

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

STRUCTURAL ANALYSIS OF PIPES WITH POLYMERIC COATING THROUGH THEIR ELASTODYNAMIC PROPERTIES

**Kelly Robert-Svendsen Rassier, Boris N. Rojo Tanzi, Guilherme Schumacher da Silva e
Ignacio Iturrioz**

*Department of Mechanical Engineering, Federal University of Rio Grande do Sul (UFRGS), Rua
Sarmiento Leite, 425; 90046-902; Porto Alegre / RS, Brazil*

Palavras-chave: Ondas guiadas, Polímeros, ensaios não destrutivos, propagação de ondas.

Resumo. Na indústria de petróleo offshore é comum o uso de tubos com camadas internas de aço anticorrosivo, unidas com camadas externas construídas com um material polimérico para isolar termicamente o produto transportado e mitigar cargas durante a vida útil da tubulação. É de interesse 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 desses tubos, computando-se o gráfico da curva de dispersão que caracteriza sua resposta elastodinâmica. Duas metodologias numéricas são utilizadas para construir as curvas de dispersão, sendo a primeira baseada na análise modal de um modelo axissimétrico e a outra realizada utilizando condições de contorno periódicas sobre um modelo 3D. 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.

Keywords: Guided waves, Polymers, non-destructive testing, wave propagation.

Abstract. In the offshore oil industry, it is common to use tubes with internal layers of anti-corrosive steel, alloy that join to external layers constructed with a polymeric material to thermally insulate the transported product and mitigate loads during the lifetime of the pipeline. It is of interest 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 these tubes is studied, computing the dispersion curve chart that characterizes its elastodynamic response. Two numerical methodologies are used to build the dispersion curves, 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. 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.

1 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, o que fez a exploração do petróleo e do gás natural tornar-se mais desafiadora devido as crescentes profundidades de operação. Com isso vem se tornando frequente na engenharia o uso de dutos rígidos multicamadas para extração e transporte de petróleo, são essencialmente tubos de aço que contém camadas metálicas e poliméricas com distintas funções. O aço confere à tubulação resistência às altas pressões do fundo do mar e para preservar a temperatura do fluxo de fluido, impedindo a perda de pressão, os oleodutos costumam ser revestidos com camadas de revestimento polimérico isolante Vestrum et al. (2020). A cobertura com polímero também tem a função de proteger a tubulação frente a impactos acidentais evitando e/ou retardando a propagação de ondas de colapso. 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 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. 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 conhecimento do comportamento das ondas permite construir sensores que possam através da excitação de ondas guiadas detectarem falhas nas estruturas e prevenir futuros colapsos.

A informação antes apresentada contextualiza o presente trabalho, que tem como objetivo estudar a propagação de ondas de uma tubulação metálica com revestimento polimérico, através do cálculo das curvas de dispersão da estrutura objeto de estudo. Por fim, discutir os resultados visando compreender a interação entre o polímero e o aço da tubulação composta.

2 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 (onda-P) e transversal (onda-S), as Eqs. (1) determinam respectivamente essas velocidades de propagação, onde λ e μ são as constantes elásticas de Lamê. A Fig. 1 exemplifica o movimento das ondas.

$$c_1 = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}; \quad c_2 = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}. \quad (1)$$

No caso de o meio semi-infinito, ou seja, no caso de ter uma superfície livre, a interação

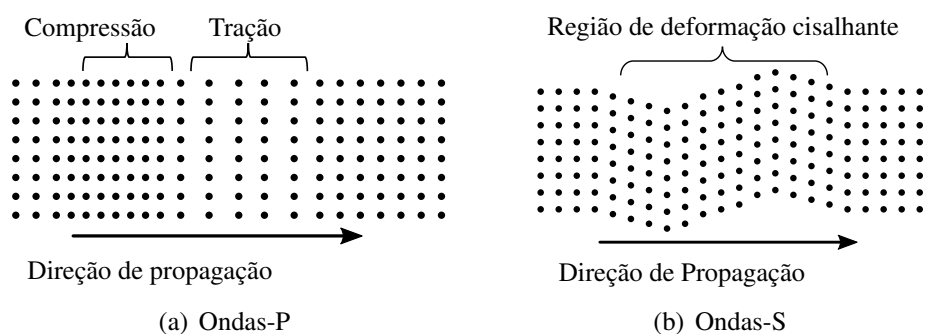


Figura 1: Ondas num meio infinito, adaptado do Ronnie K. Miller (2005).

das ondas P e S com a superfície livre induz a aparição de outros tipos de ondas, uma das mais importante é a onda de Raleigh, que tem velocidade e distribuição espacial que a caracteriza, a sua velocidade (c_R) é dada pela expressão $c_R = c_2 \cdot (0,86 + 1,14\nu)/(1 + \nu)$. 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 da estrutura ter ao menos uma dimensão finita ela é chamada de guia de ondas e a propagação de um modo de onda sobre ela depende da relação frequência, número de onda e geometria. Essas relações acabam gerando um fenômeno conhecido como dispersão, a dispersão é a variação da velocidade de propagação da onda com respeito a alguma variável, no caso das ondas guiadas a variação de velocidade é função da frequência (Rose, 2002). O entendimento desses fenômenos é fundamental para a sua aplicação como método de ensaio não destrutivo. Para analisar essas ondas que propagam numa guia de ondas é possível construir famílias de curvas modais características chamadas de curvas de dispersão.

2.1 Colapso de tubos

A pressão de colapso produzida pela coluna hidrostática sobre a tubulação (P_C) e um dos senários mais críticos no projeto de risers rígidos. Ela depende da relação diâmetro/espessura da parede do duto, da ovalização inicial, de imperfeições, e das propriedades mecânicas do material utilizado na conformação do tubo. A pressão de propagação (P_P) é a pressão externa máxima ao qual o duto deve estar submetido para que ocorra a propagação da falha ela sempre é menor que a pressão de colapso da estrutura e seu valor depende somente da geometria e das propriedades do material.

A propagação ao atingir o P_P inicia-se, geralmente, devido a impactos acidentais na linha, a erros durante a instalação, ou com a redução na espessura da parede do duto devido a corrosão. Ela pode se alastrar catastróficamente por quilômetros, podendo comprometer integralmente a estrutura de toda uma linha de duto. A propagação do colapso vai acabar quando a pressão externa for menor que a pressão de propagação ou quando o duto tiver a rigidez aumentada por fatores externos como enrijecedores. O duto pode falhar de vários modos diferentes, os modos de falha do colapso propagante são classificados em modo Halteres, modo Flip-flop, modo U. Esses modos podem ser observados na Fig. 2

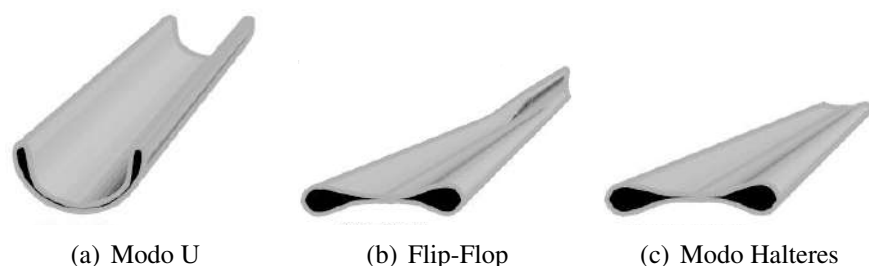


Figura 2: Modos de falha de tubos devido a propagação da pressão externa a partir de um defeito. Adaptado do Pasqualino (1998)

3 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, 2002). A análise teórica da ação de ondas em tubos circulares foi feito com base em análises numéricas, utilizando os métodos axissimétrico e periódico apresentados a seguir.

3.1 Curvas de dispersão

A metodologia SAFE (Semi-Analytical Finite Element Method) utilizada para criar as curvas de dispersão foi o modelo proposto por Wilcox (2002) e posteriormente amplamente utilizada por Groth (2016); Groth et al. (2020) onde foi implementada no software comercial ANSYS® (2017), onde se utiliza um guia de ondas circular com a mesma seção transversal de interesse, de maneira que, quando o raio R (veja Fig. 3(a)) utilizado é grande o suficiente, os resultados convergem rapidamente para um guia de ondas reto (Wilcox, 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 Fig. 3(a).

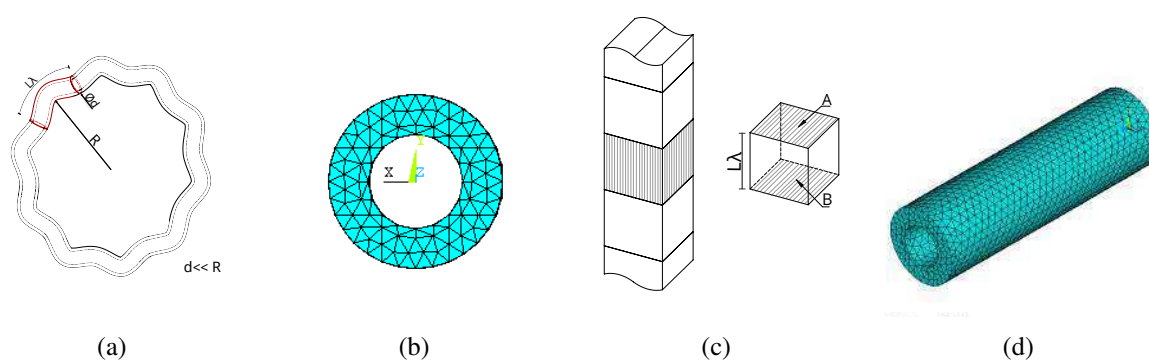


Figura 3: (a) Axissimétrico, (b) Malha de axissimétrico, (c) Periódico, (d) Malha periódica.

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. Para a análise estudada o raio do guia de onda considerado é de 5000,00 m, muito maior que as dimensões da seção transversal que possui um raio externo da ordem de 300,00 mm. Foram introduzidas sobre as geometrias estudadas uma malha com elementos tetraédricos bilineares de 3,00 mm, como pode ser visto na Fig. 3(b). Os dados gerados no Ansys sobre a dispersão das ondas guiadas nas tubulações foram pós-processados

utilizando o software MATLAB® (2012), para obter as 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 Sorohan et al. (2011), ele consiste em modelar em elementos finitos uma porção do guia de onda, como mostrado na Fig. 3(c), 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; Groth et al., 2020). Na Fig. 3(d) se apresenta a malha utilizada empregando elementos tetraédricos de seis nós lineares, com uma discretização de $l_c = 5,00$ mm de lado. Este tamanho de elemento permite modelar com comprimento de ondas com uma aproximação razoável de $L_\lambda \geq 10l_c = 0,05$ m que corresponde a um número de ondas, $k = 2\pi/L_{\lambda_{\min}} = 125,00$ rad m⁻¹, ou seja, é possível capturar com precisão números de ondas menores que 125,00 rad m⁻¹ (Rose, 2014).

3.2 Modelos analisados

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

Identificador	Material	E [GPa]	ρ [kg/m ³]	ν
[A]	Aço estrutural	200,00	7860,00	0,30
[B]	Polímero 1	0,80	800,00	0,40
[C]	Polímero 2	0,64	640,00	0,40

Tabela 1: Materiais

As análises foram realizadas em seis modelos distintos de tubos, a Fig. 4 apresenta as características e a Tabela 2 os diâmetros, de cada um dos casos estudados.

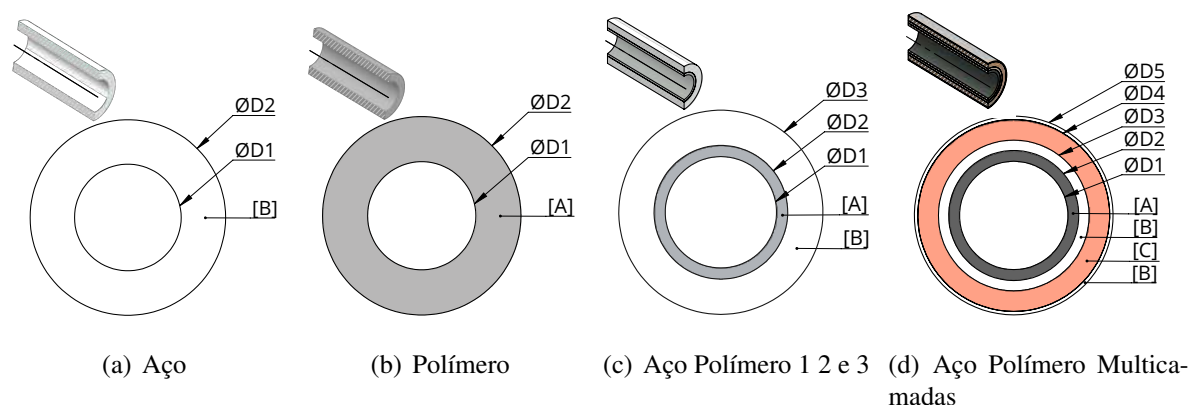


Figura 4: Geometria dos casos estudados

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

Casos	D_1 [mm]	D_2 [mm]	D_3 [mm]	D_4 [mm]	D_5 [mm]
Aço Polímero multicamadas	254,00	350,80	353,20	449,80	465,80
Polímero	254,00	465,80	-	-	-
Aço	254,00	465,80	-	-	-
Aço Polímero 1	254,00	305,00	465,80	-	-
Aço Polímero 2	254,00	272,10	465,80	-	-
Aço Polímero 3	284,60	305,00	465,80	-	-

Tabela 2: Diâmetros dos casos estudados.

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. O sexto caso representa de forma mais precisa os dutos revestidos utilizados Vestrum et al. (2020).

4 RESULTADOS

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

4.1 Análise das Curvas de dispersão para as diversas configurações estudadas

Utilizando o método axissimétrico, apresentado na Seção 3.1, foram construídas as curvas de dispersão para as configurações descritas na Fig. 5. 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 Aço, Polímero e a configuração chamada Aço-Polímero 1 e Aço Polímero Multicamadas. Para diminuir a complexidade da resposta e permitir um estudo mais minucioso de cada modo, será analisada uma janela restrita de 0,00 kHz aos 2,00 kHz, 0,00 rad m⁻¹ aos 6,00 rad m⁻¹ e 0,00 m/s aos 5200,00 m/s. Cada curva está associada a um autovvalor. Os modos de torção, longitudinal e de flexão são chamados de linhas fundamentais e partem da origem dos gráficos $f \times k$, mostrados na Fig. 5 eles poderiam ser obtidos até certos limites utilizando modelos mais simplificados (barra, viga, eixo). Note na Fig. 5 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. 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 $V_p \approx \sqrt{E/\rho}$ e $V_s \approx \sqrt{G/\rho}$. 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.

Na Fig. 6 são apresentadas as curvas de dispersão, separadas por modos, para as configurações de Aço, Polímero, Aço Polímero (nas suas configurações 1, 2 e 3) e Aço Polímero Multicamadas. Também são indicadas nas figuras as velocidades das ondas de Raleigh para o aço e para o polímero. Pode-se observar claramente na Fig. 6 que para altos valores de k , quando há uma configuração mista, quem governa o comportamento da onda é o polímero. Através da análise das curvas também é possível concluir que a modificação nas características da geometria entre os casos Aço Polímero 1 (Fig. 5(c)) e Aço Polímero Multicamada (Fig. 5(d)) não produz alteração apreciável na curva de dispersão, então por simplicidades as demais análises serão realizadas apenas para o caso Aço Polímero 1.

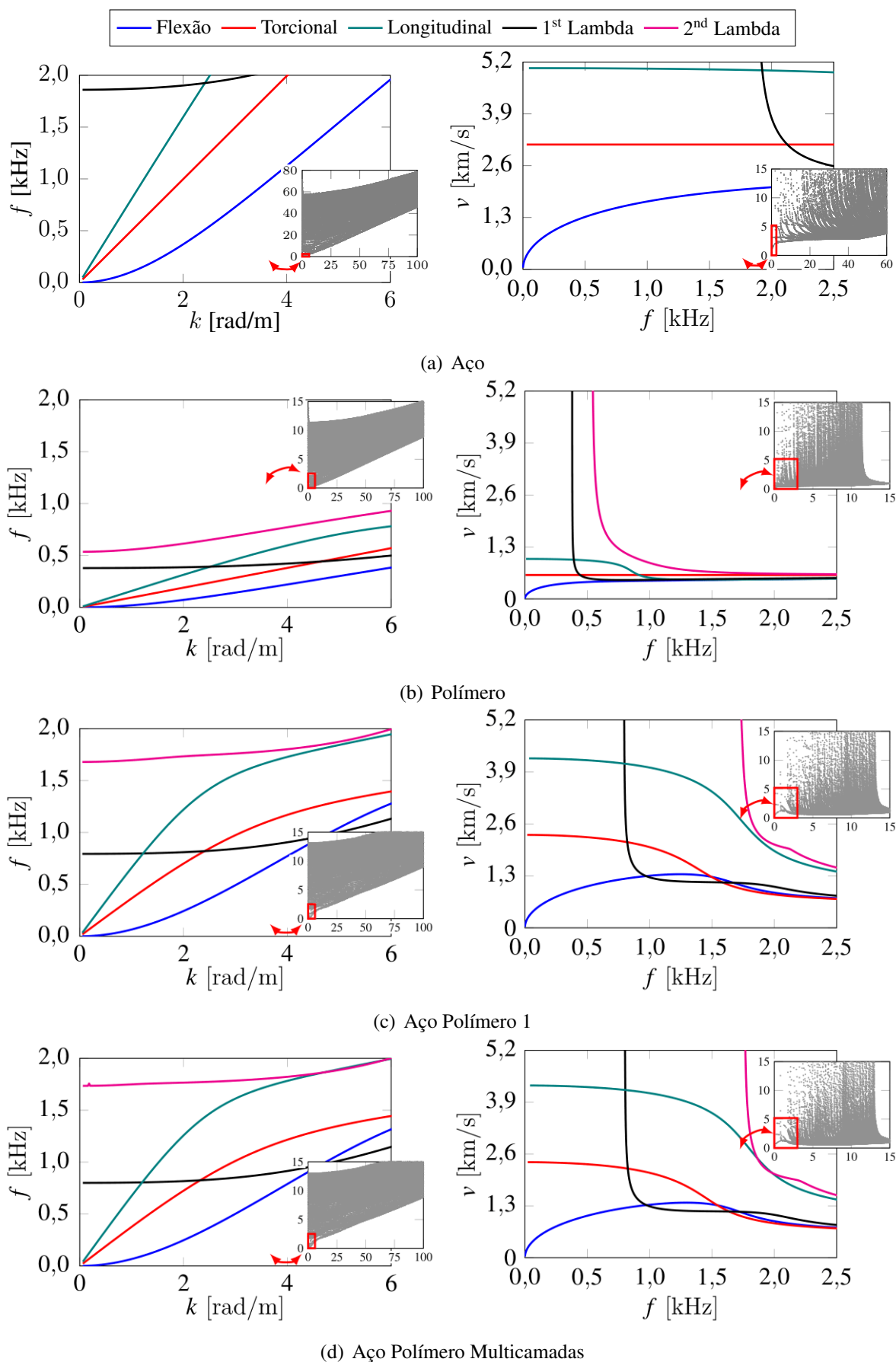
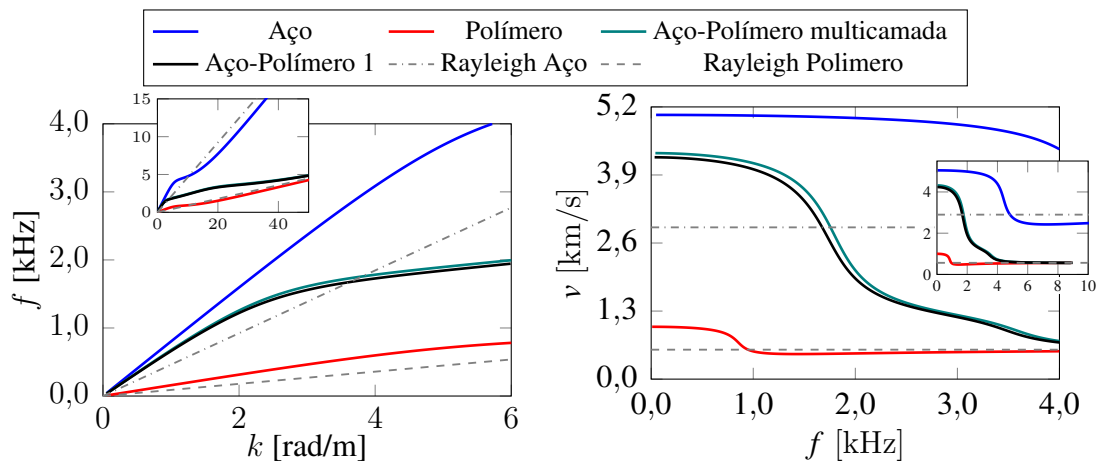
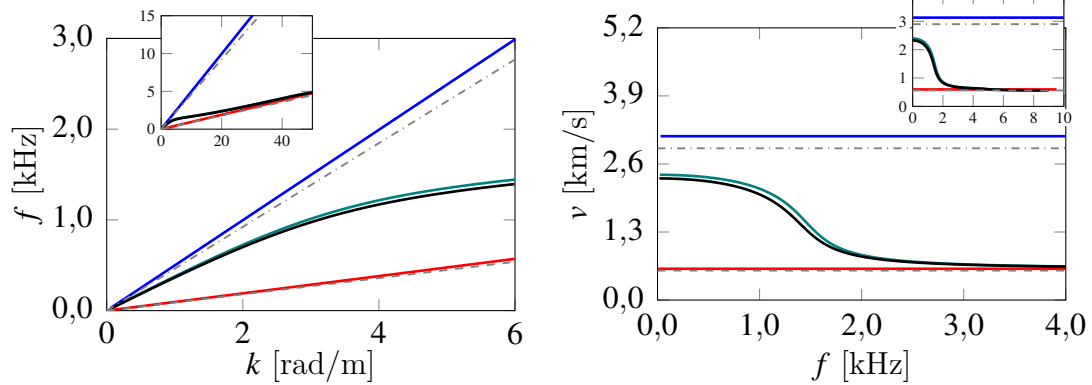


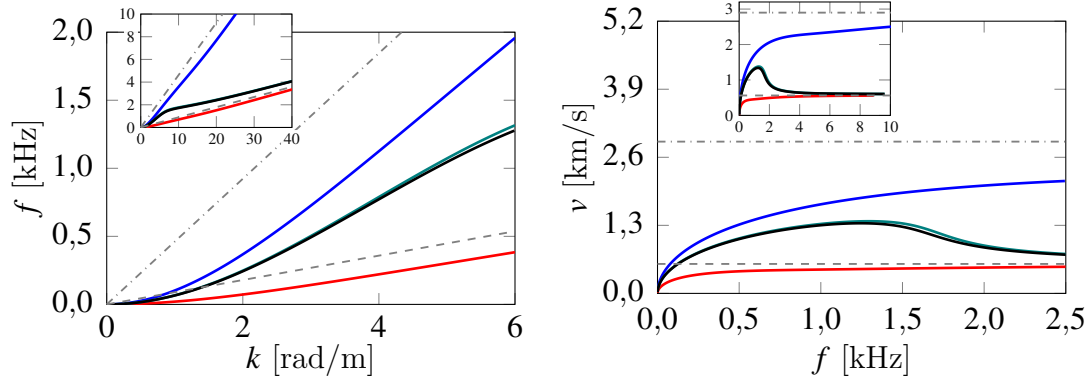
Figura 5: $f \times k$ e $v \times f$ para os casos Aço, Polímero, Aço Polímero 1 e Aço Polímero Multicamada



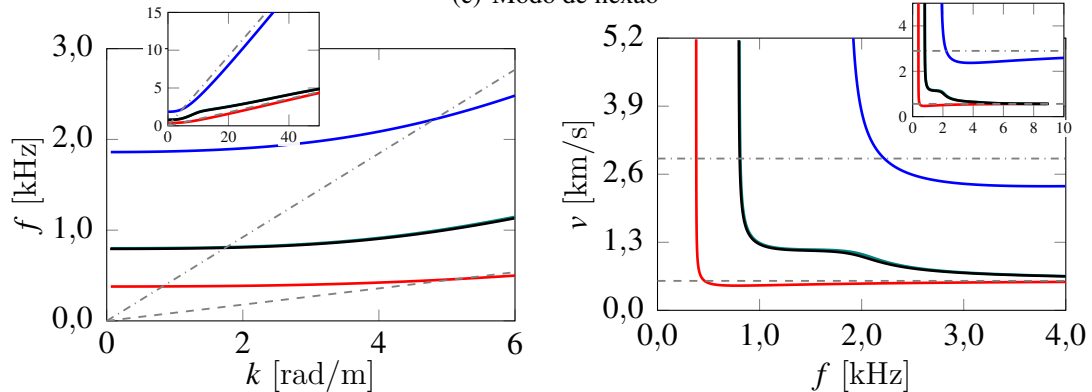
(a) Modo Longitudinal



(b) Modo de torção



(c) Modo de flexão



(d) Modo Lamb

Figura 6: 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.

A Fig. 7 se apresenta as curvas de dispersão no domínio $f \times k$ para o caso Aço, Polímero e Aço Polímero 1.

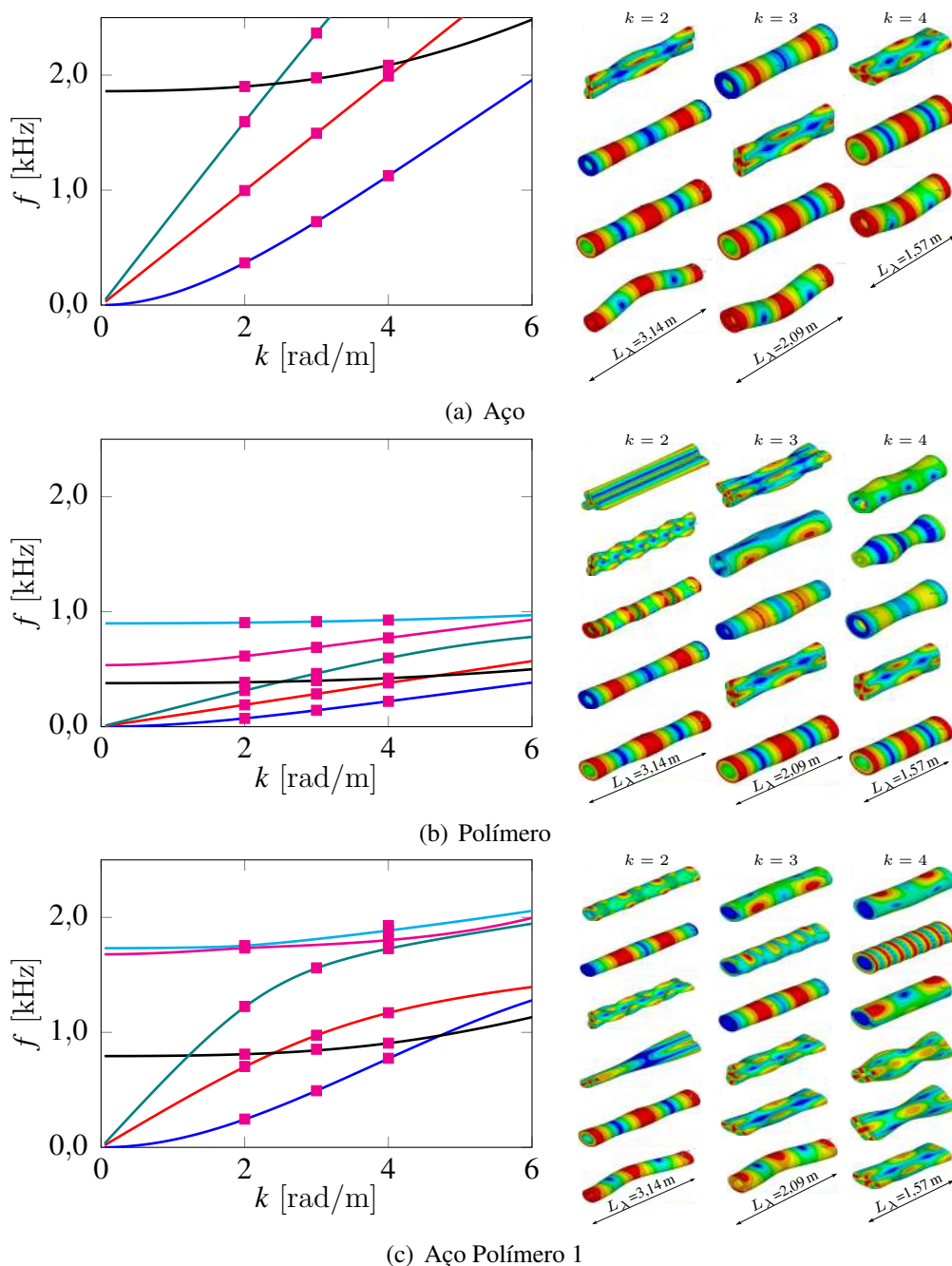


Figura 7: Curvas de dispersão no domínio $f \times k$ e os modos 3D para três valores de número de onda.

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 (linha preta das Fig. 7), mostrando a relação entre os modos de flambagem de uma tubulação (Fig.2) e seu comportamento elastodinâmico.

5 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. Conclui-se do trabalho que na condição bi-material entre polímero e aço, nos baixos valores de k , o guia se comporta como uma viga composta onde os campos de deformações são distribuídos entre os dois materiais. A medida que se aumentam os valores de f e k as deformações se concentram na camada polimérica que é mais flexível, 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 governa o comportamento assintótico. 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.

6 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CAPES, CNPq e a UFRGS pelo apoio neste trabalho.

REFERÊNCIAS

- ANSYS®. Academic Research Mechanical, Release 17.0. 2017. Published: Ansys Inc., Canonsburg, Pennsylvania.
- Groth E.B. *Propagação De Ondas De Tensão Em Hastes Retangulares No Intervalo De Frequência De (0;100 [khz])*. Mestrado, UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL, Porto Alegre, 2016.
- Groth E.B., Clarke T.G.R., Schumacher da Silva G., Iturrioz I., e Lacidogna G. The Elastic Wave Propagation in Rectangular Waveguide Structure: Determination of Dispersion Curves and Their Application in Nondestructive Techniques. *Applied Sciences*, 10(12):4401, 2020. ISSN 2076-3417. doi:10.3390/app10124401.
- MATLAB®. version 8.0.0.783 (R2012b). 2012. Published: The MathWorks Inc., Natick, Massachusetts.
- Pasqualino I. Propagação de colapso em cascas cilíndricas sob pressão estática. *COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, Brasil*, 1998.
- Ronnie K. Miller Eric v. K. Hill P.O.M. *Acoustic emission testing - Nondestructive testing handbook*, volume III. American Society for Nondestructive Testing, 2005.
- Rose J.L. A baseline and vision of ultrasonic guided wave inspection potential. *J. Pressure Vessel Technol.*, 124(3):273–282, 2002.
- Rose J.L. *Ultrasonic guided waves in solid media*. Cambridge university press, 2014.
- Royer D. e Dieulesaint E. *Elastic waves in solids I: Free and guided propagation*. Springer Science & Business Media, 1999.
- Sorohan Ş., Constantin N., Găvan M., e Anghel V. Extraction of dispersion curves for waves propagating in free complex waveguides by standard finite element codes. *Ultrasonics*, 51(4):503–515, 2011.
- Vestrum O., Dæhli L.E.B., Hopperstad O.S., e Børvik T. Constitutive modeling of a graded porous polymer based on x-ray computed tomography. *Materials & Design*, 188, 2020.
- Wilcox P. Dispersion and excitability of guided acoustic waves in isotropic beams with arbitrary cross section. Em *AIP Conference Proceedings*, volume 615. AIP, Brunswick, Maine (USA), 2002. doi:10.1063/1.1472800.