética. Em alguns materiais, como os metais, há perda de energia durante deformações plásticas e devido à interação da onda com trincas e discordâncias, de forma que as ondas perdem energia ao interagir com tais discontinuidades.

- **Reflexões de ondas:** Ao encontrar uma mudança no meio de propagação a onda pode ser refletida e/ou transmitida para o outro meio, podendo assim alterar seu modo de propagação. Quando uma onda mecânica que é transmitida através de um sólido encontra uma fronteira a onda é decomposta em duas ondas, uma longitudinal e uma transversal, independentemente da forma da onda original.

2. METODOLOGIA

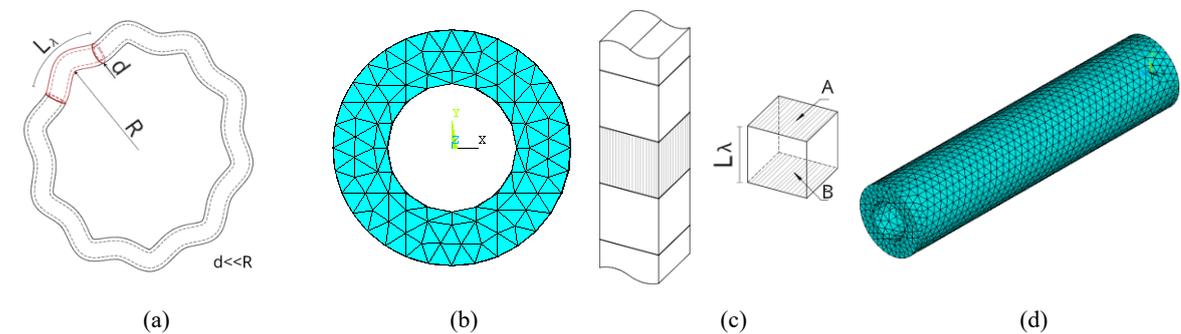
Paradoxalmente a modelagem de ondas guiadas em estruturas 1D como é o caso das hastes, é mais complicada que a modelagem de estruturas com duas dimensões infinitas como nas placas (Wilcox P., 2002). A análise teórica da ação de ondas em tubos circulares não é feita de forma trivial, por isso o presente trabalho foi feito com base em análises numérico computacionais, utilizando os métodos axissimétrico e periódico apresentados a seguir.

2.1. Curvas de dispersão

A metodologia SAFE (Semi Analytical Finite Element Method) utilizada para criar as curvas de dispersão foi o modelo proposto por Wilcox, implementada no software comercial Ansys,

onde se 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 P., 2002). O Ansys foi utilizado para a implementação do método SAFE, pelo modelo axissimétrico, que consiste em especificar a quantidade de comprimentos de onda com que a estrutura está sujeita a vibrar, considerando o guia de onda como um modelo axissimétrico em forma de aro, conforme a Figura 5a.

Figura 5 - (a) Axissimétrico, (b) Malha de axissimétrico, (c) Periódico, (d) Malha periódico.



Fonte: Elaborado pelo autor.

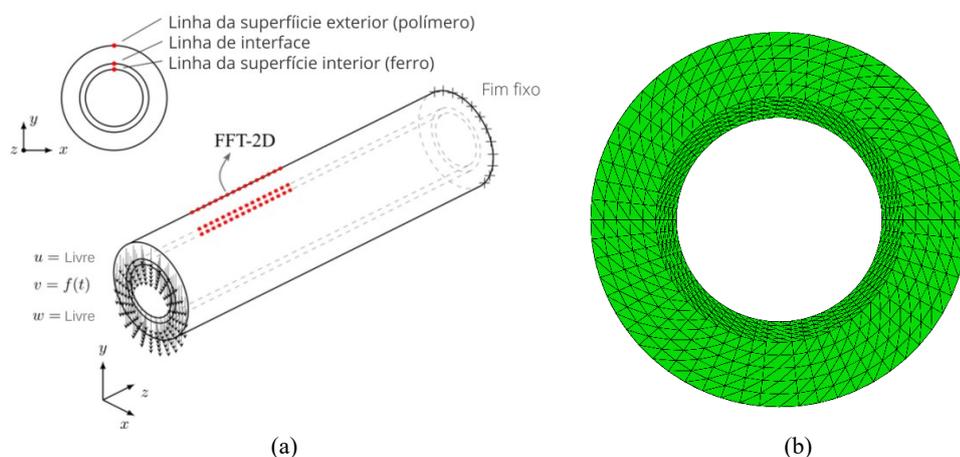
A seção do guia de ondas será a seção transversal do aro, que possui um raio muito maior que as dimensões da seção transversal da guia, por esta razão é possível assumir que as ondas que viajam por este perfil se comportam da mesma maneira que uma estrutura reta. Para a análise estudada o raio do guia de onda considerado é de 5000 m, muito maior que as dimensões da seção transversal que possui um raio externo da ordem de 300 mm. Foram introduzidas sobre as geometrias estudadas uma malha com elementos tetraédricos bilineares de 5 mm, como pode ser visto na Figura 5b. Os dados gerados no Ansys sobre a dispersão das ondas guiadas nas tubulações foram graficados através do software MATLAB, que gerou os gráficos das curvas de dispersão utilizadas neste trabalho. No presente trabalho o método das condições periódicas, foi implementado para gerar modelos 3D da estrutura, que facilitam a visualização dos efeitos dos modos de ondas sobre os dutos. Este método foi originalmente implementado por (Soroohan, 2011), ele consiste em modelar em elementos finitos uma porção do guia de onda, como mostrado na Figura 5c, sobre as faces A e B são aplicadas as condições de contornos periódicas, essas condições de contorno fazem o acoplamento entre os deslocamentos das faces, para que essas tenham um deslocamento igual em módulo, mas em sentido contrário (Groth, 2016). As condições de contorno periódicas são aplicadas no modelo nó a nó. Na Figura 5d se apresenta a malha utilizada empregando elementos tetraédricos de seis nós lineares, com uma discretização de $lc = 5$ mm de lado. Este tamanho de elemento permite modelar com

comprimento de ondas com uma aproximação razoável de $L_\lambda \geq 10 lc = 0.05$ m que corresponde a um número de ondas, $k = 2\pi/L_{\lambda min} = 125$ rad/m, ou seja, segundo (Rose, 2014) é possível capturar com precisão números de ondas menores que 125 rad/m.

2.2. Verificação das curvas de dispersão achadas

A transformada de Fourier encontra diversas aplicações no estudo de ondas mecânicas transformando o domínio temporal e/ou espacial no domínio das frequências. Neste contexto é utilizado aqui a proposta realizada por (Oliveira, 2017) na qual se coleta a resposta temporal a uma excitação aplicada sobre a guia de ondas, medida sobre uma quantidade de pontos materiais. Isto resulta numa matriz de dados com dimensão de tempo versus alguma coordenada espacial. A transformada de Fourier pode ser aplicada nas duas dimensões (FFT 2D) desta matriz cambiando o domínio onde esta informação é visualizada para um domínio frequência versus número de onda (esta última inversa do comprimento de onda). Essa transformação possibilita que os dados sejam superpostos as curvas de dispersão da geometria estudada mostrando assim sobre quais ondas modais a excitação aplicada viaja (no Anexo A apresenta em forma esquemática a transformação). Nos casos estudados nesse trabalho, modela-se o tubo em elementos finitos com comprimento total de 20 m (direção z) e aplica-se um deslocamento prescrito sobre a face frontal e na face posterior engastada (Figura 6a). Para a discretização no modelo explícito é utilizado o programa Abaqus Explicit, empregando elementos tetraédricos linear de 4 nós, sendo a discretização na camada externa de 25,0 mm, na interface de 16,0 mm e na face interna de 1,35 mm. Na Figura 6b é mostrado a discretização do modelo dinâmico explícito.

Figura 6 – (a) Esquema do modelo de dinâmica explícita com a excitação e representação dos nós (linha vermelha) no qual foi realizado o processamento dos dados com a FFT-2. (b) Malha utilizada no modelo de dinâmica explícita.



Fonte: Elaborado pelo autor.

São coletados os dados ao longo de linhas paralelas ao eixo do tubo, sinais obtidos na superfície externa (polímero), na interface dos dois meios e na superfície livre interna (aço), a Figura 6a suporta esta explicação. Os resultados obtidos dessa análise, no domínio $k \times f$, podem se superpor as curvas de dispersão, verificando-se que a excitação viaja nas ondas modais indicadas pelas curvas de dispersão.

2.3. Modelos analisados

Na continuação se descreve as geometrias e os modelos analisados. Na Tabela 1 estão definidas as propriedades dos materiais utilizados.

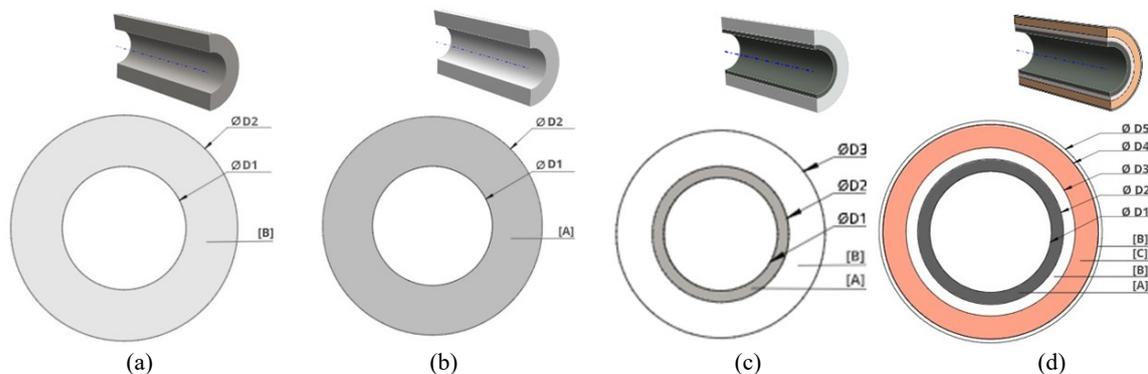
Tabela 1 – Materiais

Identificador	Material	E [GPa]	ρ [kg/m ³]	ν
[A]	Aço estrutural	200	7860	0,3
[B]	Polímero 1	0,80	800	0,4
[C]	Polímero 2	0,64	640	0,4

Fonte: Elaborado pelo autor.

As análises foram realizadas em seis modelos distintos de tubos, a Figura 7 apresenta as características e a Tabela 2 os diâmetros, em milímetros, de cada um dos casos estudados.

Figura 7 - (a) Polímero (b) Aço (c) Aço Polímero 1, Aço Polímero 2 e Aço Polímero 3 (d) Aço Polímero multicamadas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 2 - Diâmetros dos casos estudados.

Casos	D1 mm	D2 mm	D3 mm	D4 mm	D5 mm
Aço Polímero multicamadas	254,0	350,0	353,2	449,8	465,8
Polímero	254,0	465,8	-	-	-
Aço	254,0	465,8	-	-	-
Aço Polímero 1	254,0	305,0	465,8	-	-
Aço Polímero 2	254,0	272,1	465,8	-	-
Aço Polímero 3	284,6	305,0	465,8	-	-

Fonte: Elaborado pelo autor.

No primeiro caso o duto é construído inteiramente de aço (caso Aço), no segundo caso é construído inteiramente de polímero (caso polímero). Do terceiro ao quinto caso os dutos são construídos internamente de aço e externamente coberto por uma camada de polímero (casos Aço Polímero 1 a 3), para estes casos existe três configurações diferentes com diferentes espessuras das camadas de aço e polímero. No sexto caso o duto é construído com quatro diferentes camadas, compostas por três diferentes materiais, a primeira camada é composta por aço e as três seguintes são formadas por polímeros de diferente qualidade, um polímero menos denso na camada central e mais duro na camada em contato com o aço e na camada externa.

3. RESULTADOS

No presente capítulo se descrevem os resultados obtidos nas distintas simulações.

3.1. Análise das Curvas de dispersão para as diversas configurações estudadas

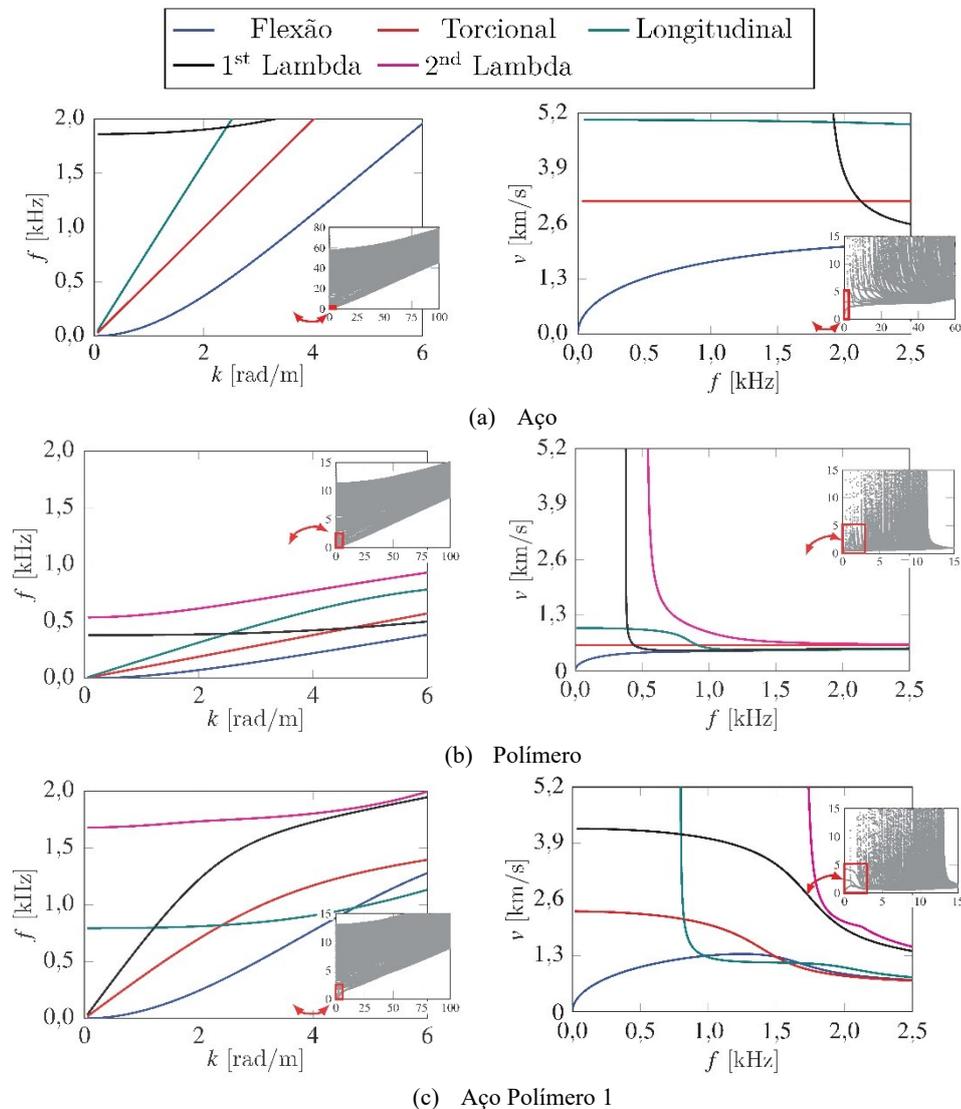
Utilizando o método axissimétrico, apresentado na Seção 3, foram construídas as curvas de dispersão para as configurações descritas na Figura 8. São apresentadas no domínio frequência versus número de onda ($f \times k$) e velocidade versus frequência ($v \times f$) as curvas de dispersão para as configurações do tubo considerando todo aço, todo polímero, a configuração chamada Aço-Polímero 1 e a chamada Aço Polímero multicamada. Para diminuir a complexidade da resposta e permitir um estudo mais minucioso de cada modo, será analisada uma janela restrita de [0 a 2,0] kHz, [0 a 6] rad/m e [0 a 5200] m/s.

Cada curva está associada a um autovalor. Os modos de torção, longitudinal e de flexão são chamados de linhas fundamentais e partem da origem dos gráficos $f \times k$, mostrados na Figura 8, eles poderiam ser obtidos até certos limites utilizando modelos mais simplificados (barra, viga, eixo). Note na Figura 8 que há uma grande quantidade de ondas modais fora da região analisada. Os modos de Lamb 1 e 2 se caracterizam por ser altamente dispersivos, isto quer dizer que uma excitação composta por harmônicas de diferentes frequências tenderia a fazer viajar cada termo harmônico a uma velocidade diferente, produzindo a atenuação da onda emitida.

Observando as curvas de dispersão do caso Aço Polímero 1 e Aço Polímero multicamada, que está no Apêndice A, é possível observar que a modificação nas características do polímero não produz alteração apreciável na curva de dispersão. Note como no caso do aço e do polímero a velocidade das curvas de dispersão tende a ser a da onda P para a seção transversal definida em forma aproximada $v_p = \sqrt{E/\rho}$ e $v_s = \sqrt{G/\rho}$. Também é possível observar que para altos valores de k a onda modal de flexão e ondas de Lamb tendem a viajar a velocidade da onda de

Raleigh, isso acontece porque para altos valores de k , pequenos comprimentos de onda, estas ondas deixam de enxergar os limites da estrutura e só interagem com a borda livre mais próxima comportando-se como uma onda de Raleigh.

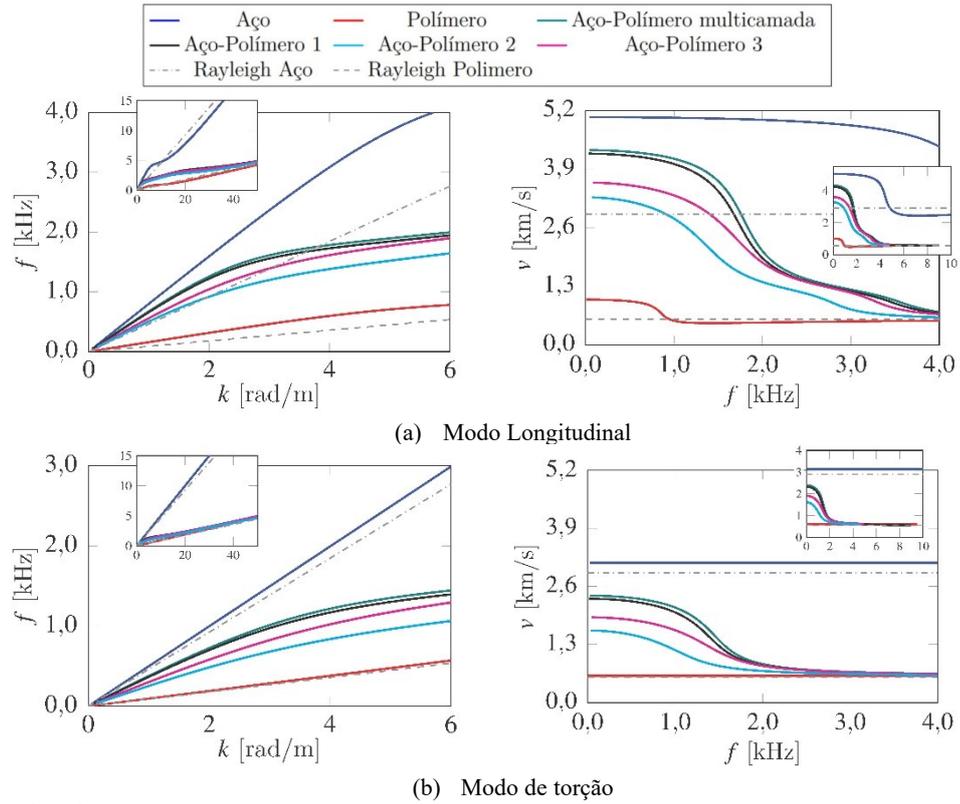
Figura 8 – $f \times k$ e $v \times f$ para os casos Aço, Polímero e Aço Polímero 1.



Fonte: Elaborado pelo autor.

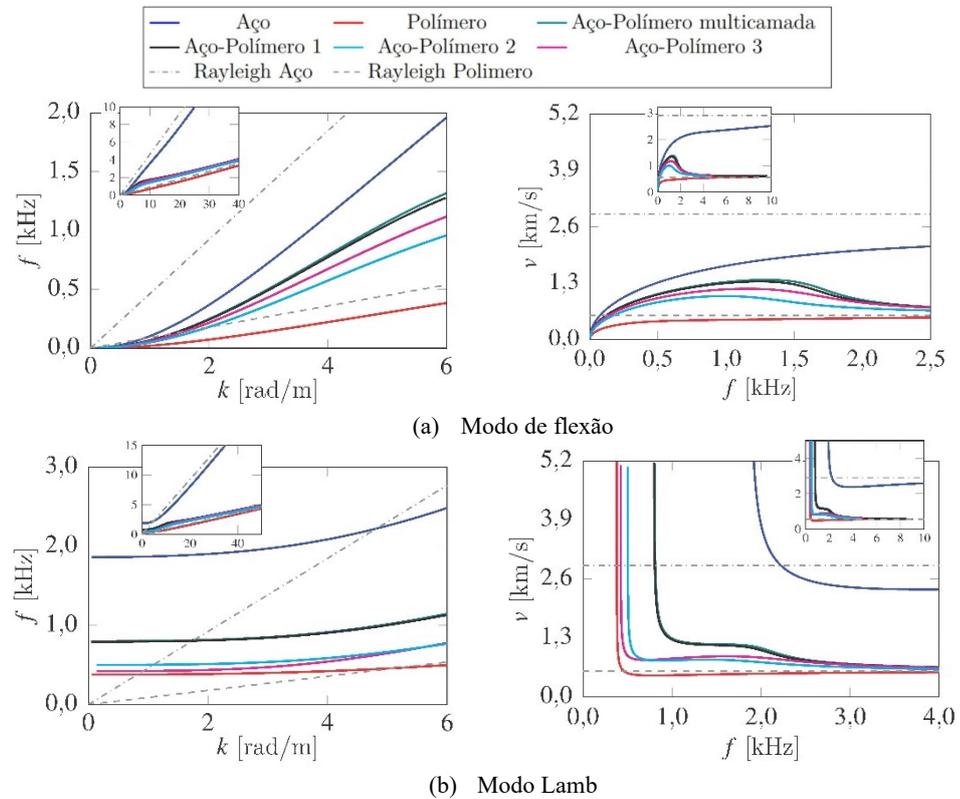
Na Figura 9 e Figura 10 são apresentadas as curvas de dispersão, separadas por modos, para as configurações de Aço, Polímero e Aço Polímero nas suas configurações 1, 2 e 3. Também são indicadas nas figuras as velocidades das ondas de Raleigh para o aço e para o polímero. Pode-se observar claramente nesta figura que para altos valores de k , quando há uma configuração mista, quem governa o comportamento da onda é o polímero. Observa-se também que as diferentes configurações de Aço Polímero testadas modificam as formas das curvas sensivelmente.

Figura 9 - Curvas de dispersão de diversas configurações testadas onde as ondas longitudinais e torção são apresentadas em forma isolada. Também as velocidades de Raleigh do polímero e aço são colocadas em evidência.



Fonte: Elaborado pelo autor.

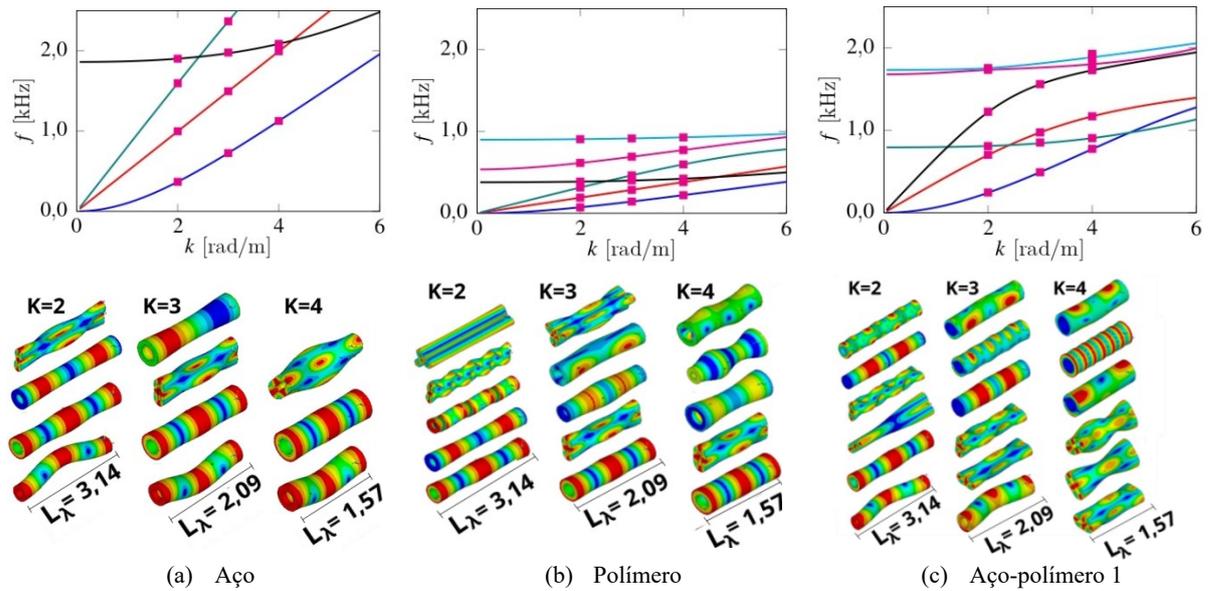
Figura 10 - Curvas de dispersão de diversas configurações testadas onde as ondas de flexão e Lamb são apresentadas em forma isolada. Também as velocidades de Raleigh do polímero e aço são colocadas em evidência.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 11 se apresenta as curvas de dispersão no domínio $f \times k$ para o caso aço, polímero e Aço Polímero 1. No apêndice D estão as configurações 3D dos modos para três k específicos.

Figura 11 - Curvas de dispersão no domínio $f \times k$ e os modos 3D para três valores de número de onda.



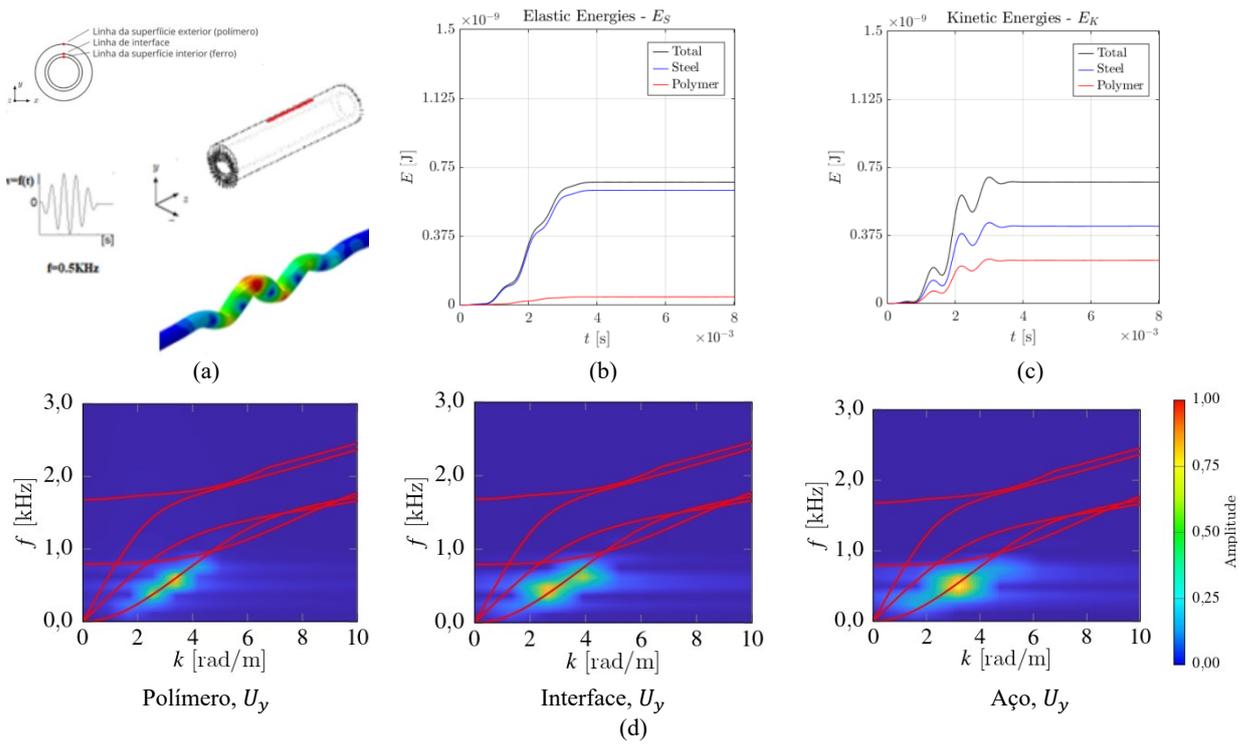
Fonte: Elaborado pelo autor.

Chama-se a atenção também para o fato que os modos tridimensionais foram obtidos utilizando o método indicado na metodologia baseado em aplicar condições de contorno periódicas. O modo de flambagem chamado de flip-flop que acontece a partir de uma tubulação com distorção localizada submetida a uma pressão externa em tubulações esbeltas (colapso por pressão de propagação), é muito similar ao modo de propagação das ondas de Lamb, mostrando a relação entre os modos de flambagem de uma tubulação e seu comportamento eletrodinâmico.

3.2. Excitação da guia de ondas

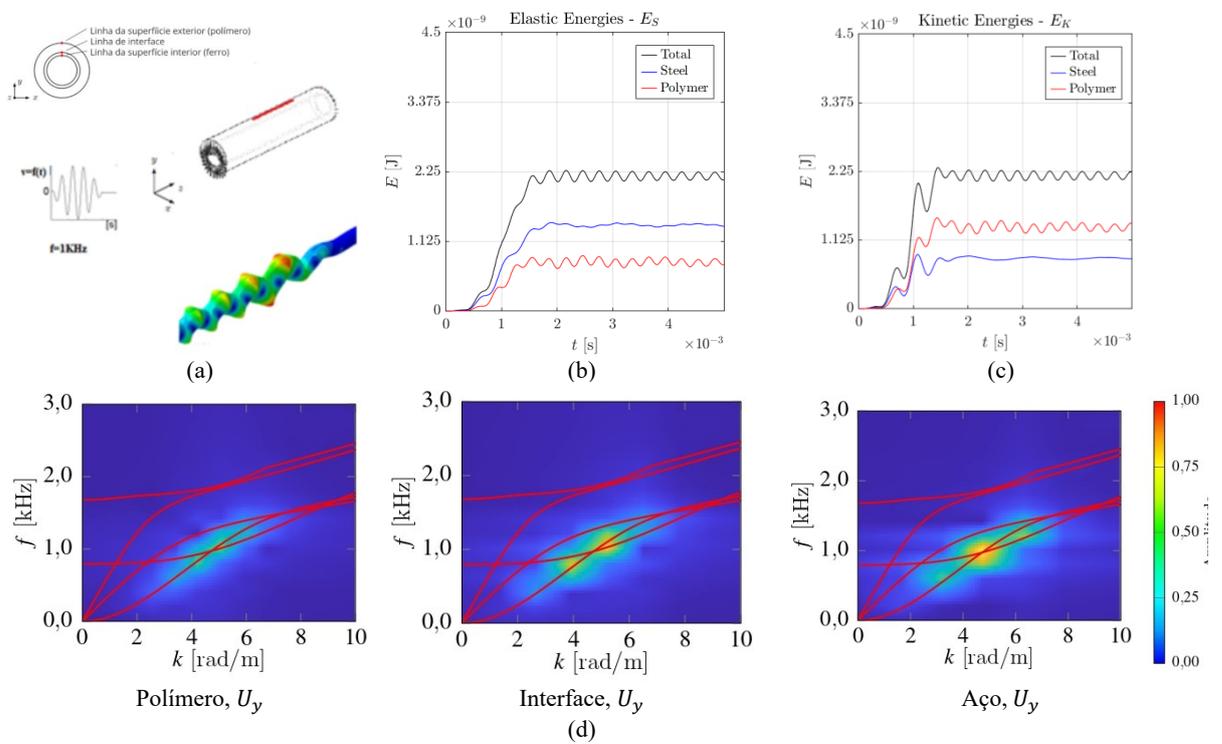
A continuação para a configuração Aço Polímero 1 são aplicadas no modo que excita a flexão em uma função temporal tipo Tone Burst com uma frequência característica em 0.5, 1.0 e 1.7kHz, no domínio $f \times k$. Na Figura 12 estão os resultados para frequência característica de 0.5 kHz, na Figura 13 os resultados para frequência característica de 1,0 kHz e na Figura 14 resultados para frequência característica de 1,7 kHz. No Apêndice B estão os complementos dessas três imagens para o domínio $f \times k$ em imagens 2D e 3D.

Figura 12 - (a) Distribuição espacial do modo e indicação de onde a onda Tone Burst é medida (b) distribuição da energia elástica (c) distribuição da energia cinética no aço e no polímero (d) Curvas de dispersão e amplitude do deslocamento para a excitação de 0.5 kHz de frequência característica.



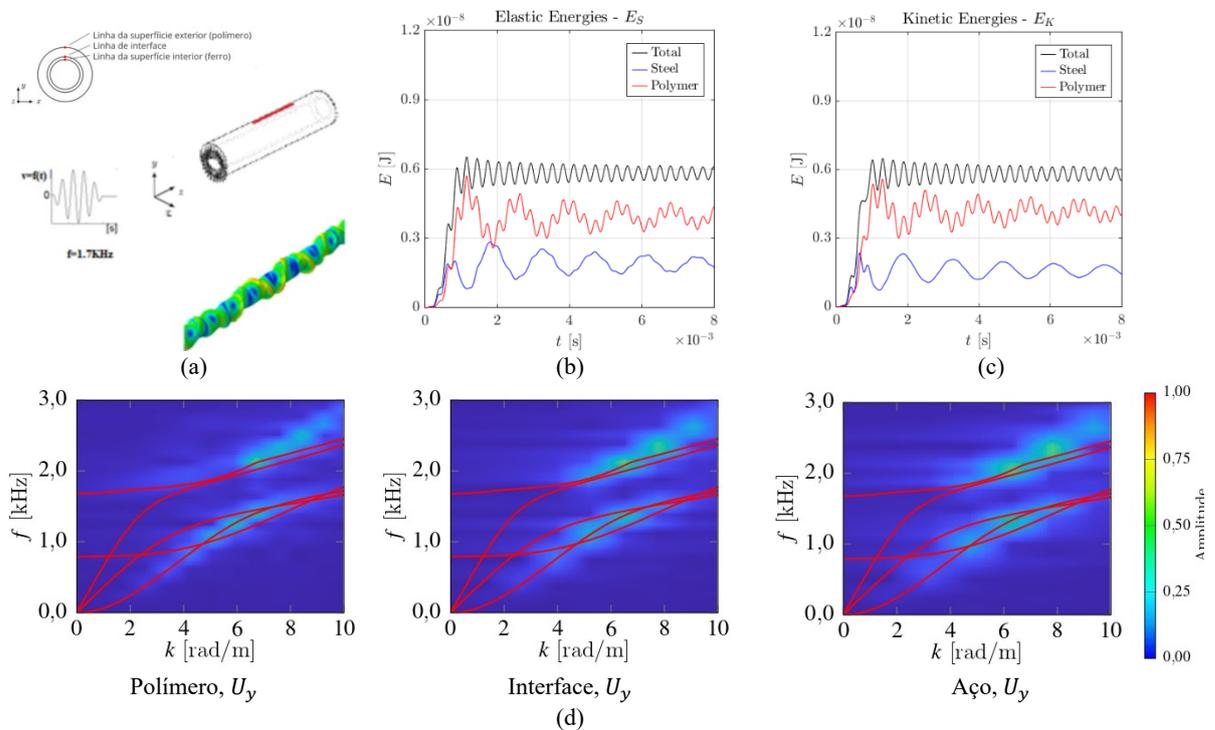
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 13 - (a) Distribuição espacial do modo e Indicação de onde a onda Tone Burst é medida (b) distribuição da energia elástica (c) distribuição da energia cinética no aço e no polímero (d) curvas de dispersão e amplitude do deslocamento para a excitação de 1,0 kHz de frequência característica



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 14 - (a) Distribuição espacial do modo (c) distribuição da energia elástica (b) distribuição da energia cinética no aço e no polímero (d) curvas de dispersão e amplitude do deslocamento para a excitação de 1,7 kHz de frequência característica.



Fonte: Elaborado pelo autor.

É possível perceber que à medida que a frequência da excitação aumenta mais energia vai viajar pelo polímero. Se pode ver que para uma excitação numa frequência de 0.5 kHz o modo que governa é o de flexão, nos outros dois casos uma contribuição significativa dos modos de Lamb faz com que a maior energia da excitação viagem pelo polímero.

4. CONCLUSÃO

Neste trabalho se estudou comportamento elastodinâmico de uma tubulação de aço com uma camada polimérica, as curvas de dispersão de várias configurações são construídas e analisadas, a simulação de uma excitação de flexão também é apresentada. Conclui-se do trabalho que na condição bi material entre polímero e aço, nos baixos valores de k , o guia se comporta na forma de um meio homogêneo, onde os campos são distribuídos entre os dois materiais. À medida que se aumentam os valores de f e k o polímero (mais flexível) acaba influenciando mais o comportamento do guia de ondas, onde assintoticamente as curvas de dispersão convergem em velocidade de ondas de Rayleigh com velocidade de propagação referente à do polímero, o que

diz que o polímero rege o comportamento assintótico, para o caso de este modelado como elástico linear.

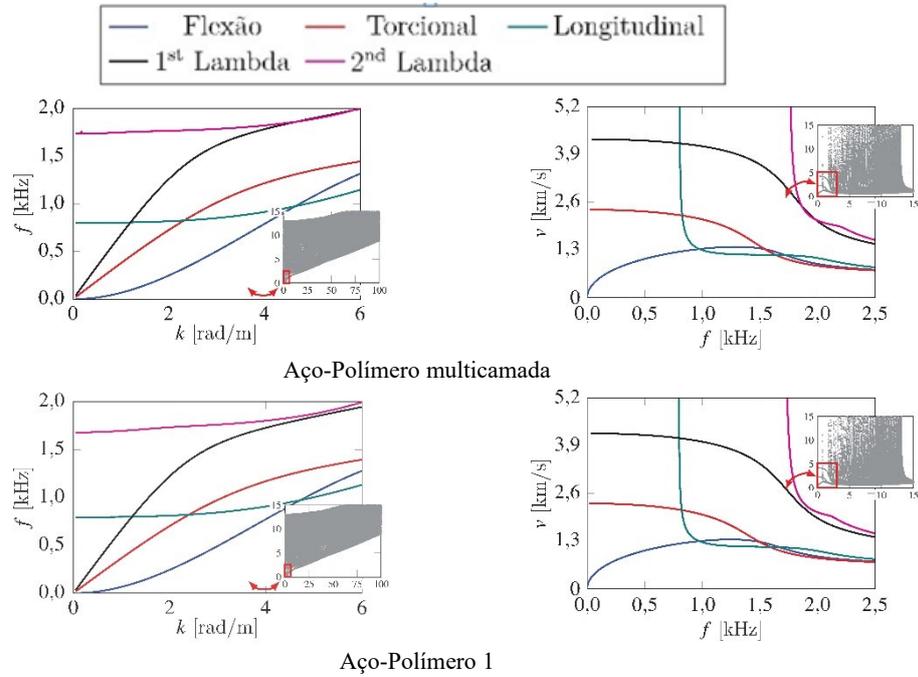
Destas considerações, se observa que o polímero funciona como um atrator da energia aplicada na estrutura, induzindo-a a viajar pela superfície do sistema. Este comportamento se acentua à medida que as frequências são mais elevadas.

BIBLIOGRAFIA

- Groth, E. B. (2016). *PROPAGAÇÃO DE ONDAS DE TENSÃO EM HASTES RETANGULARES NO INTERVALO DE FREQUENCIA DE (0;100 [KHz])*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Kyriakides, S., & Corona, E. (2007). *Mechanics of Offshore Pipelines*. Elsevier.
- Montenegro, V. d. (2012). *VISÃO COMPUTACIONAL APLICADA À ANÁLISE DE*. Dissertação, Dissertação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal Fluminense
- MOORE. (2005). “*Acoustic emission testing - Nondestructive testing handbook* (Vol. 3rd edition). American Society for Nondestructive Testing.
- Oliveira, H. T. (2017). *PROJETO DE UM COLAR DE ONDAS GUIADAS PARA APLICAÇÃO EM TUBULAÇÃO ENTERRADA*. Dissertação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Radke, E. D. (2016). *PROPAGAÇÃO DE ONDAS GUIADAS EM HASTES RETANGULARES: ESTUDO DE PADRÕES DE RESPOSTA NA INTERAÇÃO DEFEITO-ONDA*. Monografia de Engenharia Mecânica, UFRGS, Porto Alegre.
- Rose, J. L. (2014). *Ultrasonic guided waves in solid media*. Cambridge University Press.
- Sorohan, Ş. (2011). Extraction of dispersion curves for waves propagating in free complex waveguides by standard finite element codes.
- Sousa, K. C. (2015). *ANÁLISE DE GUIAS DE ONDAS VIA MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS*. Relatório submetido como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Mecânico, UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, Brasília.
- Vestrum, O., Sture Hopperstada, O., Edvard Blystad Dæhli, L., & Børvikab, T. (2020 de March de 2019). Constitutive modeling of a graded porous polymer based on X-ray computed tomography. *Materials & Design*, 188.
- Wilcox P., E. M. (2002). Dispersion and excitability of guided acoustic waves in isotropic beams with arbitrary cross section. *American Institute of Physics*.

APÊNDICE A - Frequência x Número de onda e Velocidade x Frequência. Para a configuração Aço Polímero multicamada e Aço-Polímero 1.

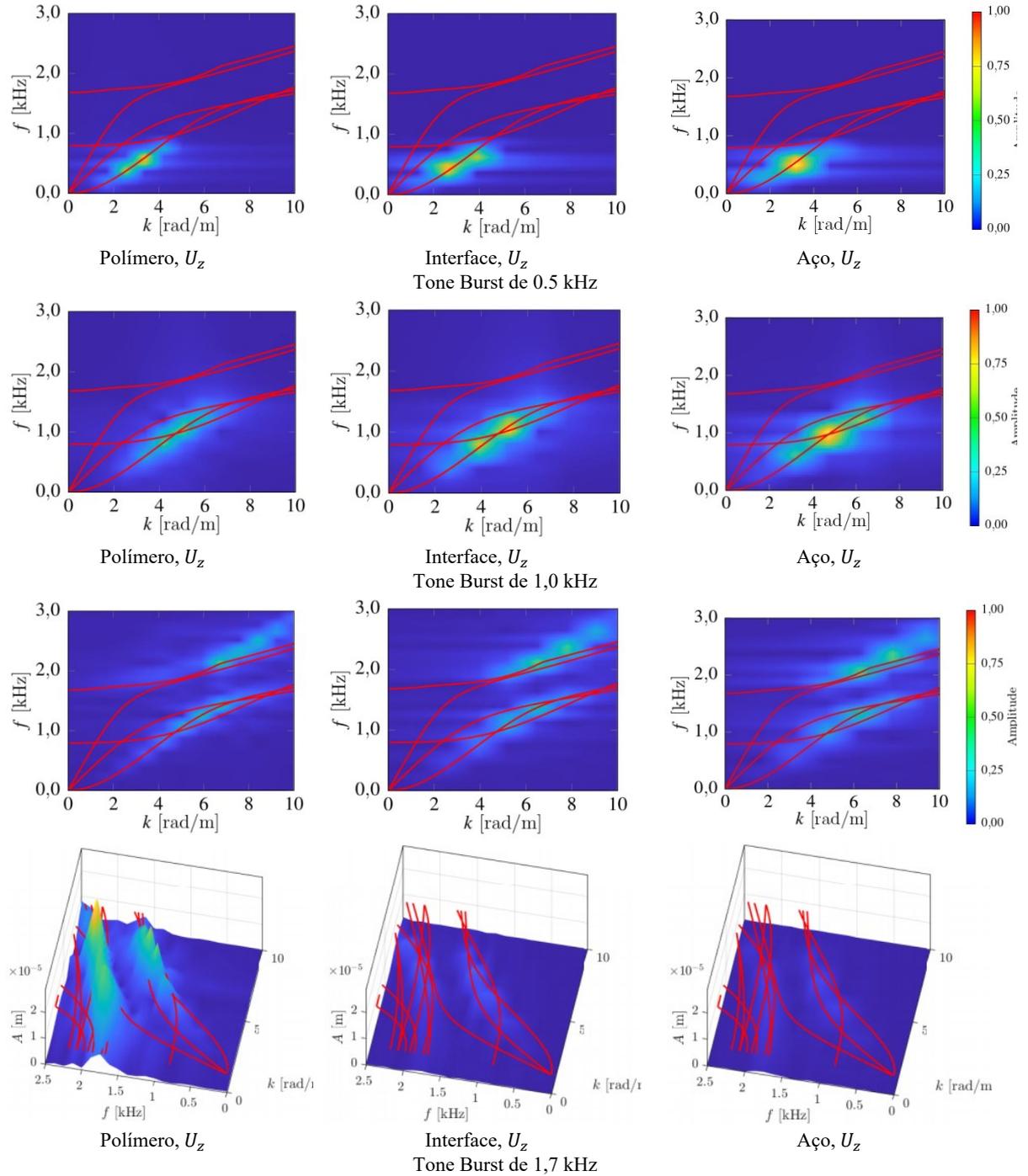
Figura 15 - Aço Polímero multicamada.



Fonte: Elaborado pelo autor.

APÊNDICE B - Curvas de dispersão e amplitude do deslocamento obtido ao analisar a resposta à excitação tipo Tone Burst de 0,5 kHz, 1,0 kHz e 1,7 kHz de frequência característica. no domínio $f \times k$.

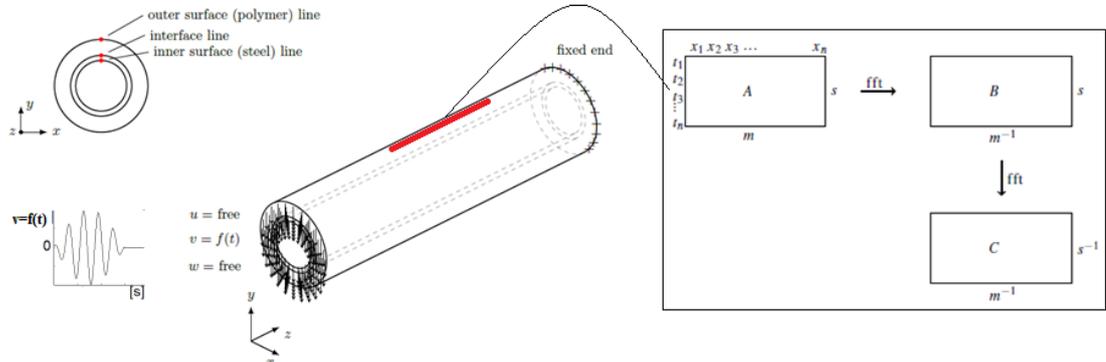
Figura 16 - Modelo 2D e 3D para $f \times k$ de $y=(2)$.



Fonte: Elaborado pelo autor.

ANEXO A - Esquema de como será excitado o sistema e como foi realizado o processamento dos dados. Obtidos nos pontos localizados na linha vermelha

Figura 17 - Transformada de Fourier.



Fonte: (Groth, 2016)