



Christiano Moreira do Nascimento

**Ondas ultrassônicas de cisalhamento horizontal guiadas
em dutos com camada de revestimento e sua aplicação
na detecção de defeitos**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, do Departamento de Engenharia Elétrica da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Alan Conci Kubrusly

Rio de Janeiro
Agosto de 2023



Christiano Moreira do Nascimento

**Ondas ultrassônicas de cisalhamento horizontal guiadas
em dutos com camada de revestimento e sua aplicação
na detecção de defeitos**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, do Departamento de Engenharia Elétrica da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Alan Conci Kubrusly

Orientador

Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

Prof. Guilherme P. Temporão

Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

Prof. Arhtur M. B. Braga

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 30 de Agosto de 2023

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Christiano Moreira do Nascimento

Christiano Moreira do Nascimento formou-se em Elétrica pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (Rio de Janeiro, Brasil) Engenharia com ênfase em Eletrônica de Computação. É membro do Laboratório de Optoeletrônica do Centro de Estudos em Telecomunicações em PUC-Rio.

Ficha Catalográfica

Nascimento, C. M.

Ondas ultrassônicas de cisalhamento horizontal guiadas em dutos com camada de revestimento e sua aplicação na detecção de defeitos / Christiano Moreira do Nascimento; orientador: Alan Conci Kubrusly. – Rio de Janeiro: PUC-Rio, Departamento de Departamento de Engenharia Elétrica, 2023.

v., 188 f: il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Departamento de Engenharia Elétrica.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Elétrica – Teses. 2. Engenharia de Telecomunicações – Teses. 3. Ondas Ultrassônicas;. 4. Ondas Cisalhantes Horizontais;. 5. Propriedades Viscoelásticas;. 6. Ímãs Permanentes Periódicos;. 7. Método de elementos finitos;. I. Kubrusly, A. C.. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

Agradecimentos

Eu agradeço a Deus, fonte de vida.

À minha esposa e amor da minha vida, Érika M. de Sá do Nascimento, pela sua dedicação, carinho e cuidado por mim.

Aos meus pais pelo suporte e pelo apoio na minha caminhada.

Aos meus amigos do CETUC, em especial Breno Perlingeiro por ser meu parceiro em toda a jornada e Camila Lima pelo apoio e pelos momentos de diversão.

Ao meu orientador Alan C. Kubrusly pela compreensão em meus momentos mais difíceis.

Ao professor Arthur Braga e seu laboratório (LFSO) pelo empréstimo do software de simulação onde, sem tal suporte, essa dissertação seria impossível.

À ANP pelo suporte financeiro que sem o mesmo este trabalho não seria possível.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ).

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Resumo

Nascimento, C. M.; Kubrusly, A. C.. **Ondas ultrassônicas de cisalhamento horizontal guiadas em dutos com camada de revestimento e sua aplicação na detecção de defeitos**. Rio de Janeiro, 2023. 188p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Ondas ultrassônicas guiadas de cisalhamento horizontal (do inglês, shear horizontal SH) são comumente usadas para avaliação não destrutiva de placas e tubos. Em dutos de aço, uma camada de revestimento é frequentemente aplicada à superfície externa dos mesmos para evitar a corrosão. O material do revestimento apresenta impedância acústica consideravelmente menor que a do material principal dos dutos, a saber aço; todavia, sua presença pode alterar significativamente as características de propagação dos modos de onda SH guiada, haja vista que se trata de um problema de propagação em guia de onda multicamadas. Devido às propriedades viscoelásticas do material do revestimento, comumente utilizado, os modos de onda guiada que conhecidamente se propagam de maneira adequada em um duto cru, podem se tornar uma escolha inadequada em um duto revestido devido à alta atenuação, impossibilitando inspeções corriqueiras. Nesta dissertação, investiga-se quais modos SH são mais adequados para uma inspeção circunferencial de um tubo revestido de interesse, a saber, um duto de aço de espessura de 6.35 mm com revestimento de polietileno de espessuras variáveis. Um modelo semi-analítico foi utilizado para calcular as curvas de dispersão e atenuação e um modelo numérico de elementos finitos foi explorado para investigar os modos de propagação em um guia de onda revestidos e sob a presença de defeitos. Resultados mostram que, no regime de espessura de alta frequência, o modo quasi-SH₀ no comprimento de onda 10 mm é a escolha mais adequada para uma primeira avaliação, sem conhecimento prévio do espécime. No entanto, com o conhecimento das características do espécimen avaliado, pode-se selecionar outros modos que possam ter menor atenuação. Conclui-se que, uma seleção cuidadosa do modo de operação mais adequado é fundamental para inspecionar defeitos em dutos revestidos de interesse. Para os casos analisados, a saber, SH₀ e SH₁ com comprimentos de onda de 25 mm, 20 mm, 15 mm e 10 mm, os modos de mais adequados são SH₁ em 25mm - 285 kHz, SH₀ em 20 mm - 160 kHz, SH₀ em 15 mm - 210 kHz, SH₁ em 15 mm - 330 kHz, SH₀ em 10 mm - 310 kHz e SH₁ em 10 mm - 400 kHz, apresentando atenuação aproximada de 21 dB/m, 3 dB/m, 15 dB/m, 13 dB/m, 4 dB/m e 17 dB/m, respectivamente, e clara identificação do defeito através de sua refletividade. Portanto, o presente estudo é útil no projeto de um setup experimental confiável ao analisar um duto cujo revestimento possui propriedades viscoelásticas.

Palavras-chave

Ondas Ultrassônicas; Ondas Cisalhantes Horizontais; Propriedades Viscoelásticas; Ímãs Permanentes Periódicos; Método de elementos finitos;

Abstract

Nascimento, C. M.; Kubrusly, A. C. (Advisor). **Shear horizontal guided waves in coated pipes and its application in defect detection**. Rio de Janeiro, 2023. 188p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Shear horizontal (SH) ultrasonic guided waves are commonly used for non-destructive evaluation of plates and pipes. In steel pipes, a coating layer is often applied to the outer surface in order to prevent it from corrosion. The applied coating layer presents considerably lower acoustic impedance than the pipe main material, namely, steel, nevertheless, its presence significantly affects the propagation characteristics of SH guided wave modes, since one deals with a multilayered waveguide problem. Due to the viscoelastic properties of the coating layer, ultrasonic guided wave modes that adequately propagate in an equivalent bare pipe can become an unsuitable choice in a coated pipe, due to high attenuation, rendering pipe inspection unfeasible. In this thesis, it was investigated which SH guided wave modes are more adequate for circumferential inspections of a coated pipe of interest, namely, a 6.35 mm thick steel pipe and a polyethylene coating whose thicknesses varies. A semi-analytical model was used to calculate the dispersion and attenuation curves and a finite element numerical model was further exploited to investigate the propagating modes in coated waveguided under the presence of defects. Results show that, in the analyzed cases, at the high-frequency-thickness regime, the quasi-SH₀ mode at 10 mm wavelength is the most suitable choice for an evaluation with no previous knowledge of the specimen. However, with knowledge of the characteristics of the evaluated specimen, it is possible to select other modes that can have a lower attenuation. Therefore, a careful selection of the most suitable operating mode is paramount in order to inspect a defect with ultrasonic guided waves in pipes with coating. Considering the studied cases, namely, SH₀ and SH₁ at of 25 mm, 20 mm, 15 mm, and 10 mm wavelength, the most suitable SH guided wave modes are SH₁ at 25mm - 285 kHz, SH₀ at 20 mm - 160 kHz, SH₀ at 15 mm - 210 kHz, SH₁ at 15 mm - 330 kHz, SH₀ at 10 mm - 310 kHz and SH₁ at 10 mm - 400 kHz, showing approximated attenuation of 21 dB/m, 3 dB/m, 15 dB/m, 13 dB/m, 4 dB/m and 17 dB/m, respectively, and clear defect identification by mean of its reflectivity. Therefore, the present study is useful in order to design a reliable experimental setup when analyzing a pipe whose coating has viscoelastic properties.

Keywords

Ultrasonic waves; Shear Horizontal waves; Viscoelastic proprieties; Permanent Periodic Magnet; Finite element mehtod;

Sumário

1	Introdução	34
1.1	Revisão bibliográfica	35
1.2	Objetivo	40
1.3	Contribuições	40
1.4	Publicações	41
1.5	Estrutura da dissertação	41
2	Revisão teórica	42
2.1	Transdutores acústicos eletromagnéticos	42
2.1.1	Transdução por força de Lorentz	42
2.2	Ondas cisalhantes horizontais em placas	43
2.2.1	Equação de dispersão	44
2.2.2	Velocidade de fase	46
2.2.3	Velocidade de grupo	47
2.2.4	Geração de ondas SH por EMAT	48
2.3	Ondas cisalhantes horizontais circunferenciais	50
2.4	Ondas guiadas em meios viscoelásticos	53
3	Método semi-analítico de elementos finitos	55
3.1	Teoria	55
3.2	Teste de convergência	55
3.2.1	Teste de convergência com 1 camada	56
3.2.2	Teste de convergência com 2 camadas	58
3.3	Efeito da espessura do revestimento	59
3.3.1	Modos no revestimento	62
3.3.1.1	Primeiro modo do revestimento	63
3.3.1.2	Segundo modo do revestimento	65
3.3.1.3	Conclusão	67
3.3.2	Modos no metal	67
3.3.2.1	50 mm	67
3.3.2.2	25 mm	70
3.3.2.3	20 mm	76
3.3.2.4	15 mm	82
3.3.2.5	10 mm	88
3.3.2.6	Conclusão	93
3.3.3	Alteração de material de revestimento	94
3.3.3.1	25 mm	96
3.3.3.2	20 mm	100
3.3.3.3	15 mm	102
3.3.3.4	10 mm	105
3.3.3.5	Conclusão	108
3.3.4	Alteração nas constantes do material	110
3.3.4.1	Alteração na constante de atenuação - Aumento de 10 %	110
3.3.4.2	Alteração na constante de atenuação - Redução de 10 %	113
3.3.4.3	Alteração na constante de velocidade de fase - Aumento de 10 %	114
3.3.4.4	Alteração na constante de velocidade de fase - Redução de 10 %	117
3.3.5	Conclusão	121

4	Modelo de elementos finitos	123
4.1	Teoria	123
4.2	Teste de convergência	124
4.3	Comparação com o modelo analítico	126
4.3.1	Comprimento de onda de 25 mm	129
4.3.2	Comprimento de onda de 20 mm	131
4.3.3	Comprimento de onda de 15 mm	134
4.3.4	Comprimento de onda de 10 mm	138
4.4	Análise de defeitos	140
4.4.1	Análise de detecção de defeitos em comprimento de onda de 25 mm	141
4.4.2	Análise de detecção de defeitos em comprimento de onda de 20 mm	144
4.4.3	Análise de detecção de defeitos em comprimento de onda de 15 mm	147
4.4.4	Análise de detecção de defeitos em comprimento de onda de 10 mm	150
4.5	Conclusão	153
5	Conclusão	154
5.1	Trabalhos futuros	155
	Bibliografia	156
A	Análise completa do método SAFE	161
A.1	Método SAFE para ondas circunferenciais	161
A.2	Abordagem para ondas CSH	166
B	Alteração nas constantes do material	168
B.1	Alteração na constante de atenuação - Redução de 25 %	168
B.2	Alteração na constante de atenuação - Redução de 50 %	170
B.3	Alteração na constante de atenuação - Redução de 75 %	171
B.4	Alteração na constante de velocidade de fase - Redução de 25 %	173
B.5	Alteração na constante de velocidade de fase - Redução de 50 %	177
B.6	Alteração na constante de velocidade de fase - Redução de 75 %	179
C	Processamento de dados do modelo analítico	182
D	Processamento de dados do modelo numérico	186
D.1	Introdução	186
D.2	Cálculo de atenuação	187
D.2.1	Análise de defeitos	188

Lista de figuras

- Figura 2.1 Ondas SH numa placa, onde a direção de propagação está em x e os deslocamentos das partículas em y , baseado em [1]. 44
- Figura 2.2 Curvas de velocidade de fase dos modos SH para uma placa de alumínio ($c_T = 3163m/s$) de 5mm. Os modos simétricos estão ilustrados em linhas contínuas, enquanto os antissimétricos por linhas pontilhadas. 47
- Figura 2.3 Curvas de velocidade de grupo dos modos SH para uma placa de alumínio ($c_T = 3163m/s$) de 5mm. Os modos simétricos estão ilustrados em linhas contínuas, enquanto os antissimétricos por linhas pontilhadas. 48
- Figura 2.4 Esquemático de um EMAT de ímãs periódicos para geração de ondas ultrassônicas. Os blocos vermelhos são ímãs com o polo norte no lado inferior, e os blocos azuis são ímãs com o polo sul no lado inferior. As setas cinzas representam a densidade de corrente induzida e as setas amarelas representam as forças de Lorentz geradas pela interação da corrente induzida e do campo magnético dos ímãs. 49
- Figura 2.5 Relação de cada comprimento de onda com as curvas de dispersão de ondas SH para uma placa de espessura de 7 mm. As curvas de dispersão estão em vermelho e as linhas tracejadas denotam cada comprimento de onda, a saber, em preto 10 mm, em azul 15 mm, em rosa 20 mm, em verde 25 mm e, por fim, em ciano 50 mm. 49
- Figura 2.6 Sistemas de coordenadas cilíndricas utilizado para cálculos de ondas CSH. 50
- Figura 2.7 Curvas de velocidade de fase em função da frequência. Em vermelho, tem-se a curva para uma placa de aço de 5 mm, e em azul para um duto de raio interno de espessura de 5 mm e raio externo de 10 cm. 52
- Figura 2.8 Velocidade de fase de ondas CSH para diferentes razões entre raio interno e externo. Os pontos em vermelho denotam razão de 0.95, em preto possui razão de 0.75, em ciano razão de 0.5, e em rosa razão de 0.2. As curvas em amarelo denotam os modos SH em uma placa de espessura equivalente. 53
- Figura 3.1 Curvas de dispersão do caso de estudo visto em Tab. 3.1. Em (a) temos a curva de velocidade de fase e em (b) a curva de atenuação. 56
- Figura 3.2 Resultado do teste de convergência para 1 camada de polietileno. Em (a) e (b) tem-se a curva de velocidade de fase e em (c) e (d), a curva de atenuação. (b) denota o zoom da Fig. (a), e (d) o zoom da Fig. (c) 57
- Figura 3.3 Curvas de dispersão do caso de estudo da Tab. 3.3. Em (a) tem-se a curva de velocidade de fase e em (b), a curva de atenuação. 58
- Figura 3.4 Resultado do teste de convergência para 2 camadas, a saber, aço de 6.35 mm e polietileno de 2.0 mm de espessura. Em (a) e (b) tem-se a curva de velocidade de fase e em (c) e (d), a curva de atenuação. 59

Figura 3.5 Curvas de dispersão para ondas CSH em um duto com uma camada de aço de 6.35 mm e uma camada revestimento de polietileno de diferentes espessuras, a saber, 1.0 mm em pontos vermelhos (a)-(c), 1.5 mm em pontos pretos (d)-(f), 2.0 mm em pontos cianos (g)-(i) e 2.5 mm em pontos rosas (j)-(l). As curvas em amarelo denotam a velocidade de fase para uma placa de aço de mesma espessura sem revestimento (a,d,g,h). Na primeira coluna, tem-se a curva de velocidade de fase, onde as linhas tracejadas mostram a relação entre frequência e velocidade para diferentes comprimentos de onda, a saber, 1.0 mm, 1.5 mm, 2.0 mm e 2.5 mm. Nas demais colunas têm-se as curvas de atenuação. 60

Figura 3.6 Perfis do modo em 210 kHz com comprimento de onda de 15 mm para uma espessura de revestimento de 1.5 mm. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento. 61

Figura 3.7 Perfis do modo em 165 kHz com comprimento de onda de 15 mm para uma espessura de revestimento de 1.5 mm. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento. 62

Figura 3.8 Curvas de dispersão semelhantes a Fig. 3.5 com adição das regiões de operação em modos do revestimento a serem estudados. Em (a) temos a curva de velocidade de fase, onde as linhas tracejadas mostram a relação entre frequência e velocidade para diferentes comprimentos de onda, a saber, 1.0 mm, 1.5 mm, 2.0 mm e 2.5 mm. Em (b) tem-se as curvas de atenuação. 62

Figura 3.9 Perfis do modo em 235 kHz com comprimento de onda de 25 mm para uma espessura de revestimento de 1.0 mm, com atenuação de 1700 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento. 63

Figura 3.10 Perfis do modo em 160 kHz com comprimento de onda de 25 mm para uma espessura de revestimento de 1.5 mm, com atenuação de 1500 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento. 64

- Figura 3.11 Perfis do modo em 130 kHz com comprimento de onda de 15 mm para uma espessura de revestimento de 2.0 mm, com atenuação de 725 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento. 64
- Figura 3.12 Perfis do modo em 110 kHz com comprimento de onda de 15 mm para uma espessura de revestimento de 2.5 mm, com atenuação de 550 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento. 65
- Figura 3.13 Perfis do modo em 355 kHz com comprimento de onda de 15 mm para uma espessura de revestimento de 2.0 mm, com atenuação de 5150 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento. 66
- Figura 3.14 Perfis do modo em 300 kHz com comprimento de onda de 15 mm para uma espessura de revestimento de 2.5 mm, com atenuação de 3500 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento. 66
- Figura 3.15 Curvas de dispersão semelhantes a Fig. 3.5 com adição da região de operação em 50 mm a ser estudada. Em (a) temos a curva de velocidade de fase, onde as linhas tracejadas mostram a relação entre frequência e velocidade para diferentes comprimentos de onda, a saber, 1.0 mm, 1.5 mm, 2.0 mm e 2.5 mm. Em (b) tem-se as curvas de atenuação. 68
- Figura 3.16 Perfis do modo em 60 kHz com comprimento de onda de 50 mm para uma espessura de revestimento de 1.0 mm, com atenuação de 0.15 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento. 68

- Figura 3.17 Perfis do modo em 60 kHz com comprimento de onda de 50 mm para uma espessura de revestimento de 1.5 mm, com atenuação de 0.4 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento. 69
- Figura 3.18 Perfis do modo em 60 kHz com comprimento de onda de 50 mm para uma espessura de revestimento de 2.0 mm, com atenuação de 1 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento. 69
- Figura 3.19 Perfis do modo em 60 kHz com comprimento de onda de 50 mm para uma espessura de revestimento de 2.5 mm, com atenuação de 2 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento. 70
- Figura 3.20 Curvas de dispersão semelhantes a Fig. 3.5 com adição das regiões de operação em 25 mm a serem estudadas. Em (a) temos a curva de velocidade de fase, onde as linhas tracejadas mostram a relação entre frequência e velocidade para diferentes comprimentos de onda, a saber, 1.0 mm, 1.5 mm, 2.0 mm e 2.5 mm. Em (b) e (c) tem-se as curvas de atenuação. 71
- Figura 3.21 Perfis do modo em 125 kHz com comprimento de onda de 25 mm para uma espessura de revestimento de 1.0 mm, com atenuação de 1 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento. 72
- Figura 3.22 Perfis do modo em 125 kHz com comprimento de onda de 25 mm para uma espessura de revestimento de 1.5 mm, com atenuação de 7.5 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento. 72

- Figura 3.23 Perfis do modo em 125 kHz com comprimento de onda de 25 mm para uma espessura de revestimento de 2.0 mm, com atenuação de 80 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento. 73
- Figura 3.24 Perfis do modo em 125 kHz com comprimento de onda de 25 mm para uma espessura de revestimento de 2.5 mm, com atenuação de 15 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento. 73
- Figura 3.25 Perfis do modo em 285 kHz com comprimento de onda de 25 mm para uma espessura de revestimento de 1.0 mm, com atenuação de 100 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento. 74
- Figura 3.26 Perfis do modo em 285 kHz com comprimento de onda de 25 mm para uma espessura de revestimento de 1.5 mm, com atenuação de 20 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento. 75
- Figura 3.27 Perfis do modo em 285 kHz com comprimento de onda de 25 mm para uma espessura de revestimento de 2.0 mm, com atenuação de 25 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento. 75
- Figura 3.28 Perfis do modo em 285 kHz com comprimento de onda de 25 mm para uma espessura de revestimento de 2.5 mm, com atenuação de 200 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento. 76

- Figura 3.29 Curvas de dispersão semelhantes a Fig. 3.5 com adição das regiões de operação em 20 mm a serem estudadas. Em (a) temos a curva de velocidade de fase, onde as linhas tracejadas mostram a relação entre frequência e velocidade para diferentes comprimentos de onda, a saber, 1.0 mm, 1.5 mm, 2.0 mm e 2.5 mm. Em (b) e (c) tem-se as curvas de atenuação. 77
- Figura 3.30 Perfis do modo em 160 kHz com comprimento de onda de 20 mm para uma espessura de revestimento de 1.0 mm, com atenuação de 2.5 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento. 78
- Figura 3.31 Perfis do modo em 160 kHz com comprimento de onda de 20 mm para uma espessura de revestimento de 1.5 mm, com atenuação de 335 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento. 78
- Figura 3.32 Perfis do modo em 160 kHz com comprimento de onda de 20 mm para uma espessura de revestimento de 2.0 mm, com atenuação de 15 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento. 79
- Figura 3.33 Perfis do modo em 160 kHz com comprimento de onda de 20 mm para uma espessura de revestimento de 2.5 mm, com atenuação de 5.5 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento. 79
- Figura 3.34 Perfis do modo em 300 kHz com comprimento de onda de 20 mm para uma espessura de revestimento de 1.0 mm, com atenuação de 60 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento. 80

- Figura 3.35 Perfis do modo em 300 kHz com comprimento de onda de 20 mm para uma espessura de revestimento de 1.5 mm, com atenuação de 15 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento. 81
- Figura 3.36 Perfis do modo em 300 kHz com comprimento de onda de 20 mm para uma espessura de revestimento de 2.0 mm, com atenuação de 25 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento. 81
- Figura 3.37 Perfis do modo em 300 kHz com comprimento de onda de 20 mm para uma espessura de revestimento de 2.5 mm, com atenuação de 210 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento. 82
- Figura 3.38 Curvas de dispersão semelhantes a Fig. 3.5 com adição da região de operação em 15 mm a ser estudada. Em (a) temos a curva de velocidade de fase, onde as linhas tracejadas mostram a relação entre frequência e velocidade para diferentes comprimentos de onda, a saber, 1.0 mm, 1.5 mm, 2.0 mm e 2.5 mm. Em (b) tem-se as curvas de atenuação. 83
- Figura 3.39 Perfis do modo em 210 kHz com comprimento de onda de 15 mm para uma espessura de revestimento de 1.0 mm, com atenuação de 20 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento. 83
- Figura 3.40 Perfis do modo em 210 kHz com comprimento de onda de 15 mm para uma espessura de revestimento de 1.5 mm, com atenuação de 15 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento. 84

- Figura 3.41 Perfis do modo em 210 kHz com comprimento de onda de 15 mm para uma espessura de revestimento de 2.0 mm, com atenuação de 4.5 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento. 85
- Figura 3.42 Perfis do modo em 210 kHz com comprimento de onda de 15 mm para uma espessura de revestimento de 2.5 mm, com atenuação de 4.5 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento. 85
- Figura 3.43 Perfis do modo em 330 kHz com comprimento de onda de 15 mm para uma espessura de revestimento de 1.0 mm, com atenuação de 30 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento. 86
- Figura 3.44 Perfis do modo em 330 kHz com comprimento de onda de 15 mm para uma espessura de revestimento de 1.5 mm, com atenuação de 10 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento. 86
- Figura 3.45 Perfis do modo em 330 kHz com comprimento de onda de 15 mm para uma espessura de revestimento de 2.0 mm, com atenuação de 50 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento. 87
- Figura 3.46 Perfis do modo em 330 kHz com comprimento de onda de 15 mm para uma espessura de revestimento de 2.5 mm, com atenuação de 50 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento. 87

- Figura 3.47 Curvas de dispersão semelhantes a Fig. 3.5 com adição da região de operação em 10 mm a ser estudada. Em (a) temos a curva de velocidade de fase, onde as linhas tracejadas mostram a relação entre frequência e velocidade para diferentes comprimentos de onda, a saber, 1.0 mm, 1.5 mm, 2.0 mm e 2.5 mm. Em (b) tem-se as curvas de atenuação. 88
- Figura 3.48 Perfis do modo em 310 kHz com comprimento de onda de 10 mm para uma espessura de revestimento de 1.0 mm, com atenuação de 15 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento. 89
- Figura 3.49 Perfis do modo em 310 kHz com comprimento de onda de 10 mm para uma espessura de revestimento de 1.5 mm, com atenuação de 4.5 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento. 89
- Figura 3.50 Perfis do modo em 310 kHz com comprimento de onda de 10 mm para uma espessura de revestimento de 2.0 mm, com atenuação de 10 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento. 90
- Figura 3.51 Perfis do modo em 310 kHz com comprimento de onda de 10 mm para uma espessura de revestimento de 2.5 mm, com atenuação de 45 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento. 90
- Figura 3.52 Perfis do modo em 400 kHz com comprimento de onda de 10 mm para uma espessura de revestimento de 1.0 mm, com atenuação de 10 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento. 91

Figura 3.53 Perfis do modo em 400 kHz com comprimento de onda de 10 mm para uma espessura de revestimento de 1.5 mm, com atenuação de 20 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento. 92

Figura 3.54 Perfis do modo em 400 kHz com comprimento de onda de 10 mm para uma espessura de revestimento de 2.0 mm, com atenuação de 55 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento. 92

Figura 3.55 Perfis do modo em 400 kHz com comprimento de onda de 10 mm para uma espessura de revestimento de 2.5 mm, com atenuação de 20 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento. 93

Figura 3.56 Curvas de dispersão para ondas CSH em um duto com uma camada de aço de 6.35 mm e uma camada revestimento de epóxi de diferentes espessuras, a saber, 1.0 mm em pontos vermelhos (a)-(c), 1.5 mm em pontos pretos (d)-(f), 2.0 mm em pontos cianos (g)-(i) e 2.5 mm em pontos rosas (j)-(l). As curvas em amarelo denotam a velocidade de fase para uma placa de aço de mesma espessura sem revestimento (a,d,g,h). Na primeira coluna temos a curva de velocidade de fase, onde as linhas tracejadas mostram a relação entre frequência e velocidade para diferentes comprimentos de onda, a saber, 1.0 mm, 1.5 mm, 2.0 mm e 2.5 mm. Nas demais colunas tem-se as curvas de atenuação. 96

Figura 3.57 Perfis do modo em 125 kHz com comprimento de onda de 25 mm para uma espessura de revestimento de epóxi de 1.5 mm, com atenuação de 25 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento. 97

Figura 3.58 Perfis do modo em 125 kHz com comprimento de onda de 25 mm para uma espessura de revestimento de epóxi de 2.0 mm, com atenuação de 36 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento. 98

- Figura 3.59 Perfis do modo em 285 kHz com comprimento de onda de 25 mm para uma espessura de revestimento de epóxi de 1.0 mm, com atenuação de 70 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento. 98
- Figura 3.60 Perfis do modo em 285 kHz com comprimento de onda de 25 mm para uma espessura de revestimento de epóxi de 2.0 mm, com atenuação de 60 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento. 99
- Figura 3.61 Perfis do modo em 285 kHz com comprimento de onda de 25 mm para uma espessura de revestimento de epóxi de 2.5 mm, com atenuação de 110 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento. 100
- Figura 3.62 Perfis do modo em 160 kHz com comprimento de onda de 20 mm para uma espessura de revestimento de epóxi de 1.5 mm, com atenuação de 67 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento. 101
- Figura 3.63 Perfis do modo em 300 kHz com comprimento de onda de 20 mm para uma espessura de revestimento de epóxi de 2.0 mm, com atenuação de 80 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento. 102
- Figura 3.64 Perfis do modo em 300 kHz com comprimento de onda de 20 mm para uma espessura de revestimento de epóxi de 2.5 mm, com atenuação de 80 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento. 102

- Figura 3.65 Perfis do modo em 210 kHz com comprimento de onda de 15 mm para uma espessura de revestimento de epóxi de 2.5 mm, com atenuação de 4200 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento. 103
- Figura 3.66 Perfis do modo em 330 kHz com comprimento de onda de 15 mm para uma espessura de revestimento de epóxi de 2.0 mm, com atenuação de 145 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento. 104
- Figura 3.67 Perfis do modo em 330 kHz com comprimento de onda de 15 mm para uma espessura de revestimento de epóxi de 2.5 mm, com atenuação de 30 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento. 105
- Figura 3.68 Perfis do modo em 310 kHz com comprimento de onda de 10 mm para uma espessura de revestimento de epóxi de 2.0 mm, com atenuação de 40 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento. 106
- Figura 3.69 Perfis do modo em 310 kHz com comprimento de onda de 10 mm para uma espessura de revestimento de epóxi de 2.5 mm, com atenuação de 15 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento. 106
- Figura 3.70 Perfis do modo em 310 kHz com comprimento de onda de 10 mm para uma espessura de revestimento de epóxi de 1.5 mm, com atenuação de 55 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento. 107

Figura 3.71 Perfis do modo em 310 kHz com comprimento de onda de 10 mm para uma espessura de revestimento de epóxi de 2.0 mm, com atenuação de 30 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento. 108

Figura 3.72 Perfis do modo em 310 kHz com comprimento de onda de 10 mm para uma espessura de revestimento de epóxi de 2.5 mm, com atenuação de 40 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento. 108

Figura 3.73 Curvas de dispersão para ondas CSH em um duto com uma camada de aço de 6.35 mm e uma camada revestimento de epóxi com constante de atenuação aumentada em 10 % de seu valor original e de diferentes espessuras, a saber, 1.0 mm em pontos vermelhos (a)-(c), 1.5 mm em pontos pretos (d)-(f), 2.0 mm em pontos cianos (g)-(i) e 2.5 mm em pontos rosas (j)-(l). As curvas em amarelo denotam a velocidade de fase para uma placa de aço de mesma espessura sem revestimento (a,d,g,h). Na primeira coluna temos a curva de velocidade de fase, onde as linhas tracejadas mostram a relação entre frequência e velocidade para diferentes comprimentos de onda, a saber, 1.0 mm, 1.5 mm, 2.0 mm e 2.5 mm. Nas demais colunas têm-se as curvas de atenuação. 111

Figura 3.74 Curvas de dispersão para ondas CSH em um duto com uma camada de aço de 6.35 mm e uma camada revestimento de epóxi com constante de atenuação reduzida em 10 % de seu valor original e de diferentes espessuras, a saber, 1.0 mm em pontos vermelhos (a)-(c), 1.5 mm em pontos pretos (d)-(f), 2.0 mm em pontos cianos (g)-(i) e 2.5 mm em pontos rosas (j)-(l). As curvas em amarelo denotam a velocidade de fase para uma placa de aço de mesma espessura sem revestimento (a,d,g,h). Na primeira coluna tem-se a curva de velocidade de fase, onde as linhas tracejadas mostram a relação entre frequência e velocidade para diferentes comprimentos de onda, a saber, 1.0 mm, 1.5 mm, 2.0 mm e 2.5 mm. Nas demais colunas têm-se as curvas de atenuação. 113

Figura 3.75 Curvas de dispersão para ondas CSH em um duto com uma camada de aço de 6.35 mm e uma camada revestimento de epóxi com constante de velocidade de fase aumentada em 10 % de seu valor original e de diferentes espessuras, a saber, 1.0 mm em pontos vermelhos (a)-(c), 1.5 mm em pontos pretos (d)-(f), 2.0 mm em pontos cianos (g)-(i) e 2.5 mm em pontos rosas (j)-(l). As curvas em amarelo denotam a velocidade de fase para uma placa de aço de mesma espessura sem revestimento (a,d,g,h). Na primeira coluna temos a curva de velocidade de fase, onde as linhas tracejadas mostram a relação entre frequência e velocidade para diferentes comprimentos de onda, a saber, 1.0 mm, 1.5 mm, 2.0 mm e 2.5 mm. Nas demais colunas têm-se as curvas de atenuação. 115

- Figura 3.76 Perfis do modo em 300 kHz com comprimento de onda de 20 mm para uma espessura de revestimento de epóxi de 2.5 mm, com atenuação de 160 dB/m com constante de velocidade de fase em 110% do seu valor original. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento. 117
- Figura 3.77 Curvas de dispersão para ondas CSH em um duto com uma camada de aço de 6.35 mm e uma camada revestimento de epóxi com constante de velocidade de fase modificada para 90 % de seu valor original e de diferentes espessuras, a saber, 1.0 mm em pontos vermelhos (a)-(c), 1.5 mm em pontos pretos (d)-(f), 2.0 mm em pontos cianos (g)-(i) e 2.5 mm em pontos rosas (j)-(l). As curvas em amarelo denotam a velocidade de fase para uma placa de aço de mesma espessura sem revestimento (a,d,g,h). Na primeira coluna temos a curva de velocidade de fase, onde as linhas tracejadas mostram a relação entre frequência e velocidade para diferentes comprimentos de onda, a saber, 1.0 mm, 1.5 mm, 2.0 mm e 2.5 mm. Nas demais colunas têm-se as curvas de atenuação. 118
- Figura 3.78 Perfis do modo em 125 kHz com comprimento de onda de 25 mm para uma espessura de revestimento de epóxi de 1.5 mm, com atenuação de 80 dB/m com constante de velocidade de fase em 90 % do seu valor original. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento. 120
- Figura 4.1 Padrão de PPM EMAT utilizado na parte inferior de uma placa. Onde os círculos vermelhos simulam as forças de Lorentz na direção z com o tone-burst de 8 ciclos e λd denota 1 período das forças que também identifica o comprimento de onda gerado. 123
- Figura 4.2 Geometria utilizada no modelo numérico. A parte cinza da placa denota a camada de aço de 6.35 mm e a azul denota o revestimento de espessura variável. Tal placa possui 1 metro de comprimento e defeito de 10 mm de comprimento e 3 mm de altura. 124
- Figura 4.3 Sinal referente a velocidade de partícula na direção z do modo SH0 para 20 mm gerado no teste de convergência para diferentes quantidades de elementos por comprimento de onda gerado no início da placa e recebido em 150 mm. 125
- Figura 4.4 Custo computacional em minutos em função da quantidade de elementos por comprimento de onda. 126
- Figura 4.5 Erro médio quadrático calculado em função da quantidade de elementos por comprimento de onda. 126

- Figura 4.6 Curvas de dispersão para ondas SH em uma placa de aço de 6.35 mm e uma camada de revestimento de polietileno de 2.0 mm. As curvas em vermelho denotam a solução do modelo analítico, as curvas em azul denotam a velocidade de fase para a placa de aço de mesma espessura sem revestimento, e as linha tracejada denota a relação entre velocidade de fase e frequência para um comprimento de 25 mm. 129
- Figura 4.7 Perfis do modo em 129 kHz com comprimento de onda de 25 mm para uma espessura de revestimento de 2.0 mm, para modelo analítico (linha azul) e modelo numérico (linha vermelha). Em (a) tem-se a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) o fluxo de potência do vetor de Poynting normalizado. A linha em preto mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento. 130
- Figura 4.8 Amplitude pico-a-pico do vetor de velocidade do modo SH0 com 25 mm de comprimento de onda em uma placa de revestimento de polietileno de 2.0 mm de espessura. Os pontos pretos denotam os valores pico-a-pico do vetor de velocidade na direção z calculado pelo modelo no numérico e a linha vermelha a sua interpolação. 130
- Figura 4.9 Perfis do modo em 285 kHz com comprimento de onda de 25 mm para uma espessura de revestimento de 2.0 mm, para modelo analítico (linha azul) e modelo numérico (linha vermelha). Em (a) tem-se a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) o fluxo de potência do vetor de Poynting normalizado. A linha em preto mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento. 131
- Figura 4.10 Amplitude pico-a-pico do vetor de velocidade do modo SH1 com 25 mm de comprimento de onda em uma placa de revestimento de polietileno de 2.0 mm de espessura. Os pontos pretos denotam os valores pico-a-pico do vetor de velocidade na direção z calculado pelo modelo no numérico e a linha vermelha a sua interpolação. 131
- Figura 4.11 Curvas de dispersão para ondas SH em uma placa de aço de 6.35 mm e uma camada de revestimento de polietileno de 1.0 mm. As curvas em vermelho denotam a solução do modelo analítico, as curvas em azul denotam a velocidade de fase para a placa de aço de mesma espessura sem revestimento, e as linha tracejada denota a relação entre velocidade de fase e frequência para um comprimento de 20 mm. 132
- Figura 4.12 Perfis do modo em 160 kHz com comprimento de onda de 20 mm para uma espessura de revestimento de 1.0 mm, para modelo analítico (linha azul) e modelo numérico (linha vermelha). Em (a) tem-se a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) o fluxo de potência do vetor de Poynting normalizado. A linha em preto mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento. 132
- Figura 4.13 Amplitude pico-a-pico do vetor de velocidade do modo SH1 com 20 mm de comprimento de onda em uma placa de revestimento de polietileno de 1.0 mm de espessura. Os pontos pretos denotam os valores pico-a-pico do vetor de velocidade na direção z calculado pelo modelo no numérico e a linha vermelha a sua interpolação. 133

- Figura 4.14 Perfis do modo em 300 kHz com comprimento de onda de 20 mm para uma espessura de revestimento de 1.0 mm, para modelo analítico (linha azul) e modelo numérico (linha vermelha). Em (a) tem-se a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) o fluxo de potência do vetor de Poynting normalizado. A linha em preto mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento. 133
- Figura 4.15 Amplitude pico-a-pico do vetor de velocidade do modo SH1 com 20 mm de comprimento de onda em uma placa de revestimento de polietileno de 1.0 mm de espessura. Os pontos pretos denotam os valores pico-a-pico do vetor de velocidade na direção z calculado pelo modelo no numérico e a linha vermelha a sua interpolação. 134
- Figura 4.16 Curvas de dispersão para ondas SH em uma placa de aço de 6.35 mm e uma camada de revestimento de polietileno de 1.5 mm. As curvas em vermelho denotam a solução do modelo analítico, as curvas em azul denotam a velocidade de fase para a placa de aço de mesma espessura sem revestimento, e as linha tracejada denota a relação entre velocidade de fase e frequência para um comprimento de 15 mm. 135
- Figura 4.17 Perfis do modo em 215 kHz com comprimento de onda de 15 mm para uma espessura de revestimento de 1.5 mm, para modelo analítico (linha azul) e modelo numérico (linha vermelha). Em (a) tem-se a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) o fluxo de potência do vetor de Poynting normalizado. A linha em preto mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento. 135
- Figura 4.18 Amplitude pico-a-pico do vetor de velocidade do modo SH0 com 15 mm de comprimento de onda em uma placa de revestimento de polietileno de 1.5 mm de espessura. Os pontos pretos denotam os valores pico-a-pico do vetor de velocidade na direção z calculado pelo modelo no numérico e a linha vermelha a sua interpolação. 136
- Figura 4.19 Perfis do modo em 330 kHz com comprimento de onda de 15 mm para uma espessura de revestimento de 1.5 mm, para modelo analítico (linha azul) e modelo numérico (linha vermelha). Em (a) tem-se a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) o fluxo de potência do vetor de Poynting normalizado. A linha em preto mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento. 136
- Figura 4.20 Amplitude pico-a-pico do vetor de velocidade do modo SH1 com 15 mm de comprimento de onda em uma placa de revestimento de polietileno de 1.5 mm de espessura. Os pontos pretos denotam os valores pico-a-pico do vetor de velocidade na direção z calculado pelo modelo no numérico e a linha vermelha a sua interpolação. 137
- Figura 4.21 Curvas de dispersão para ondas SH em uma placa de aço de 6.35 mm e uma camada de revestimento de polietileno de 1.5 mm. As curvas em vermelho denotam a solução do modelo analítico, as curvas em azul denotam a velocidade de fase para a placa de aço de mesma espessura sem revestimento, e as linha tracejada denota a relação entre velocidade de fase e frequência para um comprimento de 10 mm. 138

- Figura 4.22 Perfis do modo em 310 kHz com comprimento de onda de 10 mm para uma espessura de revestimento de 1.5 mm, para modelo analítico (linha azul) e modelo numérico (linha vermelha). Em (a) tem-se a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) o fluxo de potência do vetor de Poynting normalizado. A linha em preto mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento. 139
- Figura 4.23 Amplitude pico-a-pico do vetor de velocidade do modo SH0 com 10 mm de comprimento de onda em uma placa de revestimento de polietileno de 1.5 mm de espessura. Os pontos pretos denotam os valores pico-a-pico do vetor de velocidade na direção z calculado pelo modelo no numérico e a linha vermelha a sua interpolação. 139
- Figura 4.24 Perfis do modo em 400 kHz com comprimento de onda de 10 mm para uma espessura de revestimento de 1.5 mm, para modelo analítico (linha azul) e modelo numérico (linha vermelha). Em (a) tem-se a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) o fluxo de potência do vetor de Poynting normalizado. A linha em preto mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento. 140
- Figura 4.25 Amplitude pico-a-pico do vetor de velocidade do modo SH1 com 10 mm de comprimento de onda em uma placa de revestimento de polietileno de 1.5 mm de espessura. Os pontos pretos denotam os valores pico-a-pico do vetor de velocidade na direção z calculado pelo modelo no numérico e a linha vermelha a sua interpolação. 140
- Figura 4.26 Curvas de dispersão para ondas SH em uma placa de aço de 6.35 mm e uma camada de revestimento de polietileno de 2.0 mm. As curvas em vermelho denotam a solução do modelo analítico, as curvas em azul denotam a velocidade de fase para a placa de aço de mesma espessura sem revestimento, e as linha tracejada denota a relação entre velocidade de fase e frequência para um comprimento de 25 mm. 141
- Figura 4.27 Forma de onda do campo de velocidade na direção z SH0 em 125 kHz com comprimento de onda de 25 mm. Em (a) mostra-se a onda SH detectada em 300 mm, no qual a curva em vermelho é a onda propagando em uma placa sem defeitos e a curva em azul é a onda propagando em uma placa com defeito. Em (b) mostra-se o mapa de cor da onda propagando na parte inferior da placa, onde a abscissa é a distância à posição de excitação na direção x na parte inferior da placa, a ordenada é o tempo, e a cota, a amplitude do campo de velocidade. 142
- Figura 4.28 Forma de onda do campo de velocidade na direção z do modo SH1 em 285 kHz com comprimento de onda de 25 mm. Em (a) mostra-se a onda SH detectada em 300 mm, no qual a curva em vermelho é a onda propagando em uma placa sem defeitos e a curva em azul é a onda propagando em uma placa com defeito. Em (b) mostra-se o mapa de cor da onda propagando na parte inferior da placa, onde a abscissa é a distância à posição de excitação na direção x na parte inferior da placa, a ordenada é o tempo, e a cota, a amplitude do campo de velocidade. 143

Figura 4.29 Curvas de dispersão para ondas SH em uma placa de aço de 6.35 mm e uma camada de revestimento de polietileno de 1.0 mm. As curvas em vermelho denotam a solução do modelo analítico, as curvas em azul denotam a velocidade de fase para a placa de aço de mesma espessura sem revestimento, e as linha tracejada denota a relação entre velocidade de fase e frequência para um comprimento de 20 mm. 144

Figura 4.30 Forma de onda do campo de velocidade na direção z do modo SH0 em 160 kHz com comprimento de onda de 20 mm. Em (a) mostra-se a onda SH detectada em 300 mm, no qual a curva em vermelho é a onda propagando em uma placa sem defeitos e a curva em azul é a onda propagando em uma placa com defeito. Em (b) mostra-se o mapa de cor da onda propagando na parte inferior da placa, onde a abscissa é a distância à posição de excitação na direção x na parte inferior da placa, a ordenada é o tempo, e a cota, a amplitude do campo de velocidade. 145

Figura 4.31 Forma de onda do campo de velocidade na direção z do modo SH1 em 300 kHz com comprimento de onda de 20 mm. Em (a) mostra-se a onda SH detectada em 300 mm, no qual a curva em vermelho é a onda propagando em uma placa sem defeitos e a curva em azul é a onda propagando em uma placa com defeito. Em (b) mostra-se o mapa de cor da onda propagando na parte inferior da placa, onde a abscissa é a distância à posição de excitação na direção x na parte inferior da placa, a ordenada é o tempo, e a cota, a amplitude do campo de velocidade. 146

Figura 4.32 Curvas de dispersão para ondas SH em uma placa de aço de 6.35 mm e uma camada de revestimento de polietileno de 1.5 mm. As curvas em vermelho denotam a solução do modelo analítico, as curvas em azul denotam a velocidade de fase para a placa de aço de mesma espessura sem revestimento, e as linha tracejada denota a relação entre velocidade de fase e frequência para um comprimento de 15 mm. 147

Figura 4.33 Forma de onda do campo de velocidade na direção z do modo SH0 em 210 kHz com comprimento de onda de 15 mm. Em (a) mostra-se a onda SH detectada em 300 mm, no qual a curva em vermelho é a onda propagando em uma placa sem defeitos e a curva em azul é a onda propagando em uma placa com defeito. Em (b) mostra-se o mapa de cor da onda propagando na parte inferior da placa, onde a abscissa é a distância à posição de excitação na direção x na parte inferior da placa, a ordenada é o tempo, e a cota, a amplitude do campo de velocidade. 148

Figura 4.34 Forma de onda do campo de velocidade na direção z do modo SH1 em 330 kHz com comprimento de onda de 15 mm. Em (a) mostra-se a onda SH detectada em 300 mm, no qual a curva em vermelho é a onda propagando em uma placa sem defeitos e a curva em azul é a onda propagando em uma placa com defeito. Em (b) mostra-se o mapa de cor da onda propagando na parte inferior da placa, onde a abscissa é a distância à posição de excitação na direção x na parte inferior da placa, a ordenada é o tempo, e a cota, a amplitude do campo de velocidade. 149

- Figura 4.35 Curvas de dispersão para ondas SH em uma placa de aço de 6.35 mm e uma camada de revestimento de polietileno de 1.5 mm. As curvas em vermelho denotam a solução do modelo analítico, as curvas em azul denotam a velocidade de fase para a placa de aço de mesma espessura sem revestimento, e as linha tracejada denota a relação entre velocidade de fase e frequência para um comprimento de 10 mm. 150
- Figura 4.36 Forma de onda do campo de velocidade na direção z do modo SH0 em 310 kHz com comprimento de onda de 10 mm. Em (a) mostra-se a onda SH detectada em 300 mm, no qual a curva em vermelho é a onda propagando em uma placa sem defeitos e a curva em azul é a onda propagando em uma placa com defeito. Em (b) mostra-se o mapa de cor da onda propagando na parte inferior da placa, onde a abscissa é a distância à posição de excitação na direção x na parte inferior da placa, a ordenada é o tempo, e a cota, a amplitude do campo de velocidade. 151
- Figura 4.37 Forma de onda do campo de velocidade na direção z do modo SH1 em 400 kHz com comprimento de onda de 10 mm. Em (a) mostra-se a onda SH detectada em 300 mm, no qual a curva em vermelho é a onda propagando em uma placa sem defeitos e a curva em azul é a onda propagando em uma placa com defeito. Em (b) mostra-se o mapa de cor da onda propagando na parte inferior da placa, onde a abscissa é a distância à posição de excitação na direção x na parte inferior da placa, a ordenada é o tempo, e a cota, a amplitude do campo de velocidade. 152
- Figura A.1 Modelo usado para o desenvolvimento do método SAFE, os pontos pretos definem a discretização do guia em elementos. 161
- Figura B.1 Curvas de dispersão para ondas CSH em um duto com uma camada de aço de 6.35 mm e uma camada revestimento de epóxi com constante de atenuação reduzida em 25 % de seu valor original e de diferentes espessuras, a saber, 1.0 mm em pontos vermelhos, 1.5 mm em pontos pretos, 2.0 mm em pontos cianos e 2.5 mm em pontos rosas. As curvas em amarelo denotam a velocidade de fase para uma placa de aço de mesma espessura sem revestimento. Em (a) temos a curva de velocidade de fase, onde as linhas tracejadas mostram a relação entre frequência e velocidade para diferentes comprimentos de onda, a saber, 1.0 mm, 1.5 mm, 2.0 mm e 2.5 mm. Em (b) e (c) tem-se as curvas de atenuação. 168
- Figura B.2 Curvas de dispersão para ondas CSH em um duto com uma camada de aço de 6.35 mm e uma camada revestimento de epóxi com constante de atenuação reduzida em 50 % de seu valor original e de diferentes espessuras, a saber, 1.0 mm em pontos vermelhos, 1.5 mm em pontos pretos, 2.0 mm em pontos cianos e 2.5 mm em pontos rosas. As curvas em amarelo denotam a velocidade de fase para uma placa de aço de mesma espessura sem revestimento. Em (a) temos a curva de velocidade de fase, onde as linhas tracejadas mostram a relação entre frequência e velocidade para diferentes comprimentos de onda, a saber, 1.0 mm, 1.5 mm, 2.0 mm e 2.5 mm. Em (b) e (c) tem-se as curvas de atenuação. 170

Figura B.3 Curvas de dispersão para ondas CSH em um duto com uma camada de aço de 6.35 mm e uma camada revestimento de epóxi com constante de atenuação reduzida de 75 % de seu valor original e de diferentes espessuras, a saber, 1.0 mm em pontos vermelhos, 1.5 mm em pontos pretos, 2.0 mm em pontos cianos e 2.5 mm em pontos rosas. As curvas em amarelo denotam a velocidade de fase para uma placa de aço de mesma espessura sem revestimento. Em (a) temos a curva de velocidade de fase, onde as linhas tracejadas mostram a relação entre frequência e velocidade para diferentes comprimentos de onda, a saber, 1.0 mm, 1.5 mm, 2.0 mm e 2.5 mm. Em (b) e (c) tem-se as curvas de atenuação. 172

Figura B.4 Curvas de dispersão para ondas CSH em um duto com uma camada de aço de 6.35 mm e uma camada revestimento de epóxi com constante de velocidade de fase reduzida de 25 % de seu valor original e de diferentes espessuras, a saber, 1.0 mm em pontos vermelhos, 1.5 mm em pontos pretos, 2.0 mm em pontos cianos e 2.5 mm em pontos rosas. As curvas em amarelo denotam a velocidade de fase para uma placa de aço de mesma espessura sem revestimento. Em (a) temos a curva de velocidade de fase, onde as linhas tracejadas mostram a relação entre frequência e velocidade para diferentes comprimentos de onda, a saber, 1.0 mm, 1.5 mm, 2.0 mm e 2.5 mm. Em (b) e (c) tem-se as curvas de atenuação. 174

Figura B.5 Perfis do modo em 160 kHz com comprimento de onda de 25 mm para uma espessura de revestimento de epóxi de 1.0 mm, com atenuação de 80 dB/m com constante de velocidade de fase em 75 % do seu valor original. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento. 176

Figura B.6 Curvas de dispersão para ondas CSH em um duto com uma camada de aço de 6.35 mm e uma camada revestimento de epóxi com constante de velocidade de fase reduzida de 50 % de seu valor original e de diferentes espessuras, a saber, 1.0 mm em pontos vermelhos, 1.5 mm em pontos pretos, 2.0 mm em pontos cianos e 2.5 mm em pontos rosas. As curvas em amarelo denotam a velocidade de fase para uma placa de aço de mesma espessura sem revestimento. Em (a) temos a curva de velocidade de fase, onde as linhas tracejadas mostram a relação entre frequência e velocidade para diferentes comprimentos de onda, a saber, 1.0 mm, 1.5 mm, 2.0 mm e 2.5 mm. Em (b) e (c) tem-se as curvas de atenuação. 177

Figura B.7 Perfis do modo em 330 kHz com comprimento de onda de 15 mm para uma espessura de revestimento de epóxi de 1.0 mm, com atenuação de 75 dB/m com constante de velocidade de fase em 50 % do seu valor original. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento. 179

- Figura B.8 Curvas de dispersão para ondas CSH em um duto com uma camada de aço de 6.35 mm e uma camada revestimento de epóxi com constante de velocidade de fase reduzida de 75 % de seu valor original e de diferentes espessuras, a saber, 1.0 mm em pontos vermelhos, 1.5 mm em pontos pretos, 2.0 mm em pontos cianos e 2.5 mm em pontos rosas. As curvas em amarelo denotam a velocidade de fase para uma placa de aço de mesma espessura sem revestimento. Em (a) temos a curva de velocidade de fase, onde as linhas tracejadas mostram a relação entre frequência e velocidade para diferentes comprimentos de onda, a saber, 1.0 mm, 1.5 mm, 2.0 mm e 2.5 mm. Em (b) e (c) tem-se as curvas de atenuação. 180
- Figura B.9 Perfis do modo em 405 kHz com comprimento de onda de 10 mm para uma espessura de revestimento de epóxi de 1.0 mm, com atenuação de 115 dB/m com constante de velocidade de fase em 25 % do seu valor original. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento. 180
- Figura C.1 Diagrama de blocos para o modelo analítico. 182
- Figura C.2 Planilha das características dos materiais a serem inseridas. 183
- Figura D.1 Diagrama de blocos para o cálculo de atenuação do modelo numérico. 188
- Figura D.2 Diagrama de blocos para a análise de defeitos. 188

Lista de tabelas

Tabela 3.1	Caso de estudo de 5 mm de polietileno.	56
Tabela 3.2	Tempo de execução do modelo analítico para diferentes quantidades de elementos para uma camada única.	57
Tabela 3.3	Caso de estudo de uma camada de 6.35 mm de aço e uma camada de 2.0 mm de polietileno.	58
Tabela 3.4	Tempo de execução do modelo analítico para diferentes quantidades de elementos para uma camada de aço e revestimento de polietileno.	59
Tabela 3.5	Atenuação dos modos do revestimento para diferentes espessuras da camada de polietileno.	67
Tabela 3.6	Atenuação dos modos do metal em baixa frequência para diferentes espessuras da camada de polietileno.	70
Tabela 3.7	Atenuação dos modos do metal com 25mm de comprimento de onda em 125 kHz para diferentes espessuras da camada de polietileno.	74
Tabela 3.8	Atenuação dos modos do metal com 25 mm de comprimento de onda em 285 kHz para diferentes espessuras da camada de polietileno.	76
Tabela 3.9	Atenuação dos modos do metal com 20 mm de comprimento de onda em 160 kHz para diferentes espessuras da camada de polietileno.	80
Tabela 3.10	Atenuação dos modos do metal com 20 mm de comprimento de onda em 300 kHz para diferentes espessuras da camada de polietileno.	82
Tabela 3.11	Atenuação dos modos do metal com 15 mm de comprimento de onda em 210 kHz para diferentes espessuras da camada de polietileno.	84
Tabela 3.12	Atenuação dos modos do metal com 15 mm de comprimento de onda em 330 kHz para diferentes espessuras da camada de polietileno.	88
Tabela 3.13	Atenuação dos modos do metal com 10 mm de comprimento de onda em 310 kHz para diferentes espessuras da camada de polietileno.	91
Tabela 3.14	Atenuação dos modos do metal com 10 mm de comprimento de onda em 400 kHz para diferentes espessuras da camada de polietileno.	93
Tabela 3.15	Atenuação dos modos estudados para as diferentes espessuras de revestimento de polietileno.	94
Tabela 3.16	Caso de estudo de uma camada de 6.35 mm de aço e uma camada de 2.0 mm de epóxi.	95
Tabela 3.17	Atenuação dos modos do metal com 25 mm de comprimento de onda em 125 kHz para diferentes espessuras da camada de polietileno e epóxi.	96
Tabela 3.18	Atenuação dos modos do metal com 25 mm de comprimento de onda em 285 kHz para diferentes espessuras da camada de polietileno e epóxi.	97
Tabela 3.19	Atenuação dos modos do metal com 20 mm de comprimento de onda em 160 kHz para diferentes espessuras da camada de polietileno e epóxi.	100
Tabela 3.20	Atenuação dos modos do metal com 20 mm de comprimento de onda em 300 kHz para diferentes espessuras da camada de polietileno e epóxi.	101
Tabela 3.21	Atenuação dos modos do metal com 15 mm de comprimento de onda em 210 kHz para diferentes espessuras da camada de polietileno e epóxi.	103

Tabela 3.22 Atenuação dos modos do metal com 15 mm de comprimento de onda em 330 kHz para diferentes espessuras da camada de polietileno e epóxi.	103
Tabela 3.23 Atenuação dos modos do metal com 10 mm de comprimento de onda em 310 kHz para diferentes espessuras da camada de polietileno e epóxi.	105
Tabela 3.24 Atenuação dos modos do metal com 10 mm de comprimento de onda em 400 kHz para diferentes espessuras da camada de polietileno e epóxi.	107
Tabela 3.25 Atenuação dos modos estudados para as diferentes espessuras de revestimento de epóxi.	109
Tabela 3.26 Comparação dos valores de atenuação dos modos estudados para as diferentes espessuras de revestimento de epóxi para constante de atenuação igual com aumento de 10 % de seu valor original.	112
Tabela 3.27 Comparação dos valores de atenuação dos modos estudados para as diferentes espessuras de revestimento de epóxi para constante de atenuação reduzida em 10% de seu valor original.	114
Tabela 3.28 Comparação dos valores de atenuação dos modos estudados para as diferentes espessuras de revestimento de epóxi para constante de velocidade de fase igual com aumento de 10 % de seu valor original. <i>*No cálculo da média foi desconsiderado o valor do modo 15 mm - 330 kHz para uma espessura de 2.0 mm, devido ao cruzamento entre o modo do metal e do revestimento aumentar a atenuação consideravelmente.</i>	116
Tabela 3.29 Comparação dos valores de atenuação dos modos estudados para as diferentes espessuras de revestimento de epóxi para constante de velocidade de fase igual a 90 % de seu valor original.	119
Tabela 4.1 Atenuação dos modos do metal com 25 mm de comprimento de onda para espessura de polietileno de 2.0 mm.	130
Tabela 4.2 Atenuação dos modos do metal com 20 mm de comprimento de onda para espessura de polietileno de 1.0 mm.	134
Tabela 4.3 Atenuação dos modos do metal com 15 mm de comprimento de onda para espessura de polietileno de 1.5 mm.	135
Tabela 4.4 Atenuação dos modos do metal com 10 mm de comprimento de onda para espessura de polietileno de 1.5 mm.	138
Tabela B.1 Comparação dos valores de atenuação dos modos estudados para as diferentes espessuras de revestimento de epóxi para constante de atenuação reduzida de 25 % de seu valor original.	169
Tabela B.2 Comparação dos valores de atenuação dos modos estudados para as diferentes espessuras de revestimento de epóxi para constante de atenuação reduzida de 50 % de seu valor original.	171
Tabela B.3 Comparação dos valores de atenuação dos modos estudados para as diferentes espessuras de revestimento de epóxi para constante de atenuação reduzida de 75 % de seu valor original.	173
Tabela B.4 Comparação dos valores de atenuação dos modos estudados para as diferentes espessuras de revestimento de epóxi para constante de velocidade de fase reduzida de 25 % de seu valor original.	175
Tabela B.5 Comparação dos valores de atenuação dos modos estudados para as diferentes espessuras de revestimento de epóxi para constante de velocidade de fase reduzida de 50 % de seu valor original.	178

Tabela B.6 Comparação dos valores de atenuação dos modos estudados para as diferentes espessuras de revestimento de epóxi para constante de velocidade de fase reduzida de 75 % de seu valor original.

Lista de Abreviaturas

SH	Cisalhante Horizontal
CSH	Cisalhante Horizontal Circunferencial
SV	Cisalhante Vertical
SAFE	Semi-analítico de elementos finitos
NDT	Testes não-destrutivos
EMAT	Transdutores Acústico-Eletromagnéticos
PPM	Ímãs periódicos permanentes
TFM	Método de Focalização Total

1 Introdução

No meio industrial petroquímico, ensaios não-destrutivos, do inglês *non-destructive tests* ou, simplesmente, NDT, utilizando ondas ultrassônicas vem ganhando destaque [1–8]. Ao gerar e detectar ondas acústicas em um material sob teste, é possível analisar suas interações e verificar propriedades do mesmo como: impedância acústica, densidade, análise de defeitos em um espécime, entre outras [2–7,9]. Para realizar tais ensaios, são utilizados transdutores para gerar ondas de diversas polarizações, sendo o mais comum o transdutor piezoelétrico [10–14], o qual apresenta fácil geração de ondas acústicas e possui bom desempenho energético quando comparado ao transdutor acústico-eletromagnético, também chamado de EMAT, do inglês *Electromagnetic Acoustic Transducer* [8, 10, 13, 14]. Entretanto, transdutor piezoelétrico necessita de acoplamento fluido para geração de ondas [10, 15, 16]. Desse modo, torna-se inviável sua utilização em gasodutos, pois não há fluido acoplante [8, 10, 14]. Além disso, há necessidade de uma alta quantidade de transdutores para uma análise de defeitos em duto operante devido a sua operação transversal em pulso-eco captar apenas pequenas faixas do duto em análise [15–17]. Logo, EMATs tornam-se ideais para análises de defeitos, devido à, principalmente, não precisar estar em contato direto com o espécime [8], permitir diversos tipos de polarização, especialmente ondas cisalhantes horizontais [10, 18, 19].

Ondas cisalhantes horizontais, ou, do inglês, ondas SH (*Shear Horizontal*) são muito usadas em NDTs para detectar defeitos [3, 20, 21], como corrosão, por exemplo, em dutos por possuírem vantagens como simples relação de dispersão e não apresentarem perda de energia para fluidos não-viscosos em contato com o meio [2–4,6]. Uma das maneiras de utilizar esse tipo de onda é circunferencialmente, onde, com dois transdutores, é possível analisar todo o volume ao movê-los ao longo do duto [3, 22]. Uma das dificuldades de tal análise são as camadas de revestimento dos dutos pois, devida as suas propriedades viscoelásticas, tal material altera a propagação de ondas guiadas manifestada principalmente nas suas curvas de dispersão e por atenuação dependente de frequência [2, 3, 7, 23, 24]. Essas propriedades afetam diretamente a escolha de qual modo de onda utilizar em um espécime de duas ou mais camadas, especialmente comparado a um duto de uma única camada elástica. Além disso, tal atenuação implica em dificuldade de análise diretamente nas camadas viscoelásticas [25], onde, ao tentar gerar ondas em tais camadas, devido à alta atenuação, as mesmas se dissipam em pouca distância, inviabilizando uma análise precisa. Outrossim, em dutos submersos, não é possível excitar modos de ondas em camadas externas devido à não ser possível inserir transdutores em tal camada, sendo apenas possível realizar uma geração interna. Portanto, faz-se necessário estudar quais modos possuem baixa

atenuação em um duto revestido com materiais viscoelásticos com inspeção interna. Salienta-se que embora outros fatores determinantes, como dispersão e facilidade de excitação de determinados modos que também possuem relevância em NDTs, se um modo possui alta atenuação, não se consegue detectar um defeito, mostrando-se uma figura de mérito extremamente importante.

1.1

Revisão bibliográfica

Diversos estudos sobre ondas ultrassônicas guiadas foram desenvolvidos ao longo dos anos visando detecção de defeitos, a fim de preservar a integridade de estruturas, tais como dutos de petróleo e gás [3, 7, 10, 18, 23, 26–28]. A seguir é apresentado um levantamento bibliográfico de estudos de ondas ultrassônicas em guias cilíndricos, processamento de sinais para inspeção em placas e em dutos e mecanismos de transdução e propagação em meios de multicamadas, tais como dutos revestidos.

Clough et al. [3], mostraram o uso de ondas ultrassônicas guiadas circunferenciais em dutos, onde dois EMATs na configuração pitch-catch foram fixados na parte exterior do duto. A configuração impõe um caminho curto e um caminho longo para a propagação das ondas. Foi analisado o comportamento dos modos das ondas ultrassônicas em um duto sem revestimento, utilizando métodos de elementos finitos para analisar defeitos com o objetivo de verificar as alterações nos sinais causadas pela presença dos mesmos. O estudo foi realizado com o modo fundamental de ondas cisalhantes horizontais, a saber, SH0 e o primeiro modo antissimétrico SH1. Três diferentes defeitos foram criados a fim de observar o comportamento desses modos gerados ao passar pelos mesmos. Os resultados numéricos obtidos foram comparados com medições experimentais num duto, mostrando a semelhança entre os sinais obtidos nas simulações e nos resultados experimentais. Conclui-se que a modelagem numérica apresenta boa aproximação ao resultado experimental. Entretanto, foi analisado apenas o duto nu, a seguir foi apresentado um resumo de um estudo sobre as características dos efeitos viscoelásticos.

Barshinger et al. [23], propuseram um modelo teórico para analisar o comportamento de ondas ultrassônicas guiadas em alta frequência propagando-se em dutos com revestimento viscoelástico. Primeiro foi proposto uma análise em materiais elásticos, i.e., onde as constantes elásticas são reais. Foi proposto também um método de matriz global para entender as condições de contorno de um sistema de multicamadas e um modelo teórico para materiais viscoelásticos, no qual as constantes de Lamé são complexas. Com esse estudo foi possível calcular as curvas de dispersão de velocidade de grupo e de atenuação do sistema. Nesse estudo, foram analisados diferentes modos de ondas guiadas radiais se propagando num duto de aço de 4" de espessura com revestimento viscoelástico de 0.02" de Epóxi. Foram comparadas as curvas de dispersão em velocidade de grupo e as curvas de atenuação teóricas obtidas por métodos numéricos com resultados experimentais obtidos no duto descrito acima, onde os valores medidos de velocidade de grupo e de atenuação são próximos dos

valores esperados pelo modelo numérico. A seguir, foi denotado um estudo onde foi analisado os efeitos descritos em um modelo analítico diferente com o objetivo de estudar com maior profundidade os efeitos viscoelásticos.

Van Velsor [7] estudou os efeitos de revestimentos para modos de ondas guiadas circunferenciais em dutos com medidas diferentes. Foi feito primeiramente um estudo sobre as ondas ultrassônicas guiadas em dutos com diferentes espessuras, raios interno e externo com o objetivo de verificar como os diferentes formatos do guia de onda impactam nas ondas propagando nele. Em seguida, foi feito um modelo analítico para calcular os efeitos das multicamadas na propagação de ondas guiadas circunferenciais. O objetivo desse modelo é analisar como um sistema de multicamadas de meios elásticos e viscoelásticos interferem nas curvas de dispersão de velocidade de grupo e de atenuação. Por fim, foi feito um modelo de elementos finitos para confirmar o estudo desses modelos analíticos citados, assim como resultados experimentais, onde foram utilizados EMATs para gerar e receber ondas CSH. Foram analisados modos de baixa frequência como o modo fundamental, além do modo SH1, para efeitos de comparação de propagação, atenuação entre ondas ultrassônicas geradas em dutos sem revestimento e com revestimento. A seguir, foi mostrado um estudo de inspeção em dutos revestidos por meio de transdutores phased arrays.

Jia Hua [29] estudo, em sua dissertação, a propagação de ondas ultrassônicas geradas por transdutores phased arrays utilizando a técnica de focalização total em duto com revestimento viscoelástico. Para melhor compreensão das ondas geradas, foram feitos um modelo analítico por meio do método semi-analítico de elementos finitos, e um modelo numérico de método de elementos finitos, e mostrou-se que ambos os modelos convergem. Após, foram feitas medições experimentais para confirmar os resultados dos modelos e analisar as ondas detectadas em dutos de diferentes revestimentos viscoelástico, onde os resultados experimentais possuíram boa convergência em relação aos resultados simulados. A seguir, foi mostrado um trabalho sobre geração de ondas ultrassônicas por EMATs em difíceis condições.

Choi et. al. [30] denotaram um trabalho de geração de ondas ultrassônicas por meio de EMATs em ambientes de alta temperatura e alta radiação gama. Componentes dos transdutores foram testados até temperatura de 177°C e radiação até 5920 krad. Foi confirmado que os efeitos de radiação gama pouco interferem, porém o desempenho do EMAT foi afetado para temperaturas acima de 121°C , sendo necessário diferentes ímãs para operar à 177°C . A seguir, foi mostrado um estudo com maior profundidade a geração de ondas SH por meio de diferentes configurações de EMATs.

EMATs necessitam de uma alta corrente para gerar ondas ultrassônicas guiadas. Para avaliar o aumento da razão sinal-ruído do sistema. Nascimento et al. [8] compararam três configurações de EMAT, a saber, arranjo de ímãs permanentes periódicos, do inglês *Periodic Permanent Array* e abreviado de PPM, com dois ímãs por meio período, PPM com um ímã por meio período e a configuração Halbach [31]. O último é composto por ímãs posicionados na vertical e na horizontal aumentando o campo magnético em uma de suas faces enquanto diminui na outra. Portanto a onda ultrassônica gerada por essa configuração, através do princípio de Lorentz [18]

deve possuir maior amplitude. Foram realizados três procedimentos experimentais, onde primeiramente cada configuração foi colocada como transmissor. Depois cada configuração foi colocada como receptor. E por fim cada configuração foi colocada com seu par respectivo. Foi concluído que a configuração Halbach é mais efetiva que ambas as configurações em aproximadamente 40%. A seguir, foi mostrado um trabalho sobre modelagem numérica de configurações de EMAT.

Shankar et. al. [32] apresentaram uma comparação de EMATs Halbach de fileira dupla com PPM EMATs de fileira dupla usando modelos de simulação baseados em elementos finitos para geração do modo SH₀. Em seguida, o estudo analisa os efeitos de interferência de onda criados pelas configurações escalonadas de Halbach EMAT de fileira dupla, e também foi utilizado modelos numéricos de elementos finitos, e, por fim, validados experimentalmente em uma placa de alumínio. Observa-se que a direção das ondas guiadas pode ser associada e prevista para diferentes configurações PPM EMATs escalonadas de fileira dupla. A seguir, foi mostrado um trabalho onde foi utilizado EMATs para inspeção em gasodutos.

Ren et. al. [33] estudaram uma forma de analisar defeitos em gasodutos por meio de ondas SH circunferenciais. Foi discutida a seleção de modos em termos de sensibilidade a diferentes defeitos e capacidade de caracterização dos mesmos. Para auxiliar na seleção de modos, foi feita uma análise por meio de elementos finitos para avaliar a interação entre a onda e o defeito com o objetivo de identificar possíveis características do defeito. Também foram realizados experimentos para verificar a seleção do modo e analisar defeitos artificiais introduzidos em amostras de tubos. A seguir, foi mostrado um trabalho de detecção de corrosão por meio de ondas SH circunferenciais e longitudinais.

Lindsay et. al. [34] desenvolveram uma forma de analisar corrosões em gasodutos de aço por meio de ondas SH longitudinais e circunferenciais geradas por EMATs. Foi visto que a interação da onda com a corrosão cria uma reflexão e reduz o sinal transmitido com dependência da espessura da corrosão, onde quanto maior a profundidade da corrosão, menor amplitude do sinal recebido. A seguir, foi mostrado um trabalho de análise de defeitos por meio de ondas SH circunferenciais com baixa frequência de operação.

Luo et. al. [35] mostraram uma forma de analisar defeitos por meio de ondas ultrassônicas. Foi feita uma revisão teórica onde se mostrou o desenvolvimento de curvas de dispersão para ondas SH guiadas circunferenciais ondas em um duto revestido com um material viscoelástico. Os parâmetros de atenuação das ondas foram investigados. Conclui-se que operar em baixa frequência é recomendado do ponto de vista de atenuação. Foram realizados experimentos em baixa frequência para detecção de defeitos em dutos revestidos com alcatrão, onde foi possível realizar uma análise e detectar os defeitos inseridos no espécime. A seguir, foi mostrado um trabalho onde apresentou uma forma de analisar defeitos por meio de ondas SH guiadas de alta frequência em duto de camada única.

Belanger et at. [28], propuseram uma forma de analisar defeitos em placas utilizando modos de ordem superior, ou seja, inspeção utilizando altas frequências. A

dificuldade deve-se ao fato, que ao excitar o transdutor em alta frequência, muitos modos são gerados, dificultando o processamento de sinais para análise de defeitos. Esse estudo propõe estimar a menor espessura remanescente analisando a quantidade de modos que propagam através do defeito. Tal análise é feita através de análise em frequência com base a existência da frequência-espessura de corte de cada modo de ordem superior. Um modelo de elementos finitos foi utilizado para analisar e confirmar o proposto. Foram testadas a diretividade do transdutor, bem como a velocidade de grupo e a amplitude das ondas ultrassônicas geradas. Concluiu-se que é possível estimar o menor defeito possível com cerca de 20% e também filtrar uma quantidade maior de modos existentes, entretanto não foi feita menção a conversão de modo, o que pode complicar a análise proposta. A seguir, foi denotada inspeção por meio de ondas SH circunferenciais em dutos revestidos com cimento.

Patterson et. al. [36] analisaram a propagação de ondas SH circunferenciais em dutos revestidos de cimento. Foi feita uma modelagem analítica e uma numérica para mostrar a atenuação variável das propriedades variáveis do cimento. Os resultados demonstram que a faixa dinâmica aprimorada dos modos SH frequentemente fornecem 300% ou mais da resposta de atenuação do cimento em relação aos métodos de compressão padrão. A faixa aprimorada de modo SH mostrou a capacidade para determinar o módulo de cisalhamento do material acoplado ao revestimento, e permitindo um método simples para determinar a presença de cimento e suas propriedades. A seguir, foi mostrada uma técnica de seleção de modos para melhor compreensão da propagação de ondas SH guiadas.

Kubrusly et al. [21], propuseram uma técnica de seleção de modos para ajudar a entender a interação de ondas SH guiadas para diferentes espessuras. Por meio das características de propagação, ondas guiadas por SH são geradas sequencialmente detectadas em ambas as superfícies de uma placa, sendo possível detectar quatro formas de onda distintas. Por causa da superposição dos sinais detectados, modos simétricos podem ser claramente separados de modos antissimétricos nos sinais recebidos processados. Para isso, os transdutores utilizados precisam ter respostas muito semelhantes e possuir posição precisamente no exato oposto de cada lado da placa. As simulações de elementos finitos foram também realizadas, e, ao comparar com as medidas experimentais, os resultados se correlacionam bem. Para as medições experimentais foi confeccionado uma chapa de 8 mm de espessura com um defeito simulado. A seguir, foi abordado, em um outro estudo, as interações das ondas SH na presença de um defeito.

Kubrusly et. al. [37] investigaram, por meio de experimentos e modelagem numérica de elementos finitos, o fenômeno de interação e conversão de modos de onda guiada SH0 e SH1 em uma placa metálica com desbaste. A análise quantitativa foi realizada por meio do cálculo dos coeficientes de reflexão e transmissão para os modos SH0 e SH1 incidentes. Foram avaliadas várias geometrias foram avaliadas variando suas dimensões. Foram realizados experimentos com PPM EMATs como transmissores e receptores, gerando um único modo SH, enquanto SH0 e SH1 são recebidos. Dados experimentais e numéricos mostraram boa concordância, revelando

que a interação das ondas SH com tais defeitos é complexa quando surge a conversão de modos. A seguir, foi mostrado um trabalho comparativo entre EMATs e transdutores piezoelétrico para detecção de defeitos.

Petcher et. al. [38], propuseram inspecionar soldas por meio de ondas SH, gerados por PPM EMATs, e compararam a inspeção com uma feita utilizando um transdutor unidimensional piezoelétrico usando o método de focalização total. Foi demonstrado que as ondas SH possuíram maior sensibilidade de detecção em relação às ondas geradas com o transdutor piezoelétrico. As ondas SH sofreram menos mudanças de direção em uma solda do que ondas de compressão ou SV, que podem não detectar defeitos devido à anisotropia da microestrutura da solda e a atenuação do meio. Todos os defeitos foram identificados de todos os lados da solda/placa usando as ondas SH, mas isso não foi possível com o uso do transdutor piezoelétrico. A seguir, foi mostrado um trabalho de modelagem numérica de elementos finitos para geração de ondas CSH.

Martinho et. al. [39], mostraram, por meio de simulações de elementos finitos, como a geração de ondas CSH unidirecionais pode facilitar a tarefa de interpretação de sinal para o modo de onda CSH1 de ordem superior. Resultados mostram que, devido à conversão e dispersão do modo, várias frentes de onda podem ser detectadas, sob geração bidirecional convencional, tornando complicada a interpretação do sinal e a identificação do eco do defeito, para uma variedade de posições de defeito. A geração unidirecional de ondas CSH mostra-se uma característica importante na inspeção de dutos, proporcionando uma interpretação mais confiável do sinal. A seguir, foi mostrada uma investigação numérica de ondas CSH unidirecionais para detecção de defeitos.

Kubrusly et. al. [40] abordaram que a geração unidirecional pode facilitar a interpretação de sinal para testes de ondas guiadas circunferenciais por meio simulações de elementos finitos. A geração unidirecional é baseada em PPM EMATs duplos acionado por pulsos com diferença de fase. A geração e a recepção foram realizadas com transdutores separados na superfície externa de um duto de aço de 324 mm de diâmetro externo e espessura de 6.25 mm. Defeitos, simulando corrosão, foram modelados na superfície interna. Foi mostrado que, quando a posição angular do defeito se aproxima de π rad do transmissor, o eco do defeito pode ser quase completamente mascarado pela onda gerada na direção oposta, mostrando que a geração unidirecional proporciona uma melhor interpretação do sinal. A seguir, foi mostrada uma análise de modelo analítico e modelo numérico da propagação de ondas CSH em dutos com revestimentos.

Nascimento et. al. [2] analisam quais modos são mais adequados para um duto de interesse. Nesse trabalho foi estudado um duto de diâmetro externo de 323 mm com espessura de camada metálica, onde a espessura da camada de aço era de 6.35 mm e revestimento de polietileno de 1.5 mm. Um modelo semi-analítico foi utilizado para calcular as curvas de dispersão e atenuação e um modelo de elementos finitos numérico para investigar a propagação desses modos. Resultados mostraram que, para o modelo analítico, em um regime de alta frequência, o modo quasi-SH0 com

10 mm de comprimento de onda e o modo quasi-SH1 com 20 mm de comprimento de onda apresentaram baixa atenuação de 4 dB/m e 14 dB/m, respectivamente. Entretanto, em baixa frequência, o modo quasi-SH0 com 20 mm de comprimento de onda apresentou alta atenuação, o que impossibilitou a detecção do eco de retorno de um defeito, pois tal modo se encontra em um ponto de encontro entre o modo pertencente à camada de aço e o primeiro modo do revestimento. Então, uma seleção cuidadosa do modo de operação mais adequado é fundamental para inspecionar um defeito com ondas guiadas ultrassônicas em tubos com revestimento.

Os trabalhos citados possuem grande repercussão no meio acadêmico, onde foram elaborados estudos de inspeção de dutos por meio de ondas CSH [2, 3, 21], estudo da geração de ondas por meio de PPM EMATs [8, 32, 38, 39], análise de defeitos [2, 21, 37, 38, 40], e características de materiais viscoelásticos e as consequências das suas propriedades para a propagação de ondas ultrassônicas [7, 23]. Entretanto, vê-se uma necessidade de abordar todos esses assuntos de forma conjunta. A partir destes trabalhos foi determinado analisar com maior profundidade como as propriedades viscoelásticas influenciam em uma análise de defeitos para um duto revestido.

1.2

Objetivo

Nesta dissertação, foi estendido o estudo feito em [2], onde investigou-se, por meio de um modelo analítico e de um modelo numérico, quais ondas guiadas SH são mais adequadas para uma inspeção de defeitos e quais, devido aos efeitos viscoelásticos de diferentes revestimentos, não são efetivos para uma avaliação de defeitos para diferentes modos de onda de diferentes comprimentos de onda e em diferentes espessuras de revestimento, com o objetivo de concluir as condições mais confiáveis nos casos em que se for realizar um NDT com desconhecimento do duto a ser analisado.

1.3

Contribuições

As principais contribuições dessa dissertação são:

- (i) determinar quais modos SH possuem melhor desempenho para análise de defeitos em um duto revestido de uma camada viscoelástica;
- (ii) analisar o comportamento dos denominados modos do revestimento e sua contribuição para aumento de atenuação;
- (iii) determinar qual modo possui menor atenuação para diferentes espessuras e tipos de revestimento com objetivo de determinar qual melhor modo a ser utilizado em caso de desconhecimento de espécime a ser analisado;
- (iv) elaboração de arcabouço para simulação numérica com atenuação viscoelástica e sua confirmação por método semi analítico;
- (v) um artigo acadêmico foi escrito com base nessa pesquisa.

1.4

Publicações

Durante o desenvolvimento desta dissertação, um artigo foi publicado. O primeiro no congresso internacional *2021 IEEE UFFC Latin America Ultrasonics Symposium (LAUS)*:

- **C. M. Nascimento**, L. M. Martinho and A. C. Kubrusly, "Numerical investigation of the propagation characteristics of shear horizontal guided wave modes in coated pipes," *2021 IEEE UFFC Latin America Ultrasonics Symposium (LAUS)*, 2021, pp. 1-4, doi: 10.1109/LAUS53676.2021.9639157.

1.5

Estrutura da dissertação

O restante do trabalho contém, no Cap. 2, uma revisão teórica de EMATs, onde foi abordada a sua transdução por força de Lorentz, de ondas SH em placas e suas características como velocidade de fase e velocidade de grupo. Posteriormente, faz-se uma revisão de geração de ondas SH por meio de PPM EMATs e de ondas SH circunferenciais. Por fim, vê-se o comportamento de ondas guiadas em meios viscoelásticos.

O Cap. 3 denota o modelo analítico que utiliza o método SAFE, onde foi feito, primeiramente, um teste de convergência para determinar a forma mais eficiente de utilizar tal método. Após, foi analisado o efeito da espessura do revestimento, onde foram analisados os chamados modos do revestimento e as suas consequências. E, por fim, uma mudança de material viscoelástico para analisar se tal mudança varia no comportamento geral de propagação de ondas CSH.

O Cap. 4, por sua vez, denota o modelo numérico por meio do método de elementos finitos, onde foi feito, primeiramente, um novo teste de convergência para determinar a maneira mais eficiente de utilizar o método de elementos finitos. Após, foi feita uma comparação entre os resultados do modelo analítico e do modelo numérico para mostrar que ambos convergem para o mesmo resultado. Por fim, foi feita uma análise de defeitos.

O Cap. 5 inicia com as considerações finais e conclusões da dissertação. Seguido de possíveis temas futuros que podem aprimorar a pesquisa realizada nesta dissertação.

2

Revisão teórica

2.1

Transdutores acústicos eletromagnéticos

Transdutores acústicos eletromagnéticos, também chamados de EMATs, consistem, basicamente, num conjunto de ímãs para produzir um campo magnético estático e uma bobina para induzir um campo magnético dinâmico sobre o espécimen em análise [8, 10, 18].

Existem dois principais mecanismos de transdução por meio de interação com campo magnético, a saber, força de Lorentz e magnetostricção [10, 18]. A força de Lorentz é proveniente da interação entre as correntes de Foucault, geradas pela bobina, e os campos magnéticos. Já a magnetostricção é o resultado da deformação da magnetização presente na maioria dos materiais ferromagnéticos [41].

2.1.1

Transdução por força de Lorentz

Conforme a análise vista em [10, 19], ao introduzir uma carga elétrica, aproximadamente pontual, com carga q numa região do espaço que contenha um campo elétrico \mathbf{E} , uma força eletrostática \mathbf{F}_{el} será gerada pela partícula, governada pela Eq. (2-1) [42]:

$$\mathbf{F}_{el} = q\mathbf{E}. \quad (2-1)$$

Se esta mesma carga estiver em movimento uniforme e com velocidade constante, \mathbf{v} , numa região que contenha apenas uma densidade de fluxo magnético \mathbf{B} , a partícula estará sob efeito de uma força magnetostática \mathbf{F}_{mag} dada pela Eq. 2-2 [42]:

$$\mathbf{F}_{mag} = q(\mathbf{v} \times \mathbf{B}). \quad (2-2)$$

A resultante dessas duas forças previamente citadas é chamada de força de Lorentz e descrita pela Eq. 2-3 [26]:

$$\mathbf{F}_L = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}). \quad (2-3)$$

Para explicar o fenômeno de transdução através de força de Lorentz utilizaremos o momento linear para um elétron descrito pela Eq. 2-4 [26]:

$$m\dot{\mathbf{v}}_e = -e(\mathbf{E} + \mathbf{v}_e \times \mathbf{B}) - \frac{m\mathbf{v}_e}{\tau}, \quad (2-4)$$

onde m é a massa do elétron, v_e a velocidade média do elétron e τ é o tempo médio de colisões sucessivas entre elétrons e íons. Podemos reescrever a Eq. 2-4 levando em conta a densidade de elétrons n_e conforme a Eq. 2-5:

$$n_e m \dot{\mathbf{v}}_e = -n_e e (\mathbf{E} + \mathbf{v}_e \times \mathbf{B}) - n_e \frac{m \mathbf{v}_e}{\tau}. \quad (2-5)$$

Pode-se reescrever a Eq. 2-5 considerando que o período das oscilações do campo elétrico é muito maior que o tempo médio de colisão [10,18].

$$n_e \frac{m \mathbf{v}_e}{\tau} = -n_e e (\mathbf{E} + \mathbf{v}_e \times \mathbf{B}). \quad (2-6)$$

A partir da colisão de elétrons e íons existirá uma troca de momento entre eles resultando numa força de corpo \mathbf{F} , descrita pela Eq. 2-7 [10]:

$$\mathbf{F} = N Z_i (\mathbf{E} + \mathbf{v}_i \times \mathbf{B}) + n_e \frac{m \mathbf{v}_e}{\tau}, \quad (2-7)$$

onde N , Z_i e v_i são respectivamente a densidade, a carga e a velocidade dos íons. Utilizando a Eq. 2-6, podemos reescrever (2-7) da seguinte forma:

$$\mathbf{F} = N Z_i (\mathbf{E} + \mathbf{v}_i \times \mathbf{B}) - n_e e (\mathbf{E} + \mathbf{v}_e \times \mathbf{B}). \quad (2-8)$$

Sabe-se que $N Z_i$ e $n_e e$ são aproximadamente iguais e que a velocidade dos elétrons é significativamente maior que a velocidade dos íons, podemos obter a seguinte solução:

$$\mathbf{F} = \mathbf{J}_e \times \mathbf{B} \equiv \mathbf{F}_L, \quad (2-9)$$

onde $n_e e \mathbf{v}_e = \mathbf{J}_e$ é a densidade de corrente de Foucault no metal e \mathbf{F}_L é a força de Lorentz aplicada sobre o metal, gerando ondas ultrassônicas [10]. Para calcular a força gerada em cada direção, faz-se necessário observar os campos magnéticos estáticos e dinâmicos. Pela lei de Ampère abaixo se tem [42]:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}, \quad (2-10)$$

onde \mathbf{H} e \mathbf{D} são respectivamente o campo magnético e a densidade de fluxo elétrico. Considerando que a variação temporal da densidade de fluxo elétrico seja desprezível, podemos reescrever a equação acima separando a densidade de corrente no plano xy .

$$J_x = \frac{\partial H_z^D}{\partial y} - \frac{\partial H_y^D}{\partial z} \quad (2-11)$$

$$J_y = \frac{\partial H_x^D}{\partial z} - \frac{\partial H_z^D}{\partial x} \quad (2-12)$$

2.2

Ondas cisalhantes horizontais em placas

Existem diversos tipos de ondas ultrassônicas que se propagam em sólidos [1]. Uma forma de determinar qual o tipo de onda, dá-se por meio da polarização da mesma que pode ser definido pela direção do vetor de deslocamento em relação a direção de propagação. Se estão na mesma direção, tal onda é dita de longitudinal, e, se estão perpendiculares, tal onda é dita de transversal [43]. Outra característica

importante para a propagação de ondas é a impedância acústica do meio (Z), que determina a resistência que o material opõe à propagação do som [43], podendo ser definida pelo produto entre a densidade do material (ρ) e a velocidade da onda de corpo(c):

$$Z = \rho c \quad \left[\text{Rayl} = \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \text{s}} \right]. \quad (2-13)$$

Nesta dissertação, foi estudado um conjunto de ondas guiadas transversais chamadas de *Shear Horizontal modes* (SH), traduzido para modos cisalhantes horizontais. Tal nome foi dado porque o deslocamento de partícula ondas SH está num plano paralelo à superfície da estrutura em análise e sua polarização é ortogonal a direção de propagação, como podemos ver na Fig. 2.1.

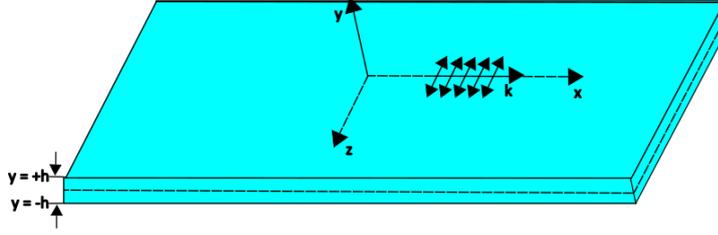


Figura 2.1: Ondas SH numa placa, onde a direção de propagação está em x e os deslocamentos das partículas em y , baseado em [1].

Fisicamente, um modo da onda SH pode ser considerada como a superposição de ondas de corpo polarizadas em z com seus vetores de onda localizados no plano xy e inclinado a um certo ângulo que o sistema satisfaça as condições de contorno livres de tração na superfície do material.

2.2.1

Equação de dispersão

Para um meio isotrópico, o campo de deslocamento das partículas $\mathbf{u}(x, t)$ satisfaz as Eqs. de Navier:

$$\mu \nabla^2 \mathbf{u}(x, t) + (\Lambda + \mu) \nabla \nabla \cdot \mathbf{u}(x, t) = \rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}(x, t)}{\partial t^2}, \quad (2-14)$$

onde Λ é a primeira constante de Lamé, μ o módulo de cisalhamento, ou segunda constante de Lamé, e ρ a densidade do material. Pode-se então considerar que os vetores de deslocamento têm somente componente em z , ditos $u_x(x, t)$ e $u_y(x, t)$, valem zero [1, 43]. Para a componente de z , podemos especificar da seguinte maneira:

$$u_z(x, y, t) = f(y) e^{j(kx - \omega t)}, \quad (2-15)$$

onde k é o número de onda do modo, ω a frequência angular, e j é a unidade imaginária. Pela Eq. 2-15 é possível notar que u_z independe de z e as frentes de onda são extendidas infinitamente na direção de z .

Essa solução é escolhida porque representa um movimento ondulatório propagando ao longo da direção de x , dado pela exponencial, e uma distribuição na direção de y dado por $f(y)$. Como u_z é independente de z e seu campo de deslocamento das partículas é diferente de zero, a Eq. 2-14 pode ser reduzida para:

$$\frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial y^2} = \frac{1}{c_T^2} \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2}, \quad (2-16)$$

onde c_T é a velocidade longitudinal da onda de corpo, calculado por $c_T = \sqrt{\mu/\rho}$. Substituindo a solução descrita na Eq. 2-15), na Eq. 2-16 resulta em:

$$\frac{\partial^2 f(y)}{\partial y^2} + \left(\frac{\omega^2}{c_T^2} - k^2 \right) = 0. \quad (2-17)$$

Tal equação possui a seguinte solução:

$$f(y) = A \sin(qy) + B \cos(qy), \quad (2-18)$$

onde A e B são constantes arbitrárias e q é definido da seguinte maneira:

$$q = \sqrt{\frac{\omega^2}{c_T^2} - k^2}. \quad (2-19)$$

Portanto, o campo de deslocamento pode ser descrito por:

$$u_z(x, y, t) = (A \sin(qy) + B \cos(qy))e^{j(kx - \omega t)} \quad (2-20)$$

A partir da equação acima, torna-se vantajoso separar o campo de deslocamento em componentes simétricas e antissimétricas em relação a y , sendo a parte simétrica dada por $\cos(qy)$ e a antissimétrica por $\sin(qy)$, logo podemos reescrever o campo em duas componentes da seguinte forma:

$$u_z^s(x, y, t) = B \cos(qy)e^{j(kx - \omega t)}, \quad (2-21)$$

$$u_z^a(x, y, t) = A \sin(qy)e^{j(kx - \omega t)}, \quad (2-22)$$

onde os índices superescritos s e a são, respectivamente, dos modos simétricos e dos modos antissimétricos. As condições de contorno impostas a todos os tipos de modos são, na superfície do material ($y = \pm h$), são livres de tensão (σ). Ou seja,

$$\sigma_{yy}(x, y, t)|_{y=\pm h} = \tau_{xy}(x, y, t)|_{y=\pm h} = \tau_{yz}(x, y, t)|_{y=\pm h} = 0. \quad (2-23)$$

Entretanto, para o campo de deslocamento de ambas as formas vistas nas Eq. 2-21 e Eq. 2-22, as tensões σ_{yy} e σ_{xy} são igualmente nulas. A única condição de contorno, portanto, remanescente é:

$$\tau_{yz}(x, y, t)|_{y=\pm h} = 0. \quad (2-24)$$

O campo de deformação associado com ambos os campos de deslocamento possuem duas componentes diferentes de zero, ditas $\epsilon_{xz} = 1/2 \partial u_z / \partial x$ e $\epsilon_{yz} = 1/2 \partial u_z / \partial y$. A componente de tração τ_{yz} , então, é dada por:

$$\tau_{yz} = 2\mu\epsilon_{yz} = \mu \frac{\partial u_z}{\partial y}. \quad (2-25)$$

Substituindo u_z pelas suas subpartes Eq. 2-21 e Eq. 2-22 na equação acima, obtemos os seguintes resultados:

$$\tau_{yz}^s(x, y, t) = -\mu Bq \sin(qy) e^{j(kx - \omega t)}, \quad (2-26)$$

$$\tau_{yz}^a(x, y, t) = \mu Aq \cos(qy) e^{j(kx - \omega t)}. \quad (2-27)$$

Também se pode definir o vetor de Poynting a partir de u_z e do conjugado da tensão no plano yz σ'_{yz} , que denota a energia do modo gerado, da onda SH guiada por:

$$S_y = \frac{-1}{2} u_z \sigma'_{yz}. \quad (2-28)$$

Ao impor as condições de contorno, em $y = \pm h$, Eq. 2-24, sabe-se que $u_z = 0$, portanto pode-se escrever as equações abaixo:

$$\text{Modos Simétricos} \longrightarrow \sin(qh) = 0 \quad (2-29)$$

$$\text{, Modos Antissimétricos} \longrightarrow \cos(qh) = 0. \quad (2-30)$$

Dessa forma, podemos escrever as soluções das Eqs. acima como:

$$qh = \frac{n\pi}{2}, \quad (2-31)$$

onde para os modos simétricos $n \in [0, 2, 4, \dots]$ e os antissimétricos $n \in [1, 3, 5, \dots]$. As equações de dispersão, portanto, possui um número infinito de soluções para quaisquer modos SH. Os modos são chamados pelo valor do inteiro n , donde para n par, o modo da onda é simétrico e para n ímpar, antissimétrico.

2.2.2

Velocidade de fase

A partir das equações de dispersão calculadas, pode-se obter as velocidades de fase c_p de cada modo em função da frequência e da espessura do material. Dessa forma, a partir do valor de q visto na Eq. 2-19, pela definição do número de onda $k = \omega/c_p$ e os substituindo na Eq. 2-31, pode-se escrever a Eq. de dispersão da seguinte forma:

$$\frac{\omega^2}{c_T^2} - \frac{\omega^2}{c_p^2} = \left(\frac{n\pi}{2h}\right)^2. \quad (2-32)$$

A Eq. 2-32 pode ser resolvida de forma simples calculando a velocidade de fase em função da frequência f ($\omega = 2\pi f$), da espessura $d = 2h$ e do número do modo n .

$$c_p(fd) = \pm 2c_T \left(\frac{fd}{\sqrt{4(fd)^2 - n^2 c_T^2}} \right). \quad (2-33)$$

É possível notar que para $n = 0$, ou seja, o modo SH0 (também chamado de modo fundamental), a velocidade de fase é constante e igual a velocidade transversal

da onda de corpo do material, logo este modo é não-dispersivo. Entretanto, a velocidade de fase dos demais modos varia com a frequência, fazendo-os dispersivo.

Podemos encontrar as frequências de corte dos modos igualando o denominador da Eq. 2-33 a zero, o que corresponde a velocidade de fase infinita e velocidade de grupo, que será visto depois, nula. A n -ésima frequência de corte $f_{cutoff|n}$ é dada, então, por:

$$f_{cutoff|n} = \frac{nc_T}{2d}. \quad (2-34)$$

A Fig. 2.2 mostra a velocidade de fase em função da frequência para uma placa de alumínio de 5mm, onde os modos simétricos estão ilustrados em linhas contínuas, enquanto os antissimétricos por linhas pontilhadas, confirmando que o modo fundamental é não dispersivo e sua velocidade é igual a velocidade da onda de corpo. No caso do alumínio, $c_T = 3163m/s$. A figura mostra até o modo SH7.

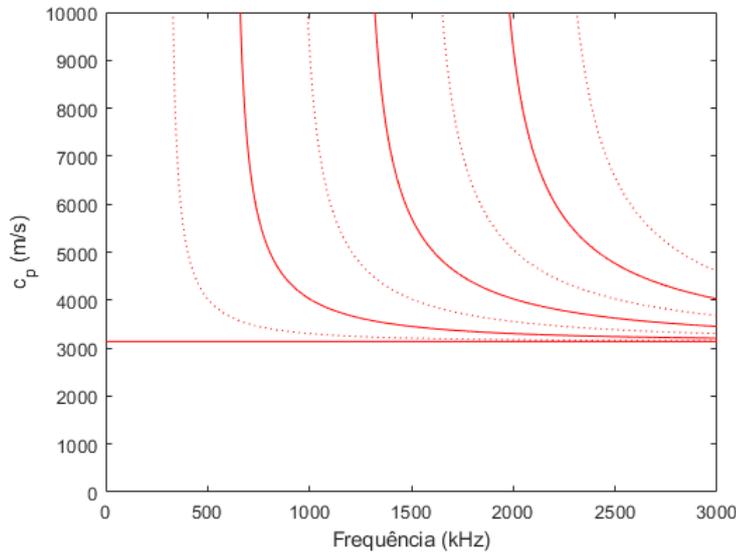


Figura 2.2: Curvas de velocidade de fase dos modos SH para uma placa de alumínio ($c_T = 3163m/s$) de 5mm. Os modos simétricos estão ilustrados em linhas contínuas, enquanto os antissimétricos por linhas pontilhadas.

2.2.3

Velocidade de grupo

As equações de dispersão também permitem determinar expressões para a velocidade de grupo para qualquer modo SH. Ao derivar a Eq. 2-32, e sabendo que $k = \omega/c_p^2$, obtém-se:

$$\frac{2\omega d\omega}{c_T^2} - 2kdk = 0. \quad (2-35)$$

Solucionando a Eq. 2-35 para $d\omega/dk$, que, é por definição, a velocidade de grupo c_g , temos [1]:

$$c_g(fd) = \frac{d\omega}{dk} = \frac{kc_T^2}{\omega} = \frac{c_T^2}{c_p}. \quad (2-36)$$

Solucionando (2-32) para k , e substituindo os resultados na equação acima e os simplificando, escreve-se a equação para a velocidade de grupo da seguinte forma:

$$c_g(fd) = c_T \sqrt{1 - \frac{(n/2)^2}{(fd/c_T)^2}}. \quad (2-37)$$

A partir da Eq. 2-37 se pode criar o gráfico da velocidade de grupo em relação a frequência. Como é visto na Fig. 2.3, nas frequências de corte de seus respectivos modos, temos que a velocidade de grupo é nula. Conforme a frequência aumenta, a velocidade de grupo de qualquer modo SH se aproxima da velocidade da onda de corpo, c_T .

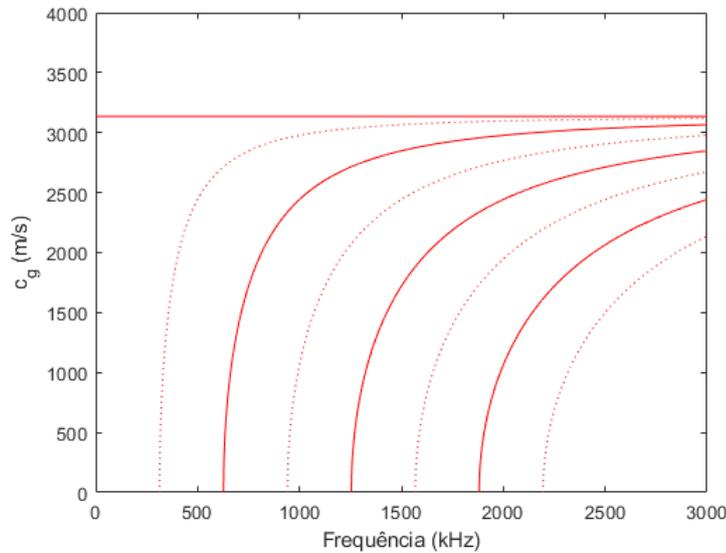


Figura 2.3: Curvas de velocidade de grupo dos modos SH para uma placa de alumínio ($c_T = 3163\text{m/s}$) de 5mm. Os modos simétricos estão ilustrados em linhas contínuas, enquanto os antissimétricos por linhas pontilhadas.

2.2.4

Geração de ondas SH por EMAT

Devido à disposição do campo magnético e a densidade de corrente induzida, a polarização de ondas ultrassônicas pode ser controlada e um transdutor acústico eletromagnético de ímã permanente periódico, também chamados de PPM EMATs, podem gerar ondas SH ultrassônicas [10, 18]. A estrutura de um PPM EMAT e orientação do campo magnético, da densidade de corrente induzida e da Força de Lorentz podem ser vistas na Fig. 2.4.

Como visto na Eq. 2-9, tem-se que a direção da força de Lorentz é perpendicular tanto ao campo quanto à densidade de corrente, e pela configuração do PPM EMAT é possível gerar ondas SH devido a tal força estar perpendicular a direção de propagação. O comprimento de onda é igual à distância periódica dos ímãs, dado que a cada meio período teríamos, em módulo, o máximo da força de Lorentz, o que força as ondas geradas a ter seu comprimento de onda igual a distância periódica dos ímãs [10].

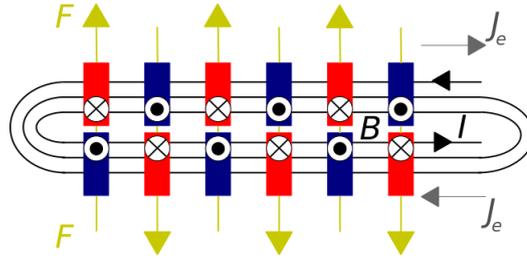


Figura 2.4: Esquemático de um EMAT de ímãs periódicos para geração de ondas ultrassônicas. Os blocos vermelhos são ímãs com o polo norte no lado inferior, e os blocos azuis são ímãs com o polo sul no lado inferior. As setas cinzas representam a densidade de corrente induzida e as setas amarelas representam as forças de Lorentz geradas pela interação da corrente induzida e do campo magnético dos ímãs.

Além disso, Eq. 2-38 mostra a relação entre a velocidade de fase c_p e o comprimento de onda λ [1].

$$c_p = \lambda f, \tag{2-38}$$

onde f é a frequência de excitação. A partir disso, pode-se criar uma relação de geração entre os comprimentos de onda e a frequência de excitação de cada modo, como se pode ver na Fig. 2.5:

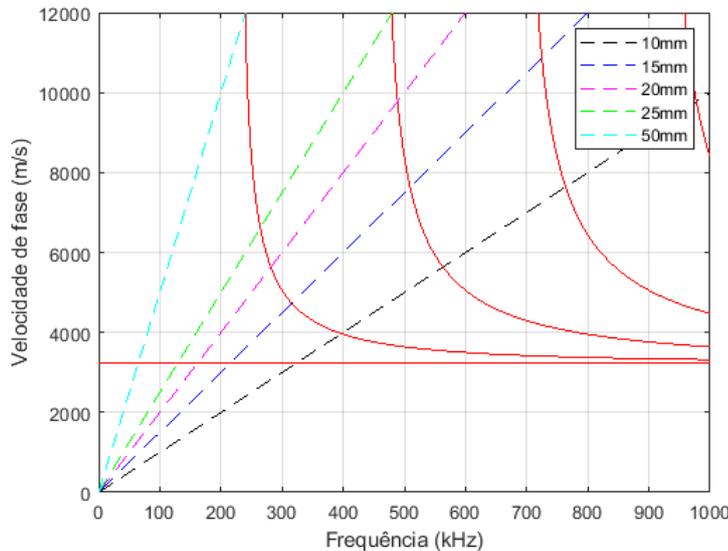


Figura 2.5: Relação de cada comprimento de onda com as curvas de dispersão de ondas SH para uma placa de espessura de 7 mm. As curvas de dispersão estão em vermelho e as linhas tracejadas denotam cada comprimento de onda, a saber, em preto 10 mm, em azul 15 mm, em rosa 20 mm, em verde 25 mm e, por fim, em ciano 50 mm.

Para excitar quaisquer modos, deve-se escolher um EMAT de um determinado comprimento de onda e a frequência que faz interseção entre a reta da Eq. 2-38 e as curvas de velocidade de fase governadas pela Eq. 2-33.

Além disso, quanto maior o comprimento de onda, maior a frequência de excitação, isso implica em algumas consequências como para menores comprimentos de onda, ao gerar o modo fundamental, o mesmo se encontra em uma região multimodal,

pois ultrapassou a frequência de corte de outros modos, o que implica em geração de modos indesejados. Por outro lado, ao utilizar um comprimento de onda maior, há um problema de aumentar a interferência eletromagnética, chamado na literatura de bang do sinal [44, 45], o que pode ocasionar dificuldades de detecção da onda pois a mesma pode estar localizada nessa região, portanto, ao utilizar um PPM EMAT para gerar/receber ondas SH um estudo de qual melhor modo é recomendado.

2.3

Ondas cisalhantes horizontais circunferenciais

Para analisar um espécimen curvo, a solução de placas vista na Sec. 2.2 deve sofrer alterações para um sistema de coordenadas cilíndricas, como se pode ver em Fig. 2.6. Neste trabalho foi escolhido estudar ondas SH que propagam na direção circunferencial, θ , e polarização na direção axial, z . Tais ondas são comumente conhecidas como ondas cisalhantes horizontais circunferenciais, donde em inglês abrevia-se por CSH. Dado essa polarização em z , o vetor de deslocamento nas direções r e θ são nulos ($u_r = u_\theta = 0$). Além disso, assumindo a condição de plane-strain, a variação na direção z é nula. Dessa forma, pode-se simplificar a Eq. 2-14 da seguinte forma [1, 7]:

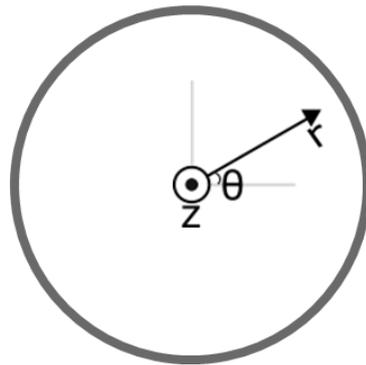


Figura 2.6: Sistemas de coordenadas cilíndricas utilizado para cálculos de ondas CSH.

$$\mu \nabla^2 u_z = \rho \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2}. \quad (2-39)$$

Assim como nas placas, é assumido que o vetor de deslocamento possui comportamento harmônico dado por:

$$u_z = \eta(r) e^{j(p\theta - \omega t)}, \quad (2-40)$$

onde p é o número de onda angular, que é o produto entre o número de onda k e o raio R :

$$p = kR, \quad (2-41)$$

onde a velocidade de fase pode ser determinada. Então, substituindo a Eq. 2-40 na Eq. 2-39 obtém-se:

$$r^2 \eta'' + r \eta' + \left[\left(\frac{r\omega}{c_s} \right)^2 - p^2 \right] \eta = 0. \quad (2-42)$$

A solução da Eq. 2-42 são em termos de funções de Bessel é:

$$\eta(r) = A_1 J_p(k_s r) + A_2 Y_p(k_s r), \quad (2-43)$$

onde k_s é o número de onda circular da onda de corpo cisalhante. Para descobrir os coeficientes A_1 e A_2 , deve-se calcular a tensão e nela aplicar as condições de contorno. A componente rz da tensão é:

$$\sigma_{rz} = \mu \frac{\partial u_z}{\partial r}. \quad (2-44)$$

Substituindo a Eq. 2-43 em Eq. 2-44 e utilizando as propriedades das funções de Bessel obtém-se:

$$\sigma_{rz} = \nu(r) e^{j(p\theta - \omega t)}, \quad (2-45)$$

onde $\nu(r)$ é igual à:

$$\nu(r) = \mu \frac{k_s}{2} \{A_1 [J_{p-1}(k_s r) - J_{p+1}(k_s r)] + A_2 [(Y_{p-1}(k_s r) - Y_{p+1}(k_s r))]\}. \quad (2-46)$$

É possível arrumar as Eqs. 2-43 e 2-46 em forma matricial:

$$\begin{bmatrix} J_p(k_s r) & Y_p(k_s r) \\ \mu \frac{k_s}{2} (J_{p-1}(k_s r) - J_{p+1}(k_s r)) & \mu \frac{k_s}{2} (Y_{p-1}(k_s r) - Y_{p+1}(k_s r)) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \eta(r) \\ \nu(r) \end{bmatrix}, \quad (2-47)$$

onde, a partir das condições de contorno de deslocamento e tensão, é possível encontrar as soluções para os coeficientes em questão.

Para um duto de camada única, a tensão no raio interno e no raio externo valem zero, de forma que:

$$\mu \frac{k_s}{2} A_1 [(J_{p-1}(k_s r_i) - J_{p+1}(k_s r_i))] = 0, \quad (2-48)$$

$$\mu \frac{k_s}{2} A_2 [(Y_{p-1}(k_s r_i) - Y_{p+1}(k_s r_i))] = 0, \quad (2-49)$$

$$\mu \frac{k_s}{2} A_1 [(J_{p-1}(k_s r_e) - J_{p+1}(k_s r_e))] = 0, \quad (2-50)$$

$$\mu \frac{k_s}{2} A_2 [(Y_{p-1}(k_s r_e) - Y_{p+1}(k_s r_e))] = 0, \quad (2-51)$$

onde r_i é o raio interno e r_e o raio externo. Dessa forma, pode-se montar a seguinte matriz:

$$\mathbf{D}(p, \omega) = \begin{bmatrix} J_{p-1}(k_s r_i) - J_{p+1}(k_s r_i) & Y_{p-1}(k_s r_i) - Y_{p+1}(k_s r_i) \\ J_{p-1}(k_s r_e) - J_{p+1}(k_s r_e) & Y_{p-1}(k_s r_e) - Y_{p+1}(k_s r_e) \end{bmatrix}. \quad (2-52)$$

A partir da Eq. 2-52, pode-se obter a seguinte relação:

$$\mathbf{D}(p, \omega) \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \end{bmatrix} = \mathbf{0}, \quad (2-53)$$

as soluções para Eq. 2-53 podem ser encontradas ao considerar que o determinante da matriz \mathbf{D} é zero como visto na Eq. 2-54.

$$\det(\mathbf{D}(p, \omega)) = 0. \quad (2-54)$$

Com isso, pode-se encontrar pares de p e ω que tornam tal determinante nulo e a partir do dois obtém-se uma solução numérica para ondas CSH, não sendo possível encontrar uma solução analítica para Eq. 2-54 [1]. Na Fig. 2.7, tem-se uma comparação da velocidade de fase de uma onda SH em uma placa de 5mm de espessura e da velocidade de fase de uma onda CSH em duto de mesma espessura. Vale ressaltar que na placa o modo SH0 não apresenta comportamento dispersivo, porém o modo CSH0 apresenta dispersão.

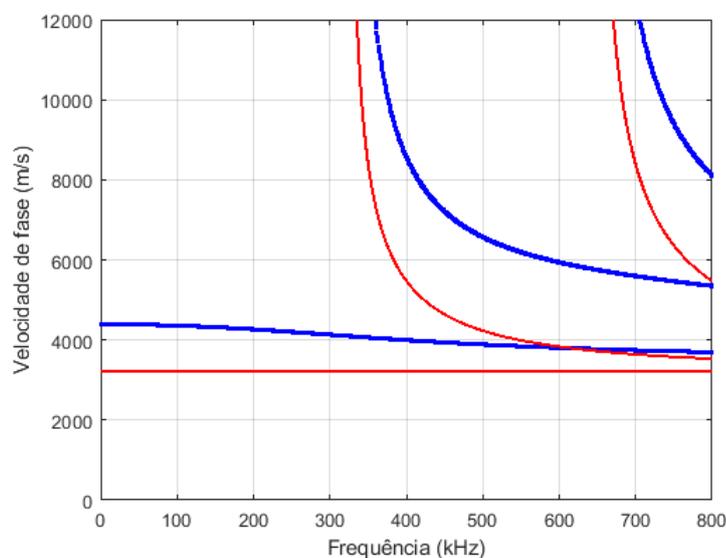


Figura 2.7: Curvas de velocidade de fase em função da frequência. Em vermelho, tem-se a curva para uma placa de aço de 5 mm, e em azul para um duto de raio interno de espessura de 5 mm e raio externo de 10 cm.

A razão entre o raio interno e o raio externo do espécimen influencia diretamente na dispersão das ondas CSH. Essa razão é usualmente utilizado para determinar a proximidade de solução em placas com dutos, quanto mais próximo de 1, mais a solução encontrada para ondas CSH se aproxima da solução de ondas SH em uma placa [1, 7]. A Fig. 2.8 denota tal efeito, onde para uma razão de 0.95 tem proximidade bem maior em relação às demais.

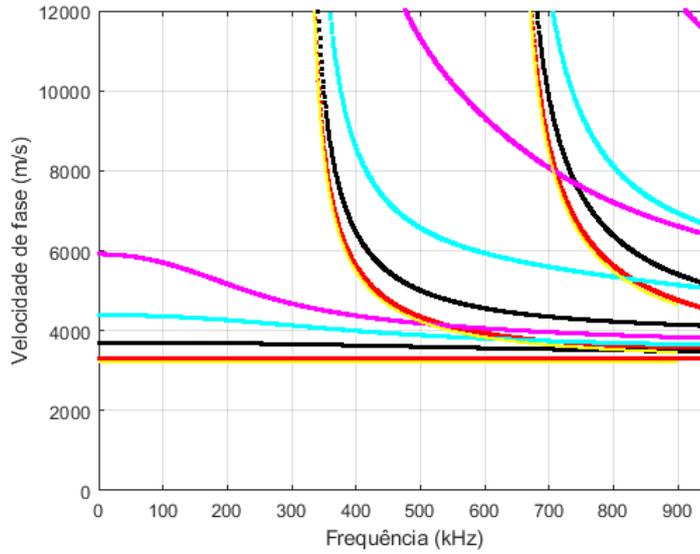


Figura 2.8: Velocidade de fase de ondas CSH para diferentes razões entre raio interno e externo. Os pontos em vermelho denotam razão de 0.95, em preto possui razão de 0.75, em ciano razão de 0.5, e em rosa razão de 0.2. As curvas em amarelo denotam os modos SH em uma placa de espessura equivalente.

2.4 Ondas guiadas em meios viscoelásticos

Para a propagação de ondas ultrassônicas, existem diferentes materiais pelos quais ondas conseguem propagar com maior ou menor facilidade, onde na literatura, muitos estudos foram feitos sob materiais elásticos, onde não possui efeitos de viscosidade, não possuindo parâmetros de atenuação [1, 2, 7, 23]. Todavia, existem materiais chamados de viscoelástico que possuem tal característica, e são comumente usados na indústria petroquímica dado que alguns deles possuem propriedades anticorrosivas, necessárias para diminuir chances de corrosão em dutos submerso [2, 7, 23].

Pode-se modelar a propagação de onda em tais meios considerando que os mesmos possuem constantes de Lamé complexas conforme visto abaixo [1, 7]:

$$\Lambda = \Lambda' - j\Lambda'' \tag{2-55}$$

$$\mu = \mu' - j\mu'' \tag{2-56}$$

onde Λ' e μ' são, respectivamente, as partes reais da primeira e segunda constantes de Lamé, e Λ'' e μ'' são, respectivamente, as partes imaginárias da primeira e segunda constantes de Lamé. Como este trabalho estuda ondas cisalhantes, a primeira constante, Λ , não interfere na velocidade de fase transversal. Entretanto, com o novo valor da segunda constante, μ , a velocidade de fase torna-se complexa:

$$c_s^* = \sqrt{\frac{\mu' - j\mu''}{\rho}} \tag{2-57}$$

Por definição, a velocidade de fase é dada por ω/k . Dessa forma, pode-se

calcular um novo número de onda:

$$k = \frac{1}{c_s^*} \omega = \sqrt{\frac{\rho}{\mu' - j\mu''}} \omega. \quad (2-58)$$

Conclui-se que o número de onda também se torna complexo e pode ser escrito da seguinte forma:

$$k^* = k' + jk'', \quad (2-59)$$

onde k' é a parte real do número de onda e k'' , a parte complexa. Substituindo a Eq. 2-59 na Eq. 2-20 obtém-se o seguinte resultado:

$$u_z(x, y, t) = (A \sin(qy) + B \cos(qy)) e^{j(k'x - \omega t)} e^{-k''x}. \quad (2-60)$$

Como se pode ver na Eq. 2-60, conforme a onda se propaga, o termo $e^{-k''x}$ atenua-a. Ou seja, devido à mudança da constante de Lamé surge a constante de atenuação, doravante denotado por α , que pode ser definido como:

$$\alpha(\omega) = \text{Im} \left\{ \frac{1}{c_s^*} \right\} \omega = -k''. \quad (2-61)$$

Como visto na Eq. 2-61, a atenuação possui dependência linear da frequência, ou seja, quanto maior a frequência, maior a atenuação de um modo propagando em um meio viscoelástico [1, 7, 23]. Já a parte real denota a constante de fase, β , dado por:

$$\beta(\omega) = \text{Re} \left\{ \frac{1}{c_s^*} \right\} \omega = k'. \quad (2-62)$$

Portanto, adotando a modelagem aqui descrita, ao analisar guias de onda com a presença de materiais viscoelásticos, há uma necessidade de verificar se o modo escolhido para um teste não-destrutivo possui alta atenuação. Caso contrário, pode-se escolher um modo com alta atenuação o que implicaria em testes não produtivos, como exemplo, em uma análise de defeitos, o eco de retorno pode não ser observável dado que a atenuação do modo escolhido pode ser consideravelmente alta.

Em dutos com mais camadas, a solução de ondas CSH torna-se mais complexa ainda mais desconsiderando os efeitos viscoelásticos. Para isso, foi estudado um modelo analítico para calcular a velocidade de fase, a atenuação e os perfis de cada modo em dutos de mais de uma camada baseado em elementos finitos, onde foram bem descritos em [7, 46, 47].

3

Método semi-analítico de elementos finitos

3.1

Teoria

Dependendo do guia de onda a ser utilizado e/ou a onda guiada na qual se deseja gerar, soluções analíticas para as curvas de dispersão não são possíveis ou de difícil solução. O método semi-analítico de elementos finitos, abreviado de SAFE em inglês, torna-se uma alternativa rápida de solução computacional e com boa precisão [7]. O método SAFE foi utilizado nesse trabalho para encontrar as raízes da equação de dispersão, e também como uma primeira análise das consequências da presença de uma camada viscoelástica em um duto metálico por meio de análises dos perfis de modo a ser estudado. É válido ressaltar que a formulação desse método já foi feita anteriormente na literatura onde foram explicados os passos até a solução [7,46,47]. Além disso, como os casos de estudo deste trabalho são dutos, foi adotado o sistema de coordenadas cilíndrico. Dessa forma, a propagação de ondas propagando-se circunferencialmente são análogas às ondas propagando-se em placas no sistema de coordenadas cartesianas. As diferenças geradas pelas mudanças de coordenadas serão explicadas conforme as mesmas aparecem.

Tal método foi utilizado para calcular os perfis dos modos a serem analisados para averiguar como os mesmos se propagam ao longo da espessura do duto em questão. Sendo tais perfis o de deslocamento, de tensão e o de vetor de Poynting. A partir dos mesmos, é possível compreender se a energia se concentra em maior parte na camada metálica. A análise teórica desse modelo visado para ondas CSH pode ser vista no apêndice A e o processamento dos sinais se encontram no apêndice C.

3.2

Teste de convergência

É necessário, primeiramente, analisar qual o número de elementos ideal para calcular as curvas de dispersão de velocidade e atenuação. De acordo com Van Velsor em [7], quanto maior o número de elementos, mais preciso será o modelo em calcular uma solução numérica para as curvas. Entretanto, utilizar muitos elementos implica em um alto custo computacional. Portanto, foi realizado um teste de convergência para analisar qual o melhor número de elementos para investigar as características de propagação no cenário de interesse.

3.2.1

Teste de convergência com 1 camada

Para o teste de convergência foi utilizado o modelo analítico para uma única camada de polietileno dimensões e propriedades vistas na Tab.3.1. Dessa forma, foram avaliadas diferentes quantidades de elementos ao longo da espessura a fim de averiguar qual possui melhor custo-benefício entre proximidade com resultados de referência e custo computacional. As curvas de dispersão podem ser vistas na Fig. 3.1.

Características	Polietileno
Raio interno (m)	1.000
Raio externo (m)	1.005
Densidade (kg/m^3)	953
Velocidade de corpo da onda-P (m/s)	2344
Constante de atenuação da onda-P (dB/mm/MHz)	0.638
Impedância acústica da onda-P (MRayll)	2.2
Velocidade de corpo da onda-S (m/s)	953
Constante de atenuação da onda-S (dB/mm/MHz)	2.608
Impedância acústica da onda-S (MRayll)	0.9

Tabela 3.1: Caso de estudo de 5 mm de polietileno.

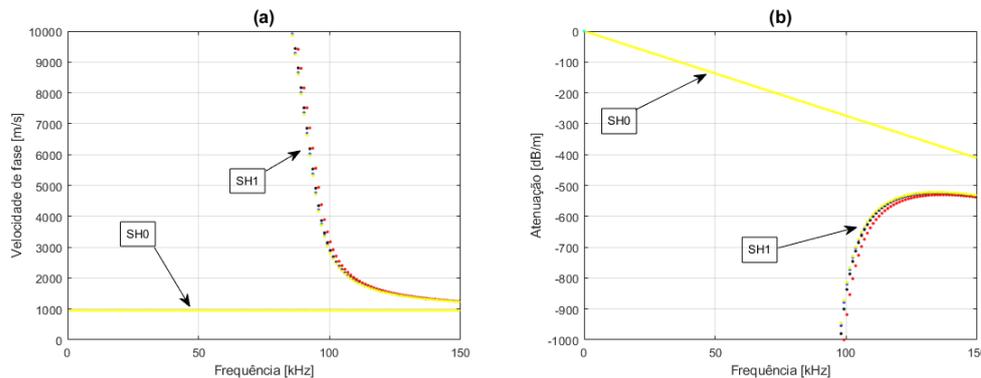


Figura 3.1: Curvas de dispersão do caso de estudo visto em Tab. 3.1. Em (a) temos a curva de velocidade de fase e em (b) a curva de atenuação.

Para esse teste foi assumido 100 elementos como referência. Com isso, foi calculado o erro relativo:

$$Erro(\%) = \frac{m_{100} - m_k}{m_{100}} \times 100, \quad (3-1)$$

onde m pode ser tanto velocidade de fase quanto atenuação e k é o número de elementos utilizados. Foram obtidos as curvas exibidas na Fig. 3.2, tal que a Fig. 3.2(a) e a Fig. 3.2(b) denotam o erro relativo para velocidade de fase, e a Fig. 3.2(c) e a Fig. 3.2(d) mostram o erro relativo da atenuação, em (b) e (d) tem-se zoom, para avaliar o erro relativo do modo fundamental, de (a) e (b) respectivamente. Por esses testes, é possível notar que, conforme se aumenta o número de elementos, diminui-se

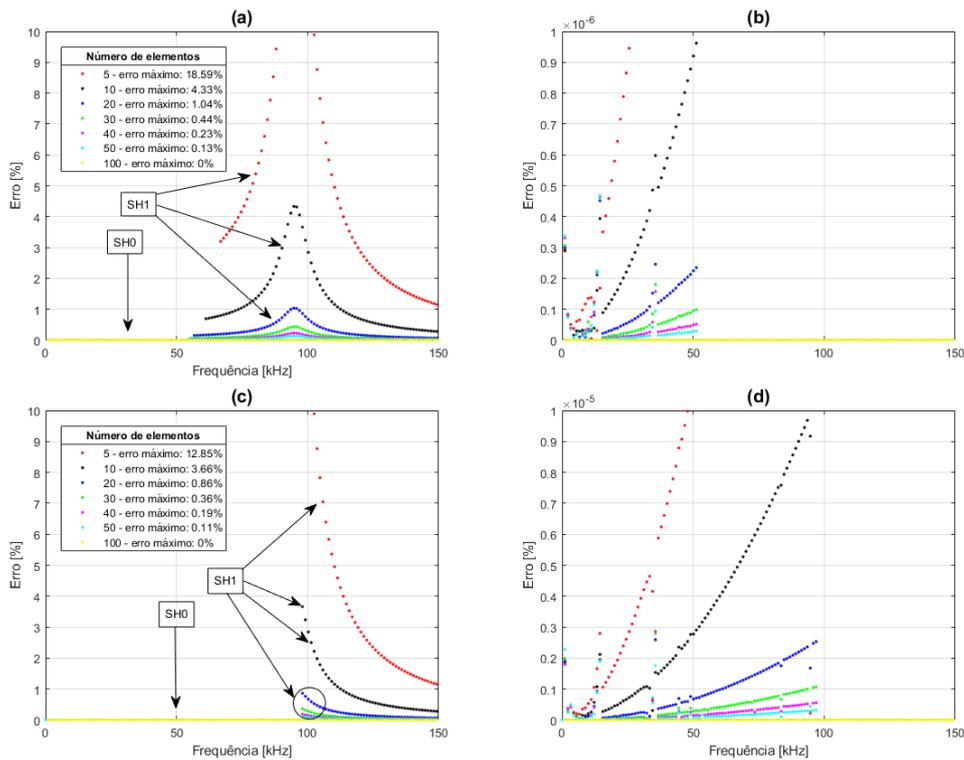


Figura 3.2: Resultado do teste de convergência para 1 camada de polietileno. Em (a) e (b) tem-se a curva de velocidade de fase e em (c) e (d), a curva de atenuação. (b) denota o zoom da Fig. (a), e (d) o zoom da Fig. (c)

o erro relativo. Também se pode observar que os erros começam a aparecer para o modo SH1, isso se dá pelo fato que para ondas SH, o seu modo fundamental é constante em relação a frequência, facilitando a utilização do modelo para apenas o modo SH0. Como os modos a partir de SH1 são dispersivos, para um modelo com baixo quantidade de elementos, há imprecisão no cálculo de velocidade de fase e atenuação. A partir de 30 elementos tem-se valores muito próximos da que foi adotado como referência. O tempo de execução para cada caso pode ser visto na tabela 3.2.

Quantidade de elementos	Tempo [s]
5	5.2030
10	7.4914
20	13.3464
30	19.8654
40	26.9399
50	33.7402
100	77.6344

Tabela 3.2: Tempo de execução do modelo analítico para diferentes quantidades de elementos para uma camada única.

Entretanto, como o objetivo desse trabalho é analisar dutos com multicamadas, embora tais resultados já indiquem uma direção que deverá ser seguida, ainda não é possível criar um critério preciso de escolha de quantidade de elementos.

3.2.2

Teste de convergência com 2 camadas

Um novo caso de estudo foi utilizado para analisar qual a melhor quantidade de elementos. Tal caso consiste numa camada de aço de 6.35 mm e uma camada de polietileno de 2.0 mm com as características reportadas na Tab. 3.3 e curvas de dispersão exibidas na Fig. 3.3 .

Características	Aço	Polietileno
Raio interno (mm)	155.5	161.9
Raio externo (mm)	161.9	163.9
Densidade (kg/m^3)	7850	953
Velocidade de corpo da onda-P (m/s)	5850	2344
Constante de atenuação da onda-P (dB/mm/MHz)	0	0.638
Impedância acústica da onda-P (MRayl)	46	2.2
Velocidade de corpo da onda-S (m/s)	3230	953
Constante de atenuação da onda-S (dB/mm/MHz)	0	2.608
Impedância acústica da onda-S (MRayl)	25	0.9

Tabela 3.3: Caso de estudo de uma camada de 6.35 mm de aço e uma camada de 2.0 mm de polietileno.

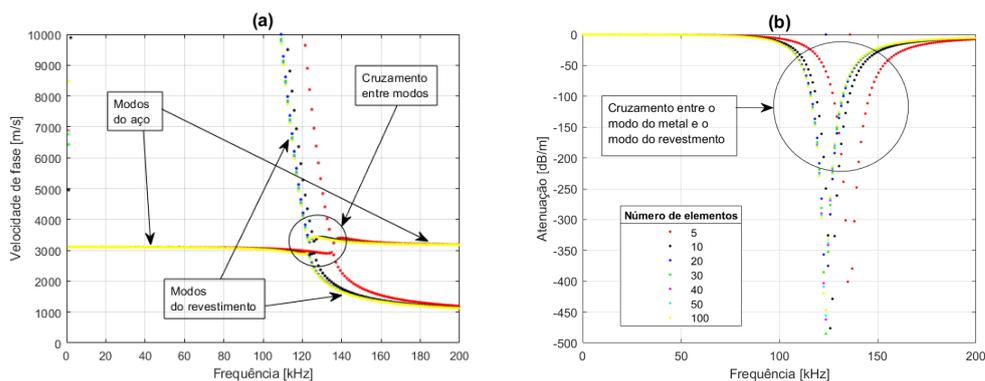


Figura 3.3: Curvas de dispersão do caso de estudo da Tab. 3.3. Em (a) tem-se a curva de velocidade de fase e em (b), a curva de atenuação.

Repetiu-se, então, os mesmos testes feitos anteriormente a fim de observar qual a quantidade ideal de elementos a ser utilizado. Mais uma vez foi adotado 100 elementos como referência, foram obtidos as curvas mostradas na Fig. 3.4(a) e na Fig. 3.4(b) que denotam o erro relativo para velocidade de fase, e na Fig. 3.4(c) e na Fig. 3.4(d) que mostram o erro relativo da atenuação, em 3.4(b) e 3.4(d) tem-se zoom, para avaliar o erro relativo do modo fundamental, de 3.3(a) e 3.3(b) respectivamente.

Diferentemente do caso para uma única camada, tem-se erros também em baixa frequência, anteriores ao modo quasi-SH1 do metal, o que implica nas quebras entre 100-150 kHz visualizadas na Fig.3.4. Devido a presença de duas camadas, sendo uma delas viscoelástica, uma quantidade menor de elementos afeta diretamente no cálculo da atenuação, tornando inviável quaisquer análises da onda propagando em meios com atenuação presente. Entretanto, nota-se que para 50 elementos tem-se erros relativamente baixos, sendo o erro máximo de atenuação de aproximadamente

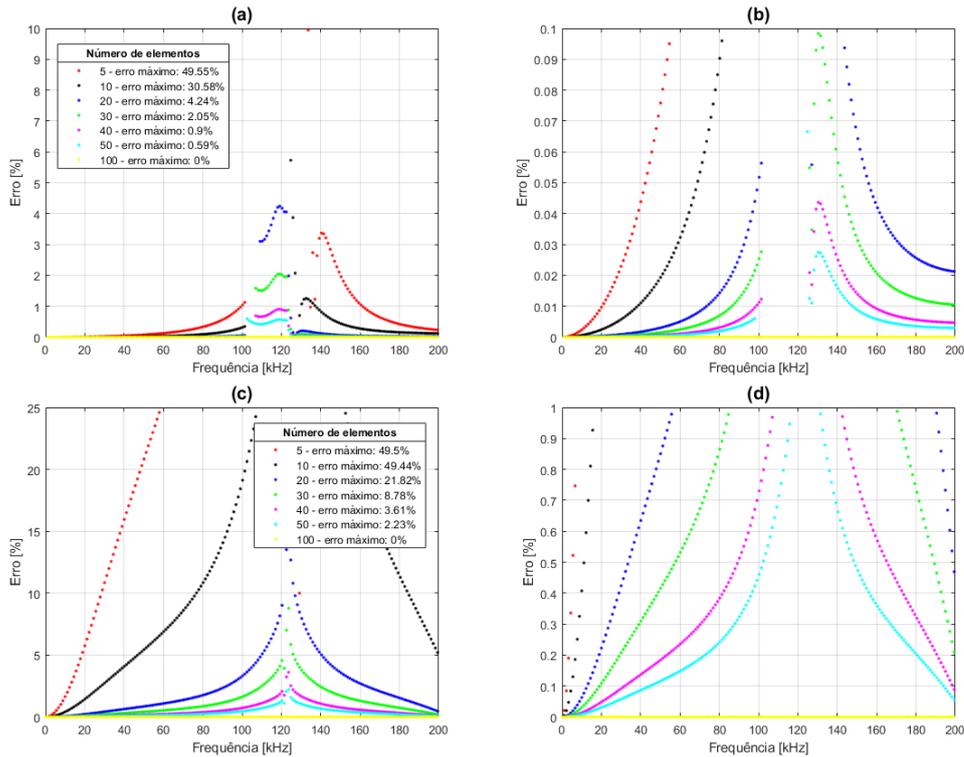


Figura 3.4: Resultado do teste de convergência para 2 camadas, a saber, aço de 6.35 mm e polietileno de 2.0 mm de espessura. Em (a) e (b) tem-se a curva de velocidade de fase e em (c) e (d), a curva de atenuação.

2.5%, e como podemos na Tab.3.4, possui aproximadamente um terço do custo computacional. Esta quantidade de elementos foi utilizada nos resultados daqui em diante.

Quantidade de elementos	Tempo [s]
5	4.5591
10	7.4891
20	13.5655
30	19.8587
40	27.3612
50	34.7773
100	96.2900

Tabela 3.4: Tempo de execução do modelo analítico para diferentes quantidades de elementos para uma camada de aço e revestimento de polietileno.

3.3 Efeito da espessura do revestimento

Definido 50 elementos como a quantidade ideal para calcular as características da onda propagante, pode-se analisar o seu comportamento em meios com múltiplas camadas. Primeiramente foram recalculadas as curvas de dispersão para o caso de estudo da Tab. 3.3, porém para várias espessuras de revestimento. Essas são exibidas na Fig. 3.5, onde as linhas tracejadas mostram a velocidade de fase em função da frequência para um determinado comprimento de onda.

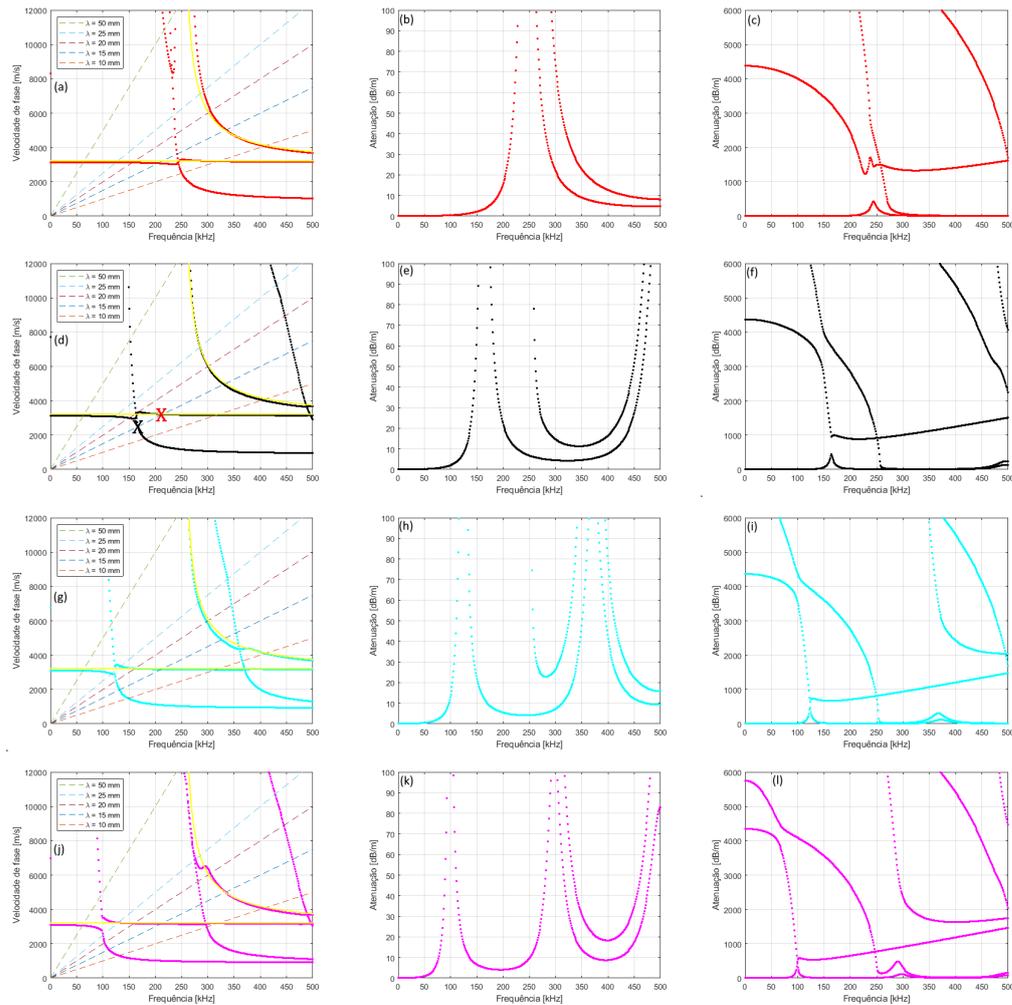


Figura 3.5: Curvas de dispersão para ondas CSH em um duto com uma camada de aço de 6.35 mm e uma camada revestimento de polietileno de diferentes espessuras, a saber, 1.0 mm em pontos vermelhos (a)-(c), 1.5 mm em pontos pretos (d)-(f), 2.0 mm em pontos cianos (g)-(i) e 2.5 mm em pontos rosas (j)-(l). As curvas em amarelo denotam a velocidade de fase para uma placa de aço de mesma espessura sem revestimento (a,d,g,h). Na primeira coluna, tem-se a curva de velocidade de fase, onde as linhas tracejadas mostram a relação entre frequência e velocidade para diferentes comprimentos de onda, a saber, 1.0 mm, 1.5 mm, 2.0 mm e 2.5 mm. Nas demais colunas têm-se as curvas de atenuação.

Como se pode ver na Fig. 3.5, as soluções do método SAFE, para o caso de estudo com diferentes espessuras de revestimento, se aproximam da curva em amarelo que denota os modos provenientes de uma placa de aço de mesma espessura, obtidos pela Eq. 2-33 utilizando as mesmas características da Tab. 3.3. Observa-se que para as soluções obtidas pelo método SAFE, existem outras curvas que não se aproximam da solução para placas. Para compreender o que seriam esses modos, foi analisado os perfis de um modo cuja solução do método SAFE é próxima a curva de uma placa de aço de mesma espessura.

Fig. 3.6 denota os perfis do modo de comprimento de onda de 15 mm com 210 kHz cujo revestimento possui 1.5 mm de espessura. Esse modo é marcado com um X em preto na Fig. 3.5(a). Como se pode ver na Fig. 3.6, os perfis do modo denotam a propagação da onda ao longo da espessura do duto estudado, onde a linha em ciano denota a interface entre a camada metálica, denotada da linha para

baixo, e o revestimento viscoelástico, denotado da linha para cima. Em vermelho tem-se o vetor de deslocamento na direção z , em azul o tensor de tensão no plano θz e em preto o vetor de Poynting da direção θ , sendo este último onde denota em que região estará concentrada a energia do modo estudado. Para esse modo, percebe-se que os perfis na camada metálica se comportam semelhante aos modos excitados em uma placa como visto na Sec. 2.2, e após a camada de aço, o mesmo apresenta perfil de modo com baixa distribuição de energia. Ou seja, conclui-se que o mesmo é um modo que se propaga, predominantemente, na camada de aço. A seguir, foi analisado esse modo diferente do revestimento excitado com 15 mm de comprimento de onda em 165 kHz. Como se pode ver na Fig. 3.7, os perfis mostram que quase não há energia na camada metálica e a mesma se concentra no revestimento. Ou seja, o que está sendo excitado é um modo que se propaga, predominantemente, no revestimento e tal modo possui alta atenuação, nesse caso de aproximadamente 900 dB/m, devido a característica viscoelástica proveniente do material que compõe tal camada. Estes são chamados, então, de modos do revestimento. A seguir, são estudadas as características dos modos por meio de seus perfis.

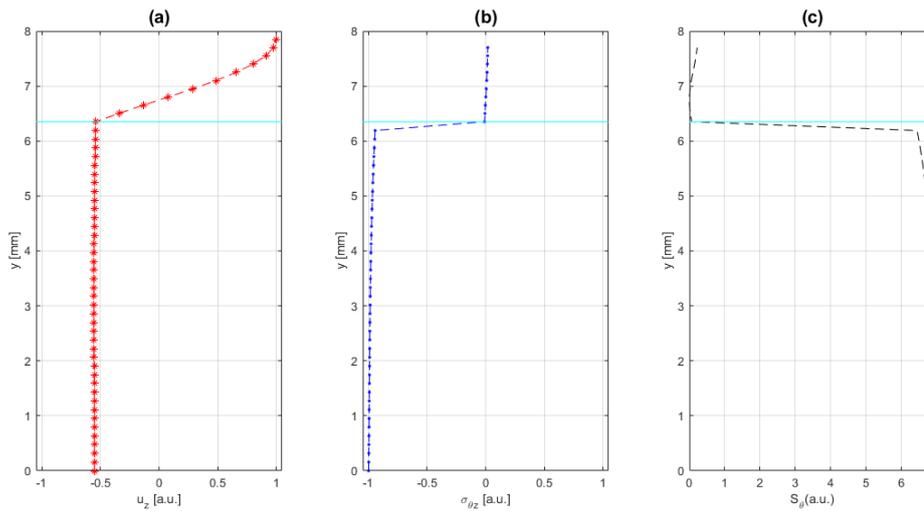


Figura 3.6: Perfis do modo em 210 kHz com comprimento de onda de 15 mm para uma espessura de revestimento de 1.5 mm. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento.

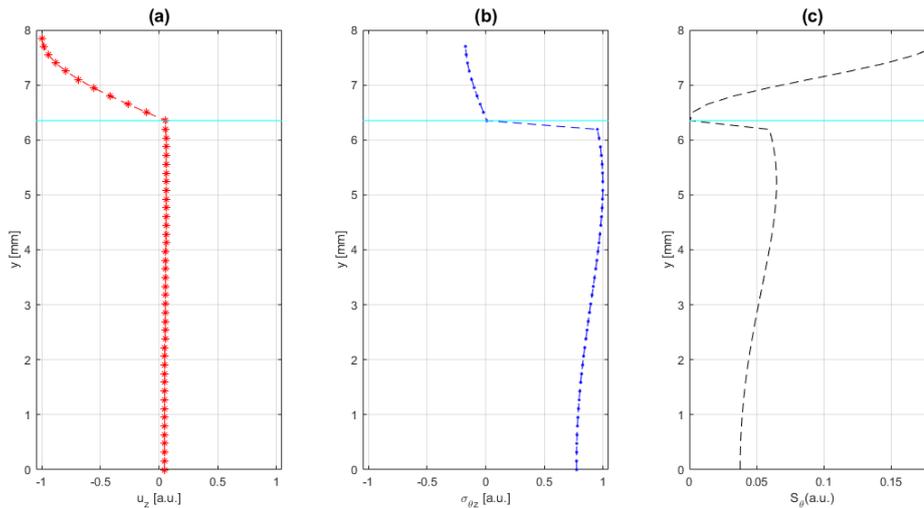


Figura 3.7: Perfis do modo em 165 kHz com comprimento de onda de 15 mm para uma espessura de revestimento de 1.5 mm. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento.

3.3.1

Modos no revestimento

Primeiramente, foram estudados os modos do revestimento para as diferentes espessuras dessa camada. O objetivo dessa análise é observar como as ondas CSH se propagam ao longo da espessura, ao excitar os modos do revestimento. Uma vez que esses são materiais viscoelásticos, a atenuação dos mesmos impactará diretamente na amplitude das ondas propagantes. Para realização desta análise, cada espessura foi denominada como a , b , c e d , onde cada uma denota 1.0 mm, 1.5 mm, 2.0 mm e 2.5 mm, respectivamente. Foi analisado, primeiramente, o denominado primeiro modo do revestimento e após foi estudado o segundo modo do revestimento, que aparecem em espessuras maiores. Na Fig. 3.8 pode-se ver as curvas de dispersão semelhante a Fig. 3.5 com adição das regiões de operação para excitar os modos do revestimento.

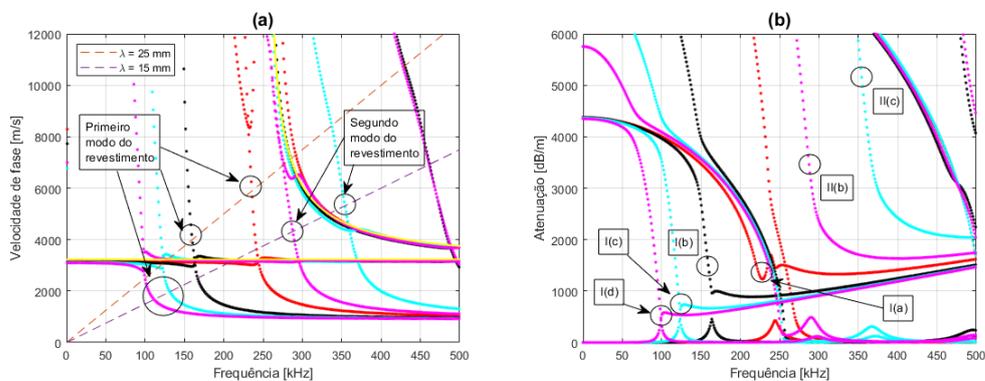


Figura 3.8: Curvas de dispersão semelhantes a Fig. 3.5 com adição das regiões de operação em modos do revestimento a serem estudados. Em (a) temos a curva de velocidade de fase, onde as linhas tracejadas mostram a relação entre frequência e velocidade para diferentes comprimentos de onda, a saber, 1.0 mm, 1.5 mm, 2.0 mm e 2.5 mm. Em (b) tem-se as curvas de atenuação.

3.3.1.1

Primeiro modo do revestimento

Foi analisado o primeiro modo do revestimento. O mesmo foi chamado de I como se pode ver na Fig. 3.8. Todas as análises foram feitas através do perfil dos modos, onde é possível analisar a distribuição ao longo da espessura da componente z vetor de deslocamento normalizado, a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado e a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting. Todas as distribuições citadas previamente denotam o comportamento ao longo da espessura das ondas propagantes.

Primeiramente foi analisado a região $I(a)$, tal modo foi excitado com comprimento de onda de 25 mm em 235 kHz, e como pode ser visto na Fig. 3.8 a atenuação desse modo está próximo de 1700 dB/m. Tal comportamento pode ser visto nos seus perfis na Fig. 3.9, onde se pode ver a amplitude do vetor de deslocamento é muito maior no revestimento dado que na camada de aço a amplitude normalizada se aproxima de zero. Além disso, a energia, mostrada por meio do vetor de Poynting, está quase toda concentrada na camada de revestimento, confirmando a alta atenuação desse modo.

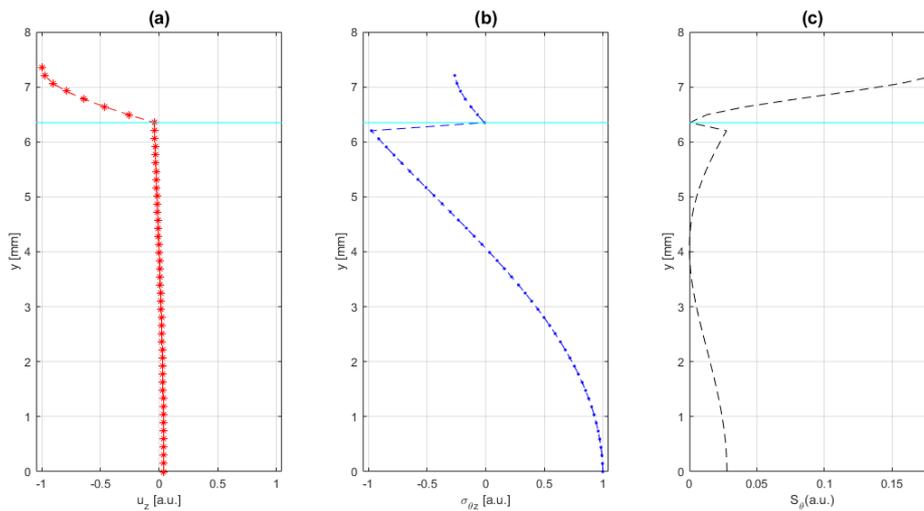


Figura 3.9: Perfis do modo em 235 kHz com comprimento de onda de 25 mm para uma espessura de revestimento de 1.0 mm, com atenuação de 1700 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento.

Já $I(b)$ foi excitado com comprimento de onda de 25 mm em 160 kHz e como pode ser visto na Fig. 3.8 a atenuação desse modo está próxima de 1500 dB/m. Assim como em $I(a)$, os perfis desse modo denotam o comportamento, tais perfis podem ser vistos na Fig. 3.10. Novamente, tem-se que a amplitude do vetor de deslocamento no revestimento é muito maior que na camada metálica, dado que na camada metálica, a amplitude normalizada se aproxima de zero. E, como se pode ver no vetor de Poynting, a energia está concentrada no revestimento.

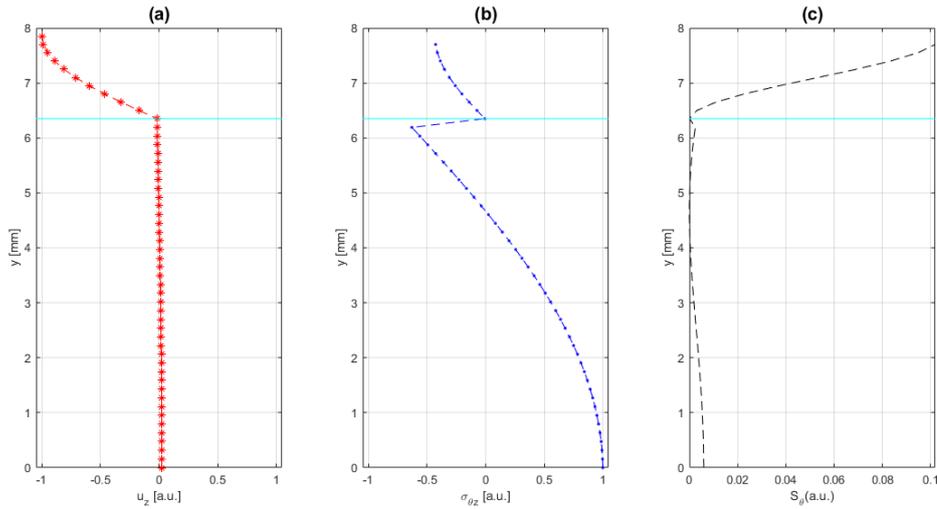


Figura 3.10: Perfis do modo em 160 kHz com comprimento de onda de 25 mm para uma espessura de revestimento de 1.5 mm, com atenuação de 1500 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento.

O modo em $I(c)$ foi excitado com comprimento de onda de 15 mm em 130 kHz, e como se pode ver na Fig. 3.8 a atenuação desse modo está próxima de 750 dB/m. Os perfis do modo, visto na Fig. 3.11, confirmam tal atenuação alta. Assim como nos casos anteriores a amplitude do vetor de deslocamento no revestimento é muito maior que na camada de aço, uma vez que a amplitude normalizada se aproxima de zero na camada de aço. E, como se pode ser visto no vetor de Poynting, a energia está concentrada no revestimento.

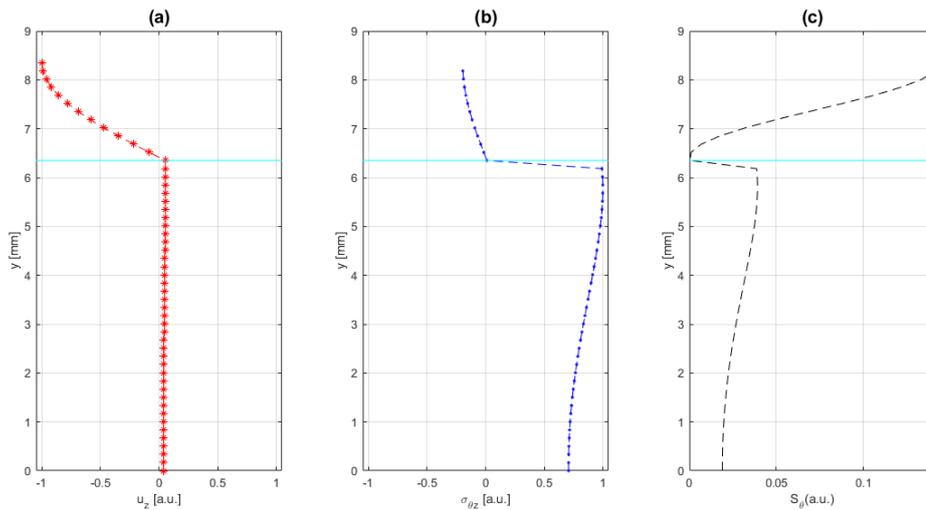


Figura 3.11: Perfis do modo em 130 kHz com comprimento de onda de 15 mm para uma espessura de revestimento de 2.0 mm, com atenuação de 725 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento.

Por fim, o modo da região $I(d)$ foi excitado com comprimento de onda de 15 mm em 110 kHz, e como se pode ver na Fig. 3.8 a atenuação desse modo está próxima de 550 dB/m. Os perfis do modo, vistos na Fig. 3.12, confirmam a alta atenuação. Como se pode ver a amplitude do vetor de deslocamento no revestimento é muito maior que na camada metálica, uma vez que a amplitude normalizada se aproxima de zero na camada metálica. E a energia está concentrada no revestimento, como se pode ser ver no vetor de Poynting.

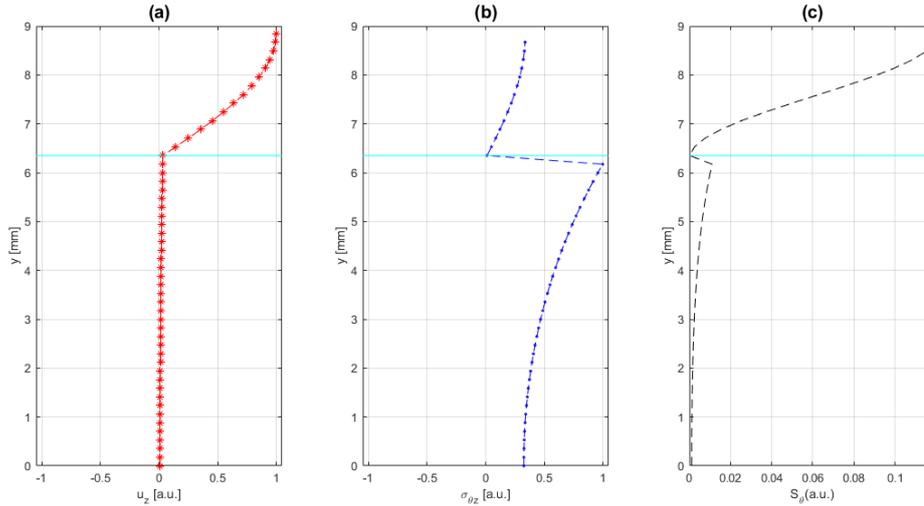


Figura 3.12: Perfis do modo em 110 kHz com comprimento de onda de 15 mm para uma espessura de revestimento de 2.5 mm, com atenuação de 550 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θ do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento.

Então, foi confirmado que o primeiro modo do revestimento possui alta atenuação mesmo para camadas mais finas de revestimento. A seguir, foi analisado o segundo modo do revestimento.

3.3.1.2 Segundo modo do revestimento

Foi analisado também o segundo modo do revestimento, chamado de II . Tal modo, por ser ordem superior, possui atenuação mais alta [48]. A Fig. 3.8 denota os pontos de operação desse modo. Como esse modo é de ordem superior, as espessuras a e b não foram estudadas pois a frequência de corte dos mesmos é alta.

O modo na região $II(c)$ foi excitado com comprimento de onda de 15 mm em 355 kHz conforme visto na Fig. 3.8. Como dito, a atenuação para modos de maior ordem é maior, nesse caso em torno de 5150 dB/m. Os perfis de modo vistos na Fig. 3.13 confirmam tal fato. O vetor de deslocamento confirma que o segundo modo do revestimento está sendo excitado, e a energia, mostrada pelo vetor de Poynting, está concentrada nos limites do revestimento e da camada de aço, confirmando a alta atenuação.

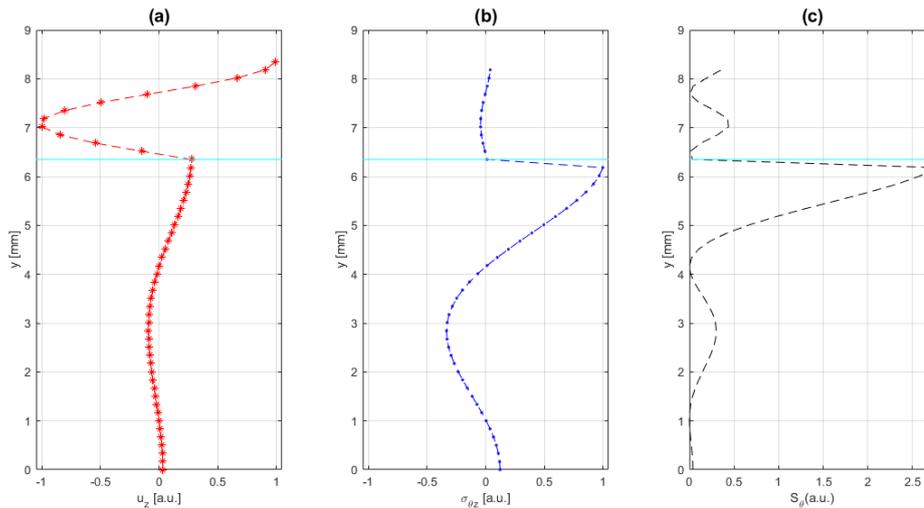


Figura 3.13: Perfis do modo em 355 kHz com comprimento de onda de 15 mm para uma espessura de revestimento de 2.0 mm, com atenuação de 5150 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento.

Já o modo na região $II(d)$ foi excitado com comprimento de onda de 15 mm em 280 kHz e conforme visto na Fig. 3.8 a atenuação está em torno de 3500 dB/m. Esse comportamento é confirmado pelos seus perfis vistos na Fig. 3.14, onde é possível notar que a energia, denotada pelo vetor de Poynting, está concentrada no revestimento e quase não há energia na camada metálica.

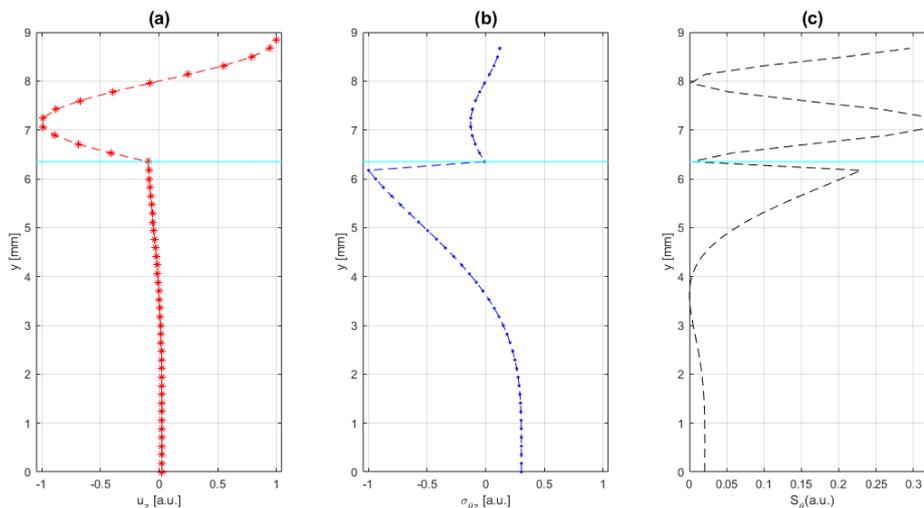


Figura 3.14: Perfis do modo em 300 kHz com comprimento de onda de 15 mm para uma espessura de revestimento de 2.5 mm, com atenuação de 3500 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento.

3.3.1.3

Conclusão

Concluiu-se que os modos do revestimento possuem alta atenuação, além disso foi confirmado também que os modos de ordem superior possuem atenuação maior. A Tab. 3.5 mostra a atenuação para todos os pontos de operação estudados do revestimento. A seguir foi estudado os modos da camada metálica, e conforme estudado nessa Subseção, quanto mais próximo a um modo do revestimento, mais atenuação tal modo terá.

Ponto de operação	Atenuação (dB/m)
I(a)	1689.92
I(b)	1502.99
I(c)	730.97
I(d)	558.45
II(c)	5156.17
II(d)	3457.83

Tabela 3.5: Atenuação dos modos do revestimento para diferentes espessuras da camada de polietileno.

3.3.2

Modos no metal

Para realização da análise nos modos do metal, cada espessura foi denominada, novamente, como a , b , c e d , onde cada uma denota 1.0 mm, 1.5 mm, 2.0 mm e 2.5 mm respectivamente. Foi separado dessa maneira pois para cada espessura diferente de revestimento, haverá mudança de interação entre os modos do revestimento e os do metal, o que poderá ocasionar em aumento ou diminuição da atenuação. A partir desse estudo, é possível inferir quais são os melhores modos para serem utilizados em testes não-destrutivos no caso de estudo da Tab. 3.3, porém para diferentes espessuras de revestimento.

3.3.2.1

50 mm

Foi analisado, primeiramente, em baixa frequência. Tal estudo é fundamental, pois é esperado que os modos do revestimento quase não sejam gerados, o que irá implicar em baixa atenuação. Então, para 50 mm de comprimento de onda, foi excitado o modo em torno de 60 kHz. A região de operação pode ser vista na Fig. 3.15.

Em a tem-se baixa atenuação visto na Fig. 3.15. Como o primeiro modo do revestimento está consideravelmente afastado, a atenuação é baixa, em torno de 0.15 dB/m. Tal comportamento é visto pelos perfis deste modo na Fig. 3.16. Pode-se ver pelo vetor de Poynting que a energia está quase toda concentrada na camada metálica, e quase não há energia no revestimento, confirmando que tal modo possui atenuação baixa.

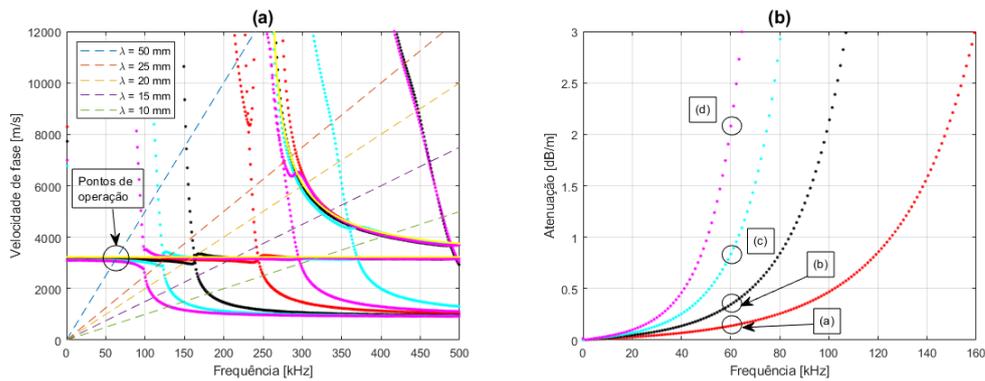


Figura 3.15: Curvas de dispersão semelhantes a Fig. 3.5 com adição da região de operação em 50 mm a ser estudada. Em (a) temos a curva de velocidade de fase, onde as linhas tracejadas mostram a relação entre frequência e velocidade para diferentes comprimentos de onda, a saber, 1.0 mm, 1.5 mm, 2.0 mm e 2.5 mm. Em (b) tem-se as curvas de atenuação.

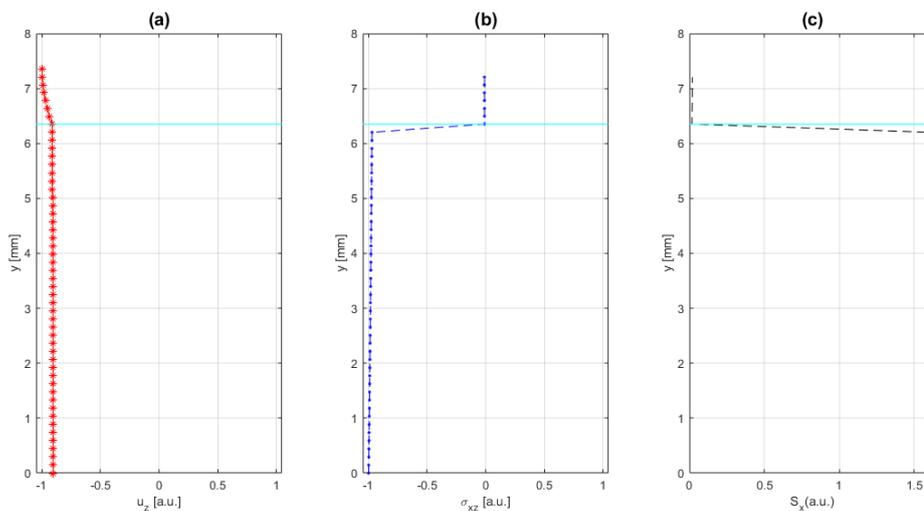


Figura 3.16: Perfis do modo em 60 kHz com comprimento de onda de 50 mm para uma espessura de revestimento de 1.0 mm, com atenuação de 0.15 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θ_z do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento.

Para *b*, há aproximação do primeiro modo do revestimento em relação ao ponto de operação. Isso implicará em um aumento de atenuação, e como se pode ver na Fig. 3.15, a mesma está em torno de 0.4 dB/m. O comportamento pode ser visto nos perfis do modo vistos na Fig. 3.17. É possível verificar que o vetor de deslocamento para esse modo possui, na camada metálica, intensidade em módulo, menor que o caso anterior, o que ocasionou no aumento da atenuação, mas ainda assim, como se pode ver no vetor de Poynting, a energia está concentrada no aço e não no revestimento.

Para *c*, tem-se, novamente, aproximação do primeiro modo do revestimento, ocasionando um novo aumento de atenuação, em torno de 1 dB/m, como se pode ser em Fig. 3.15. Os perfis deste modo denotam tal comportamento, e, assim como no caso anterior, o vetor de deslocamento possui intensidade menor em módulo. Entretanto, a energia, vista pelo Vetor de Poynting, ainda se concentra em sua maior

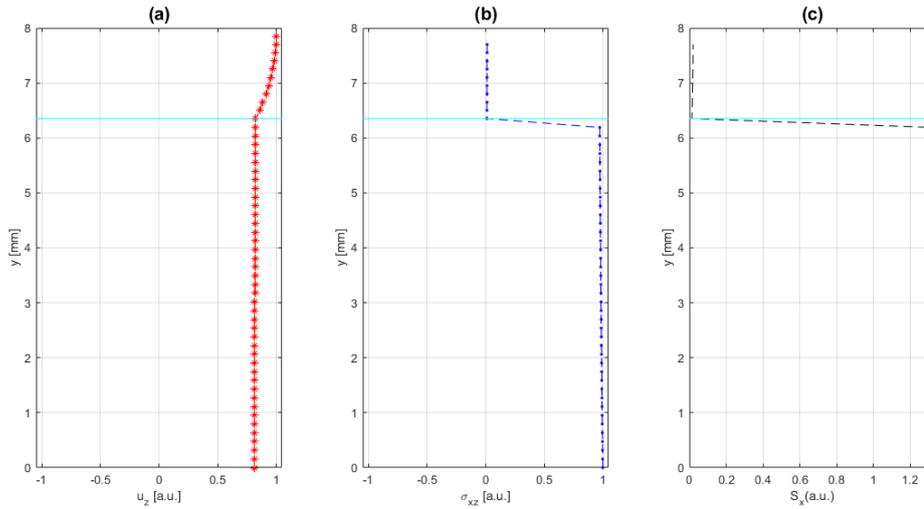


Figura 3.17: Perfis do modo em 60 kHz com comprimento de onda de 50 mm para uma espessura de revestimento de 1.5 mm, com atenuação de 0.4 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento.

parte na camada de aço.

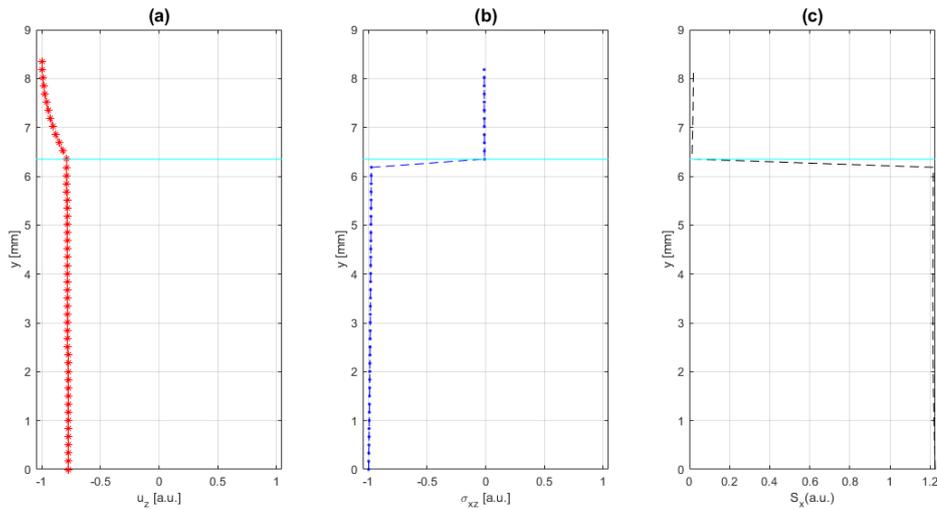


Figura 3.18: Perfis do modo em 60 kHz com comprimento de onda de 50 mm para uma espessura de revestimento de 2.0 mm, com atenuação de 1 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento.

Por fim, em d se tem, mais uma vez, uma nova aproximação do primeiro modo do revestimento, o que acarreta um novo aumento da atenuação como se pode ver em Fig. 3.15, em torno de 2 dB/m. E, assim como os casos anteriores, os perfis deste modo denotam o comportamento. Novamente, o vetor de deslocamento possui intensidade em módulo menor que os demais casos, mas ainda assim, como mostra o vetor de Poynting, a maior parte da energia se encontra na camada metálica e quase

não há energia no revestimento.

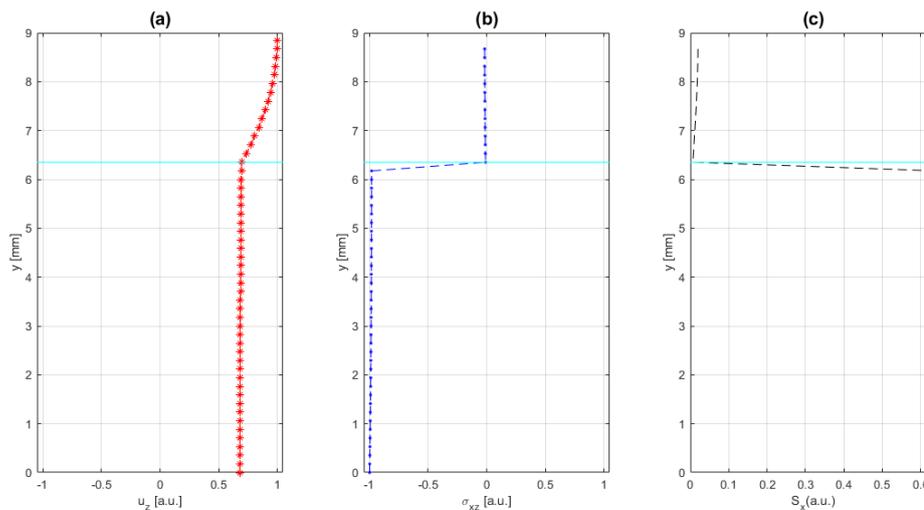


Figura 3.19: Perfis do modo em 60 kHz com comprimento de onda de 50 mm para uma espessura de revestimento de 2.5 mm, com atenuação de 2 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento.

Então, para esse comprimento de onda, tem-se os valores de atenuação vistos na Tab. 3.6. Devido a operar em baixa frequência, os modos do revestimento se encontram muito afastados dessa região de operação. Entretanto, para realização de testes não-destrutivos, como análise de defeitos, não é interessante operar em tal baixa frequência, visto que para identificação de defeitos, é necessário maior sensibilidade, sendo possível somente operando com maior frequência. Além disso, como a geração de tais ondas é feita com EMATs, para 50 mm de comprimento de onda, tal equipamento seria da ordem de grandeza do diâmetro do duto a ser analisado, o que inviabiliza a utilização desse modo.

Espessura do revestimento (mm)	Atenuação (dB/m)
(a)	0.148
(b)	0.382
(c)	0.995
(d)	2.274

Tabela 3.6: Atenuação dos modos do metal em baixa frequência para diferentes espessuras da camada de polietileno.

3.3.2.2 25 mm

Com o objetivo de analisar em frequências mais altas, foi analisado o comportamento para menor comprimento de onda. Em 25 mm, tem-se que o modo quasi-SH0 possui frequência de excitação duas vezes maior em relação a 50 mm de comprimento de onda, e também é possível gerar modos de ordem maior em

frequências ainda maiores. Para este comprimento de onda o modo quasi-SH1 possui frequência de excitação em torno de 285 kHz. Ambos os modos foram analisados abaixo e as curvas de atenuação são mostradas na Fig. 3.20.

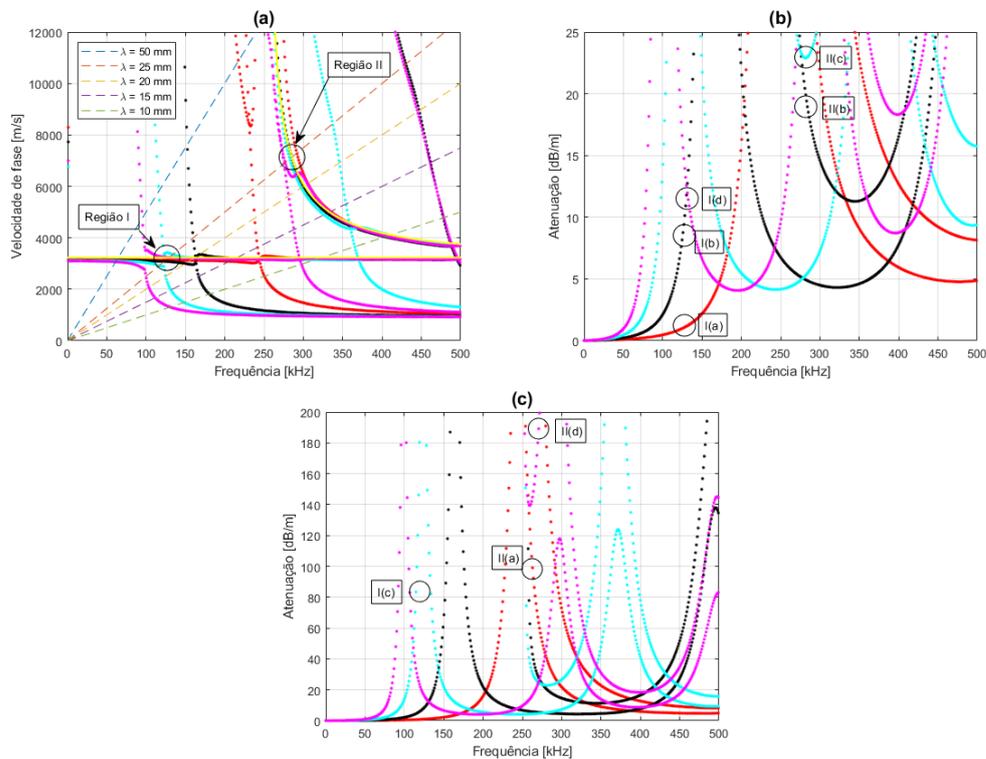


Figura 3.20: Curvas de dispersão semelhantes a Fig. 3.5 com adição das regiões de operação em 25 mm a serem estudadas. Em (a) temos a curva de velocidade de fase, onde as linhas tracejadas mostram a relação entre frequência e velocidade para diferentes comprimentos de onda, a saber, 1.0 mm, 1.5 mm, 2.0 mm e 2.5 mm. Em (b) e (c) tem-se as curvas de atenuação.

Para o modo quasi-SH0 em $I(a)$, tem-se que o primeiro modo do revestimento se encontra distante do ponto de operação, implicando em uma baixa atenuação vista na Fig. 3.20 em torno de 1 dB/m. O comportamento deste modo é visto nos seus perfis de modo na Fig. 3.21, onde é possível ver, por meio do vetor de Poynting, que a energia está concentrada em sua maior parte na camada de aço.

Em $I(b)$, há um aumento de atenuação devido a aproximação do primeiro modo do revestimento, como se pode ver em Fig. 3.20 em torno de 7.5 dB/m. Os perfis deste modo, vistos na Fig. 3.22, mostram tal efeito. É possível ver que o vetor de deslocamento diminuiu em módulo em relação ao caso anterior, mas ainda assim a energia, observada pelo vetor de Poynting, está em sua maior parte na camada de aço.

Em $I(c)$ tem-se um cenário novo, o primeiro modo do revestimento se encontra no ponto de operação acarretando em um aumento considerável da atenuação, em torno de 80 dB/m como se pode ver na Fig. 3.20. Os perfis do modo, vistos na Fig. 3.23, o vetor de deslocamento na camada de aço é muito próximo de zero, assim como a energia, mostrada pelo vetor de Poynting. Confirmando que esse modo possui alta atenuação devido ao modo do revestimento estar muito próximo ao ponto de operação.

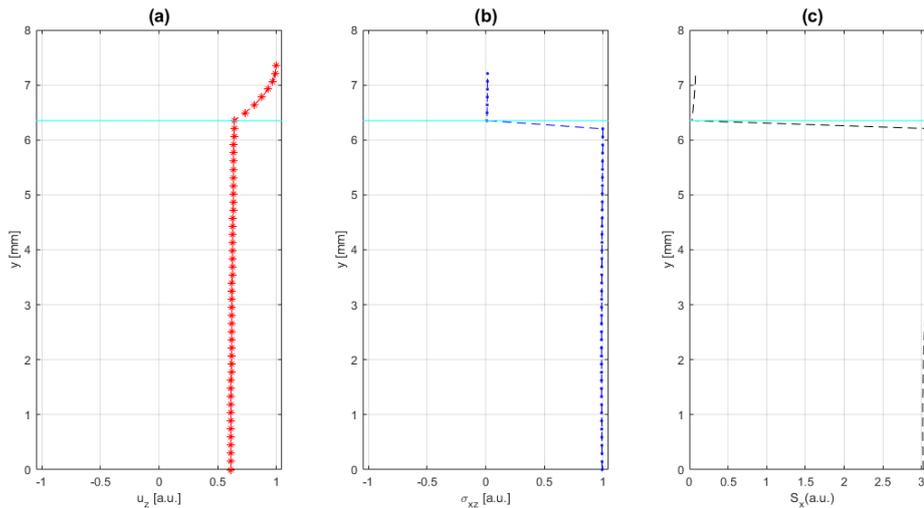


Figura 3.21: Perfis do modo em 125 kHz com comprimento de onda de 25 mm para uma espessura de revestimento de 1.0 mm, com atenuação de 1 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento.

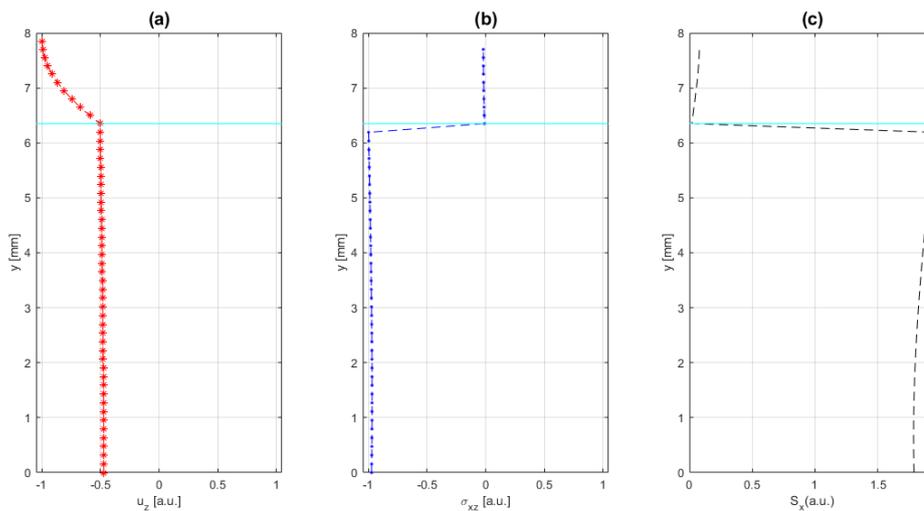


Figura 3.22: Perfis do modo em 125 kHz com comprimento de onda de 25 mm para uma espessura de revestimento de 1.5 mm, com atenuação de 7.5 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento.

Em $I(d)$, há um afastamento do primeiro modo do revestimento em relação ao caso anterior, o que diminui a atenuação para 15 dB/m como pode ser visto na Fig. 3.20. Os perfis desse modo, vistos na Fig. 3.24, denotam tal comportamento, é possível ver que a intensidade do vetor de deslocamento aumentou e que a energia, mostrada pelo vetor de Poynting, está concentrada em sua maior parte na camada metálica.

A Tab. 3.7 resume a atenuação de desse modo para as diferentes camadas

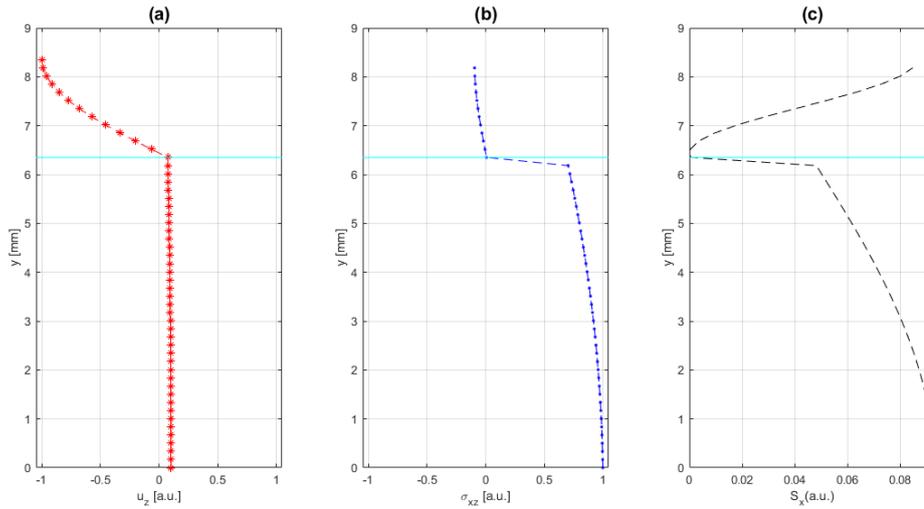


Figura 3.23: Perfis do modo em 125 kHz com comprimento de onda de 25 mm para uma espessura de revestimento de 2.0 mm, com atenuação de 80 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente zx do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento.

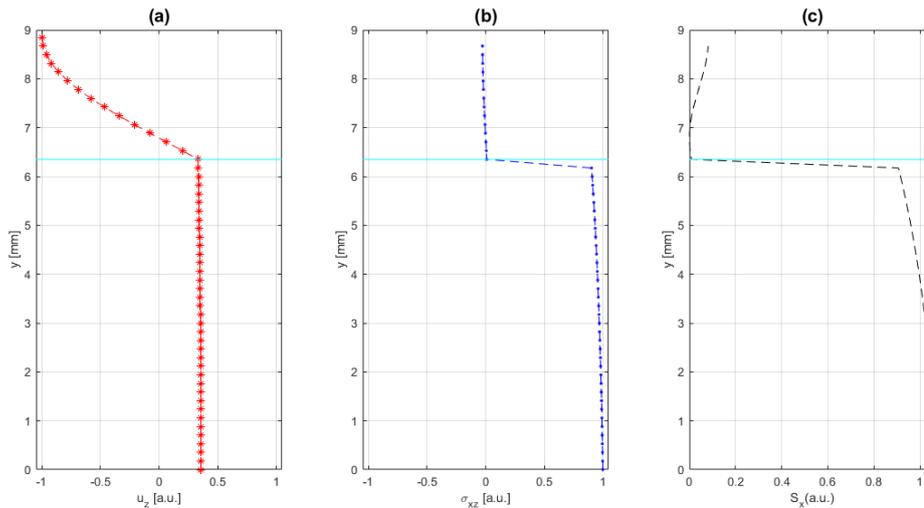


Figura 3.24: Perfis do modo em 125 kHz com comprimento de onda de 25 mm para uma espessura de revestimento de 2.5 mm, com atenuação de 15 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente zx do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento.

de espessura, onde se confirma que a atenuação foi maior em 2.0 mm de espessura devido à proximidade de um modo do revestimento.

Foi analisado também o modo quasi-SH1 para 25 mm de comprimento de onda. Tal região pode ser excitada em aproximadamente 280 kHz. Vale ressaltar que o modo quasi-SH1 possui atenuação maior em relação ao modo quasi-SH0, isso acontece porque o modo quasi-SH1 possui frequência de corte para ser excitado, ocasionando uma alta variação da frequência, o que torna esse modo mais suscetível a atenuação

Espessura do revestimento (mm)	Atenuação (dB/m)
1.0	0.985
1.5	7.601
2.0	82.164
2.5	13.226

Tabela 3.7: Atenuação dos modos do metal com 25mm de comprimento de onda em 125 kHz para diferentes espessuras da camada de polietileno.

[48].

Ao analisar em $II(a)$ é possível ver na Fig. 3.20 que tal modo possui alta atenuação devido à proximidade de um modo do revestimento com o modo quasi-SH1 do aço. O valor da atenuação deste caso é em torno de 100 dB/m. Os perfis desse modo, vistos na Fig. 3.25, denotam o comportamento do modo analisado. Embora a maior parte da energia está concentrada na camada de aço, como se pode ver pelo vetor de Poynting, o vetor de deslocamento normalizado possui na camada de revestimento aproximadamente 50 % de amplitude em relação ao seu máximo que está localizado no revestimento, indicando que mesmo que a energia está mais concentrada no metal, a atenuação ainda assim pode ser considerada alta.

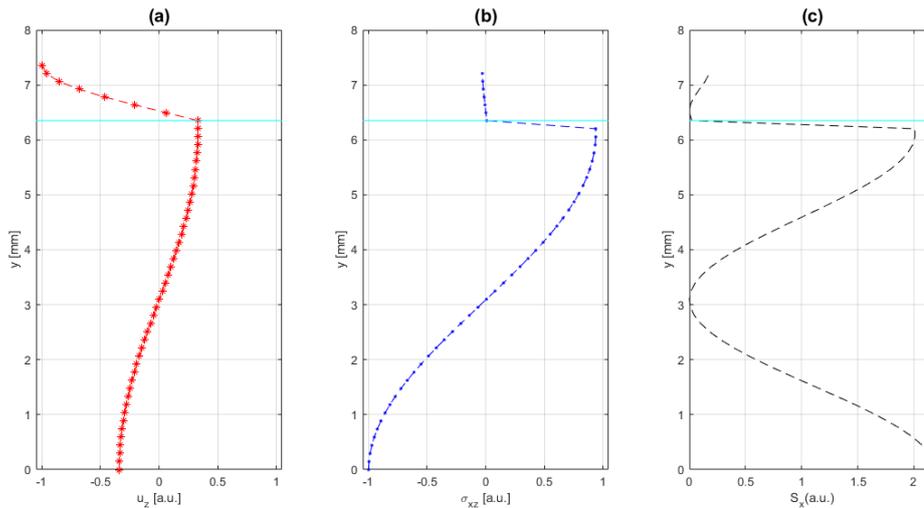


Figura 3.25: Perfis do modo em 285 kHz com comprimento de onda de 25 mm para uma espessura de revestimento de 1.0 mm, com atenuação de 100 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento.

Ao analisar em $II(b)$, conforme visto na Fig. 3.20, há um afastamento do primeiro modo do revestimento, acarretando uma redução do valor de atenuação, nesse caso para em torno de 20 dB/m. Tal comportamento é confirmado pelos perfis do modo vistos na Fig. 3.26. Como se pode ver no vetor de Poynting, quase não há energia na camada de revestimento, além disso o vetor de deslocamento possui na camada metálica intensidade próximo do máximo.

Para $II(c)$, a atenuação volta a aumentar conforme visto na Fig. 3.20, pois a

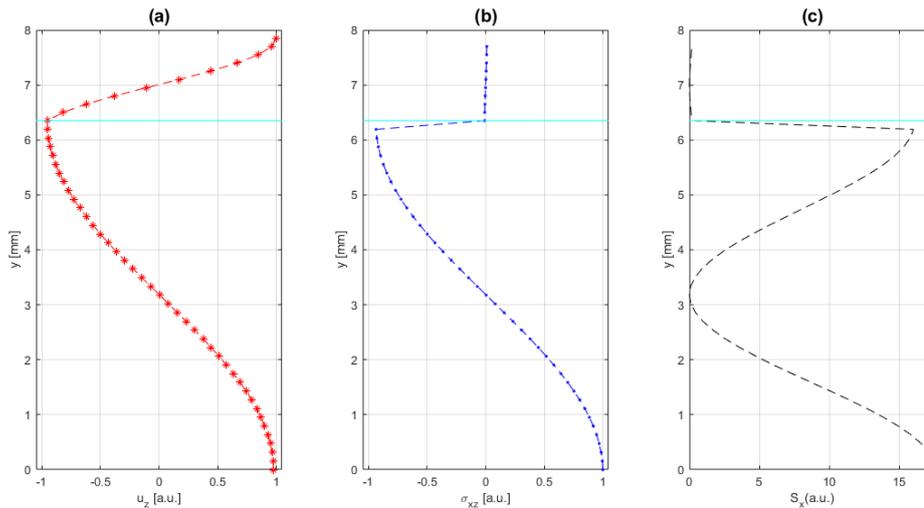


Figura 3.26: Perfis do modo em 285 kHz com comprimento de onda de 25 mm para uma espessura de revestimento de 1.5 mm, com atenuação de 20 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento.

região de operação começa a interferir com o segundo modo do revestimento que possui atenuação maior, em torno de 25 dB/m. Os perfis desse modo, vistos na Fig. 3.27, confirmam tal comportamento. Como se pode ver no vetor de deslocamento, a intensidade diminuiu em módulo em relação ao caso anterior, e na camada de revestimento é confirmado que o segundo modo do revestimento está sendo excitado, e a energia, vista pelo vetor de Poynting, está concentrada em sua maior parte na camada de aço.

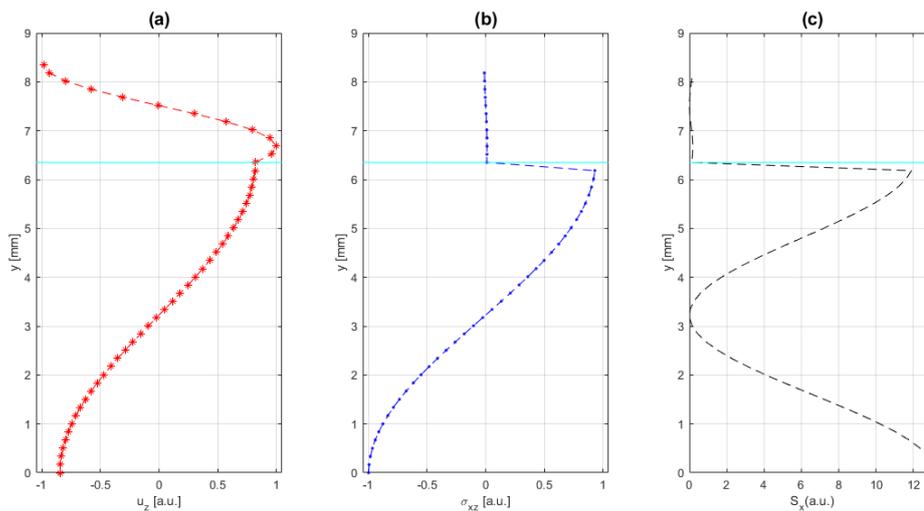


Figura 3.27: Perfis do modo em 285 kHz com comprimento de onda de 25 mm para uma espessura de revestimento de 2.0 mm, com atenuação de 25 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento.

Em $II(d)$ tem-se um caso diferente, como se pode ver na Fig. 3.20, neste ponto de operação há uma interferência entre o modo quasi-SH1 do aço e o segundo modo do revestimento, o que implica em um grande aumento de atenuação, em torno de 200 dB/m. Tal comportamento é confirmado pelos perfis do modo vistos na Fig. 3.28, é possível ver a intensidade do vetor de deslocamento se aproxima de zero e a energia, mostrada no vetor de Poynting, possui alta intensidade no revestimento justificando a alta atenuação desse modo.

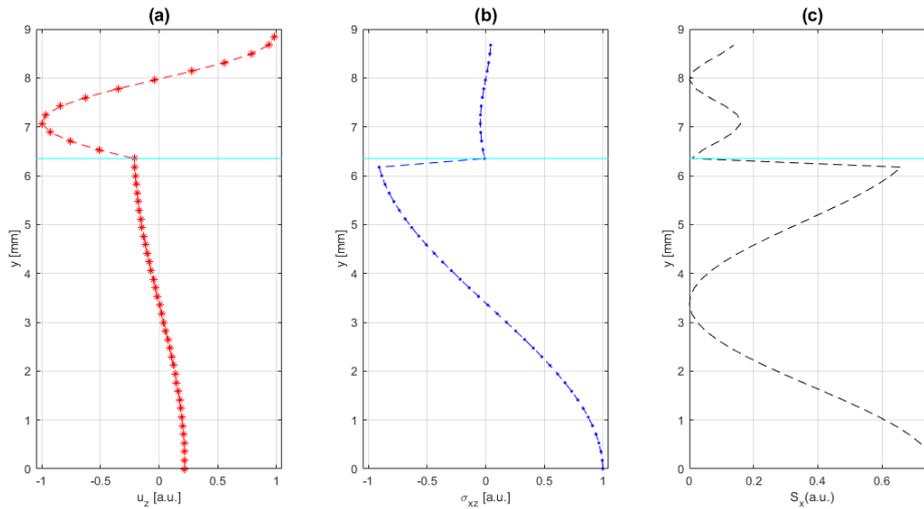


Figura 3.28: Perfis do modo em 285 kHz com comprimento de onda de 25 mm para uma espessura de revestimento de 2.5 mm, com atenuação de 200 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento.

A Tab. 3.8 resume a atenuação de desse modo para as diferentes camadas de espessura, mostrando que a proximidade dos modos do revestimento para 1.0 mm e 2.5mm de espessura aumentam o valor de atenuação.

Espessura do revestimento (mm)	Atenuação (dB/m)
1.0	99.085
1.5	18.504
2.0	22.915
2.5	199.299

Tabela 3.8: Atenuação dos modos do metal com 25 mm de comprimento de onda em 285 kHz para diferentes espessuras da camada de polietileno.

A seguir, foi analisado os modos para comprimento de onda de 20 mm.

3.3.2.3 20 mm

Foi analisado também para 20 mm de comprimento de onda, com o objetivo também de continuar a explorar análises em maiores frequências. Foram estudados o modo quasi-SH0, excitado em 160 kHz, e o modo quasi-SH1, excitado em 300 kHz,

para as diferentes espessuras. Os pontos de operação *III* e *IV*, respectivos aos modos quasi-SH0 e quasi-SH1 podem ser vistos na Fig. 3.29.

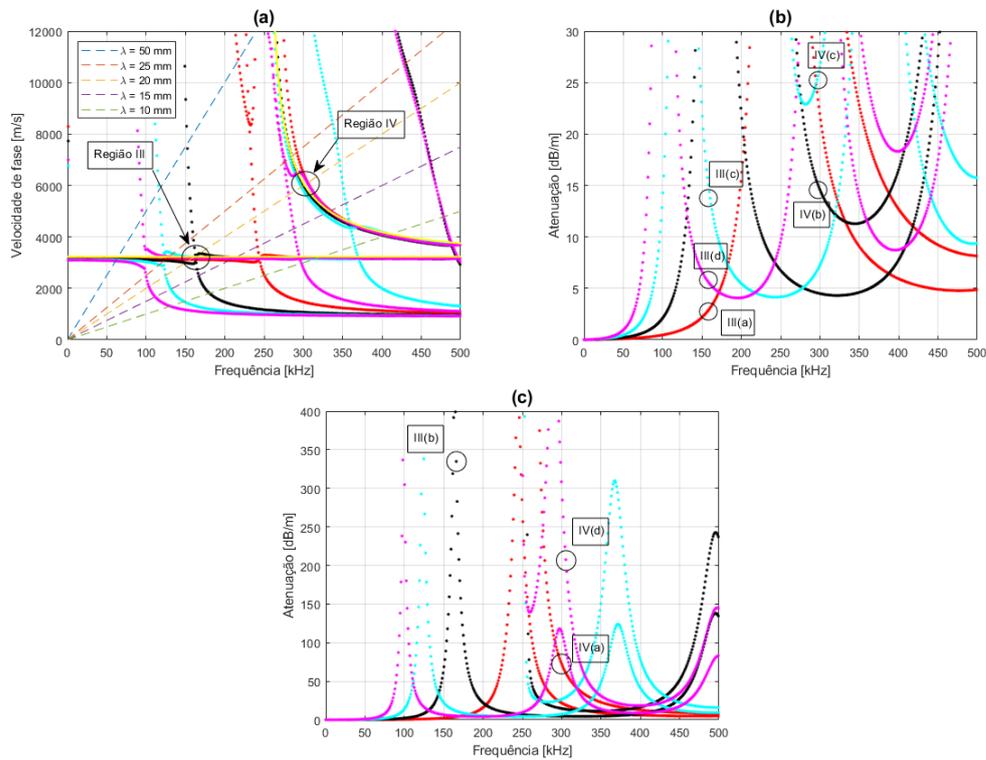


Figura 3.29: Curvas de dispersão semelhantes a Fig. 3.5 com adição das regiões de operação em 20 mm a serem estudadas. Em (a) temos a curva de velocidade de fase, onde as linhas tracejadas mostram a relação entre frequência e velocidade para diferentes comprimentos de onda, a saber, 1.0 mm, 1.5 mm, 2.0 mm e 2.5 mm. Em (b) e (c) tem-se as curvas de atenuação.

Em *III(a)*, é possível notar na Fig. 3.29 que a atenuação é baixa, em torno de 2.5 dB/m, pois a distância do ponto de operação ao primeiro modo do revestimento é considerada grande. Essa baixa atenuação pode ser compreendida pelos seus perfis do modo vistos na Fig. 3.30. Observe-se que o vetor de Poynting indica que quase não há energia no seu revestimento e a mesma está concentrada em sua maior parte na camada de aço.

Já para *III(b)* tem-se uma situação completamente diferente. Neste novo caso, o modo quasi-SH0 do metal e o primeiro modo do revestimento se encontram nesta região, como se pode ver na Fig. 3.29. Implicando em uma alta atenuação em torno de 335 dB/m. Neste caso, devido a alta atenuação, para essa espessura de revestimento, tal ponto de operação torna-se inviável para análise de defeitos. Esse comportamento é confirmado pelos perfis do modo vistos na Fig. 3.31, donde se tem que o vetor de deslocamento é muito menor na camada metálica do que no revestimento, assim como no vetor de Poynting, onde quase toda a energia está concentrada no revestimento.

Já em *III(c)* o cenário volta a se parecer com *III(a)*. Agora o primeiro modo do revestimento encontra-se levemente afastado, diferentemente do caso anterior, como se pode ver na Fig. 3.29. Onde na região de operação os modos da camada de aço e do revestimento se encontravam, o aumento da espessura do revestimento fez com que o primeiro modo do revestimento fique afastado do ponto de operação, isso

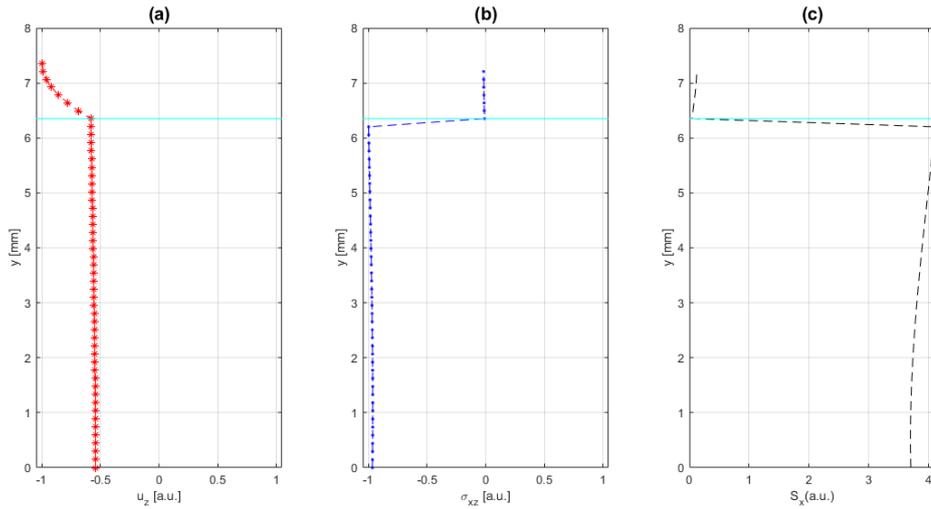


Figura 3.30: Perfis do modo em 160 kHz com comprimento de onda de 20 mm para uma espessura de revestimento de 1.0 mm, com atenuação de 2.5 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento.

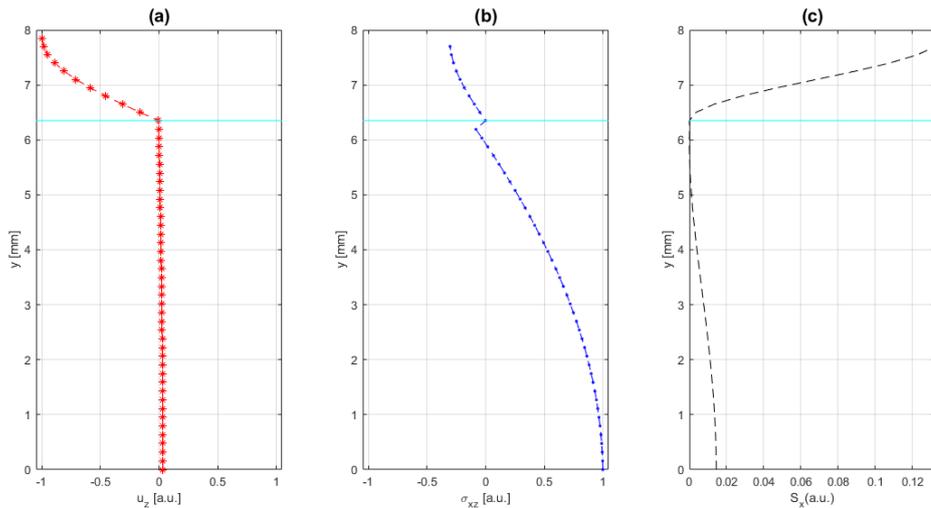


Figura 3.31: Perfis do modo em 160 kHz com comprimento de onda de 20 mm para uma espessura de revestimento de 1.5 mm, com atenuação de 335 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento.

permitiu uma queda no valor de atenuação, nesse caso em torno de 15 dB/m. Tal comportamento também pode ser visto pelos seus perfis, donde quase toda energia, representada pelo vetor de Poynting, encontra-se na camada de aço. Tais perfis de modo podem ser vistos em Fig. 3.32.

Em *III(d)*, devido ao aumento novamente da espessura, há um novo afastamento dos modos, ocasionando uma nova diminuição de atenuação. Neste caso, a atenuação está em torno de 5.5 dB/m. É válido ressaltar que nessa região e na

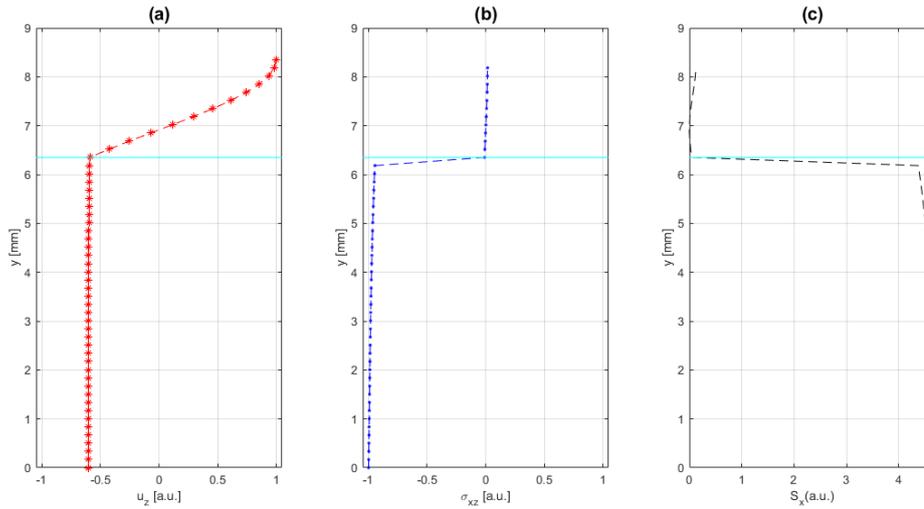


Figura 3.32: Perfis do modo em 160 kHz com comprimento de onda de 20 mm para uma espessura de revestimento de 2.0 mm, com atenuação de 15 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento.

outra foram obtidas atenuações menores que em *III(b)*, mostrando aumentar a camada de espessura, não significa aumentar a atenuação para um determinado ponto de operação. Mais uma vez os perfis desse modo visto na Fig. 3.33 confirmam tal comportamento, é possível ver por meio do vetor de Poynting que a energia está em sua maior parte concentrada na camada de aço.

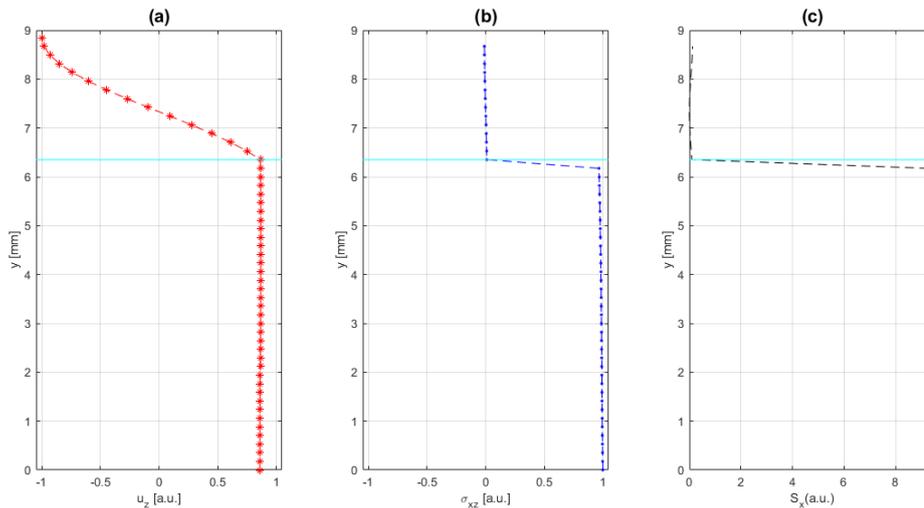


Figura 3.33: Perfis do modo em 160 kHz com comprimento de onda de 20 mm para uma espessura de revestimento de 2.5 mm, com atenuação de 5.5 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento.

A Tab. 3.9 denota a atenuação de desse modo para as diferentes camadas de espessura, mostrando que a proximidade do primeiro modo do revestimento para o

modo excitado na camada de 1.5 mm aumenta consideravelmente a atenuação.

Espessura do revestimento (mm)	Atenuação (dB/m)
1.0	2.664
1.5	334.753
2.0	13.757
2.5	5.492

Tabela 3.9: Atenuação dos modos do metal com 20 mm de comprimento de onda em 160 kHz para diferentes espessuras da camada de polietileno.

Foi analisado também o modo quasi-SH1 para 20 mm de comprimento de onda. Tal região, chamada de *IV*, pode ser excitada em aproximadamente 300 kHz.

Em *IV(a)* temos uma atenuação mais alta em torno de 60 dB/m devido à proximidade do primeiro modo do revestimento, tal fato pode ser visto em Fig. 3.29. Mais uma vez o comportamento pode ser analisado também pelos seus perfis de modo, vistos em Fig. 3.34. Analisando o vetor de Poynting, é possível ver que a energia ainda se concentra em sua maior parte no revestimento, já o vetor de deslocamento mostra que sua amplitude no revestimento é relativamente baixa em relação aos casos com menor atenuação, como por exemplo em *III(a)*.

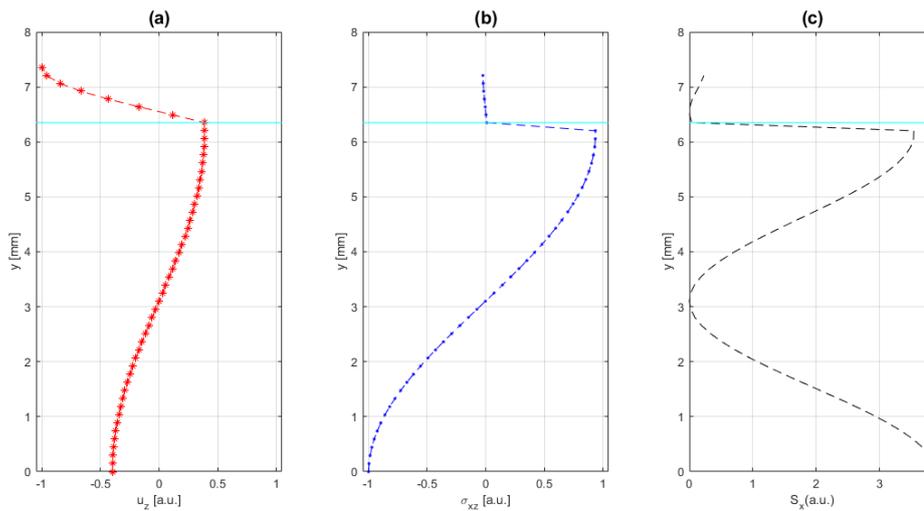


Figura 3.34: Perfis do modo em 300 kHz com comprimento de onda de 20 mm para uma espessura de revestimento de 1.0 mm, com atenuação de 60 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θ do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento.

Já para *IV(b)*, o primeiro modo do revestimento afastou-se do modo quasi-SH1 da camada metálica. E, como pode ser visto em Fig. 3.29, a atenuação diminuiu em relação ao caso anterior para em torno de 15 dB/m, esse comportamento também é confirmado pelos perfis do modo vistos na Fig. 3.35. É possível notar que a energia, denotada pelo vetor de Poynting, está em sua maior parte na camada de aço e quase não há energia no revestimento.

Em *IV(c)*, tem-se um aumento da atenuação em relação ao caso anterior, próximo à 25 dB/m, pois tal ponto de operação é relativamente próximo ao segundo

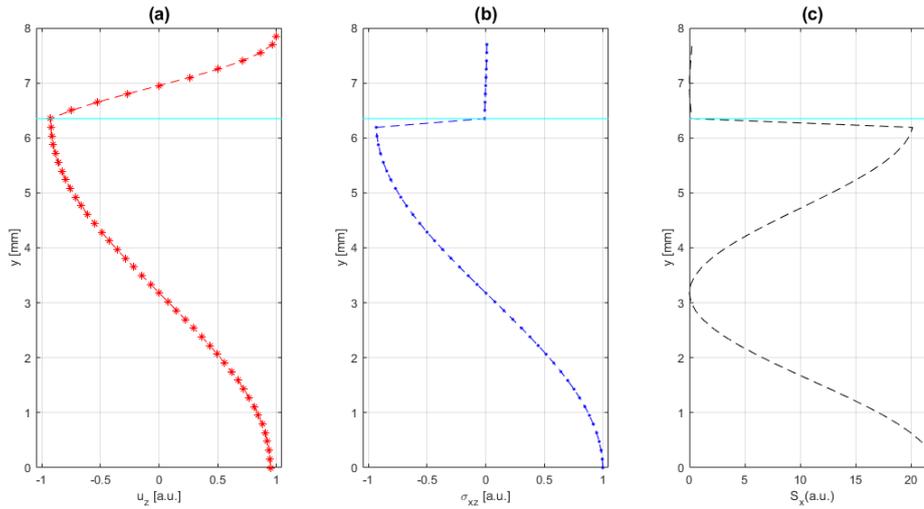


Figura 3.35: Perfis do modo em 300 kHz com comprimento de onda de 20 mm para uma espessura de revestimento de 1.5 mm, com atenuação de 15 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento.

modo do revestimento, como se pode ver na Fig. 3.29. O comportamento também pode ser visto pelos perfis desse modo vistos na Fig. 3.36. Pode-se ver no vetor de deslocamento que o modo excitado é semelhante ao segundo modo do revestimento, mas ainda assim, como se pode ver, a energia mostrada pelo vetor de Poynting permanece em sua maior parte no aço.

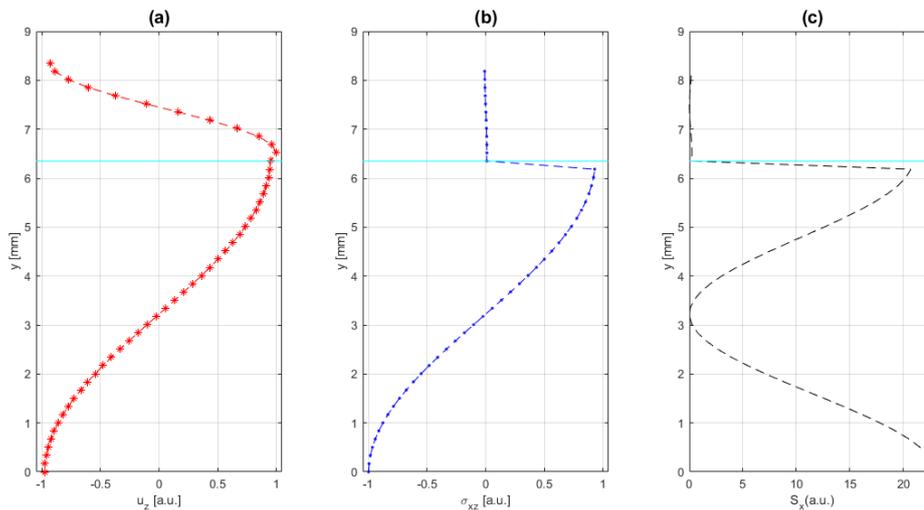


Figura 3.36: Perfis do modo em 300 kHz com comprimento de onda de 20 mm para uma espessura de revestimento de 2.0 mm, com atenuação de 25 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento.

Já em $IV(d)$, tem-se um caso em que o segundo modo do revestimento está muito próximo da região de excitação, e tal modo do revestimento possui maior

atenuação mesmo que a energia desse modo pertença em sua maior parte na camada metálica. Nesse caso a atenuação está em torno de 210 dB/m. Mais uma vez, tal comportamento é confirmado pelos seus perfis vistos na Fig. 3.37, onde o vetor de deslocamento mostra claramente que a propagação no revestimento é semelhante ao seu segundo modo, além da energia, dada pelo vetor de Poynting, estar mais concentrada na camada metálica em relação ao revestimento.

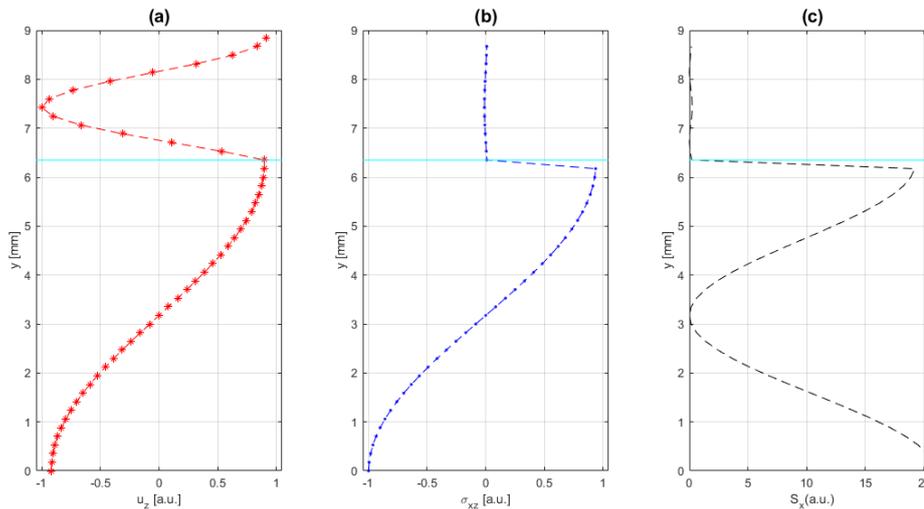


Figura 3.37: Perfis do modo em 300 kHz com comprimento de onda de 20 mm para uma espessura de revestimento de 2.5 mm, com atenuação de 210 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento.

A Tab. 3.10 mostra a atenuação de desse modo para as diferentes camadas de espessura, onde para as espessuras de 1.0 mm e 2.5 mm possuem atenuações maiores devido a proximidades de modos do revestimento.

Espessura do revestimento (mm)	Atenuação (dB/m)
1.0	60.682
1.5	14.428
2.0	25.652
2.5	207.509

Tabela 3.10: Atenuação dos modos do metal com 20 mm de comprimento de onda em 300 kHz para diferentes espessuras da camada de polietileno.

A seguir, foi analisado os modos para comprimento de onda de 15 mm.

3.3.2.4 15 mm

A seguir, foi analisado para 15 mm de comprimento de onda, mantendo o objetivo de explorar análises em maiores frequências. Foram estudados o modo quasi-SH0, excitado em 210 kHz, e o modo quasi-SH1, excitado em 330 kHz, para

as diferentes espessuras. Os pontos de operação V e VI , respectivos aos modos quasi-SH0 e quasi-SH1 podem ser vistos na Fig. 3.38.

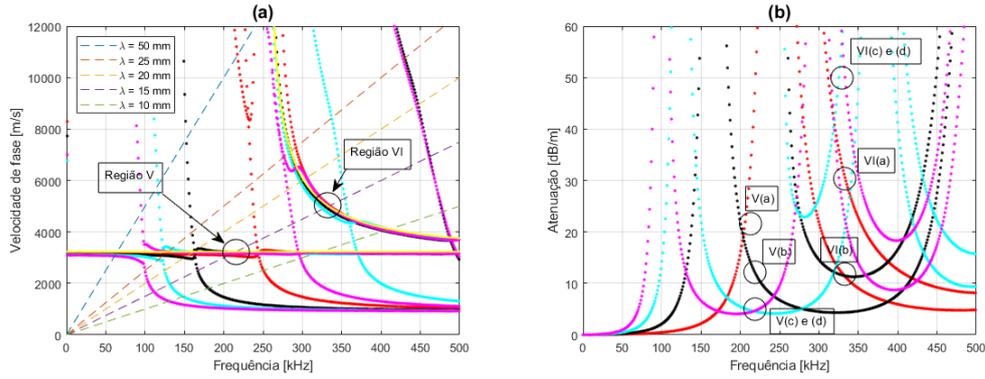


Figura 3.38: Curvas de dispersão semelhantes a Fig. 3.5 com adição da região de operação em 15 mm a ser estudada. Em (a) temos a curva de velocidade de fase, onde as linhas tracejadas mostram a relação entre frequência e velocidade para diferentes comprimentos de onda, a saber, 1.0 mm, 1.5 mm, 2.0 mm e 2.5 mm. Em (b) tem-se as curvas de atenuação.

Ao analisar $V(a)$ tem-se uma atenuação, vista na Fig. 3.38, em torno de 20 dB/m, devido à proximidade do primeiro modo do revestimento, além disso espera-se encontrar valores mais baixos de atenuação devido ao fato de excitação de um modo quasi-SH0 na camada metálica em uma região monomodo. Tal comportamento também pode ser visto pelos perfis desse modo visto na Fig. 3.39, onde pelo vetor de Poynting pode-se ver que quase toda energia se concentra na camada metálica.

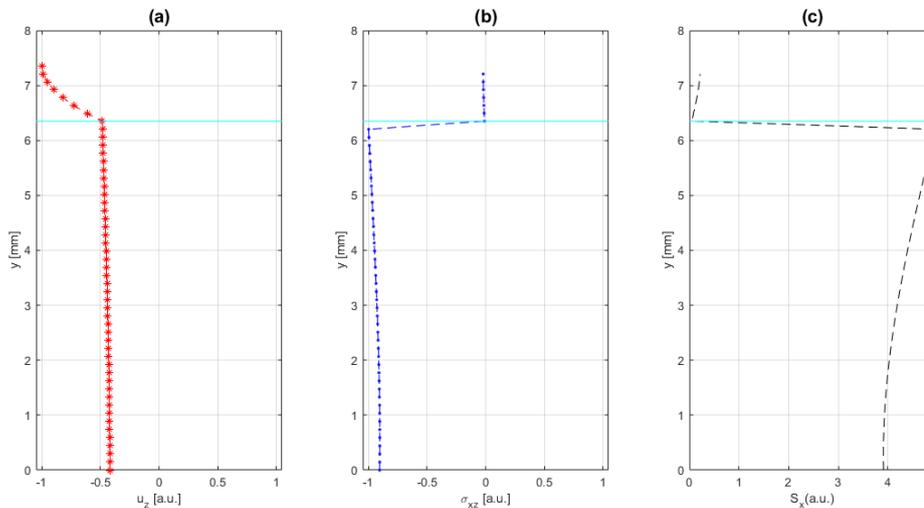


Figura 3.39: Perfis do modo em 210 kHz com comprimento de onda de 15 mm para uma espessura de revestimento de 1.0 mm, com atenuação de 20 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento.

Em $V(b)$ tem-se um afastamento dos modos do revestimento, o que implica em uma redução do valor de atenuação, como pode ser visto em Fig. 3.38, tem-se que a atenuação está em torno de 15 dB/m, confirmando que o aumento de atenuação está diretamente conectado a excitação de modos do revestimento. Tal comportamento

também é confirmado pelos seus perfis vistos em Fig. 3.40, onde ainda é possível ver no vetor de Poynting uma leve quantidade de energia propagando no revestimento, mas predominantemente na camada de aço.

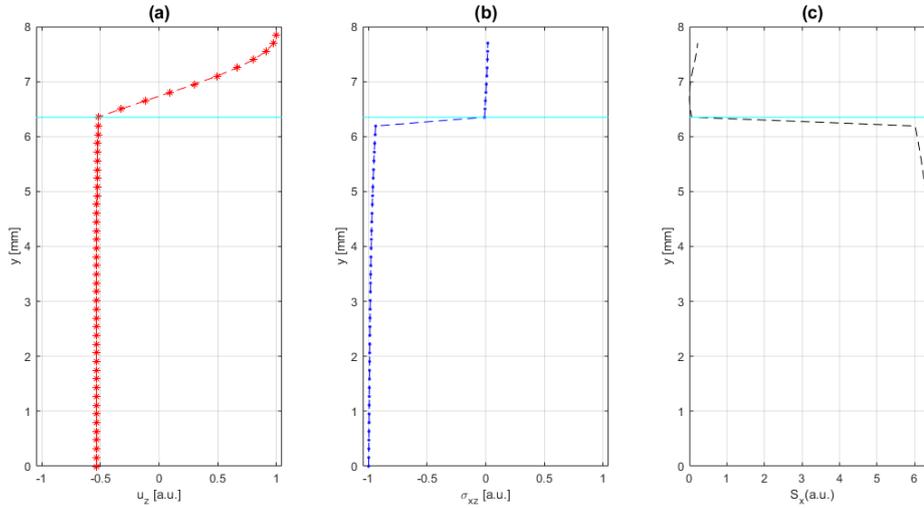


Figura 3.40: Perfis do modo em 210 kHz com comprimento de onda de 15 mm para uma espessura de revestimento de 1.5 mm, com atenuação de 15 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento.

Como de acordo com Fig. 3.38, as regiões $V(c)$ e $V(d)$ possuem valores próximos de atenuação, em torno de 4.5 dB/m, as mesmas foram analisadas juntas. Isso é devido a uma maior distância em relação aos modos do revestimento, o que implica em baixa atenuação para ambos os casos. Os perfis dos modos confirmam tudo isso, para $V(c)$ pode-se ver em Fig. 3.41 que, como indica no vetor de Poynting, quase não há energia no revestimento, explicando a baixa atenuação. Já em $V(d)$, como mostra o seu perfil visto em Fig. 3.42, tem-se um cenário muito parecido onde a energia, dada pelo vetor de Poynting, está em sua maior parte no aço e próximo a zero no revestimento.

A Tab. 3.11 denota a atenuação de desse modo para as diferentes camadas de espessura, mostrando que esse modo não se encontra próximo aos modos do revestimento ocasionado baixa atenuação para as espessuras estudadas.

Espessura do revestimento (mm)	Atenuação (dB/m)
1.0	20.630
1.5	13.719
2.0	4.798
2.5	4.303

Tabela 3.11: Atenuação dos modos do metal com 15 mm de comprimento de onda em 210 kHz para diferentes espessuras da camada de polietileno.

Para 15mm de comprimento de onda, pode-se operar em maior frequência. Então, a região denominada VI foi estudada a seguir.

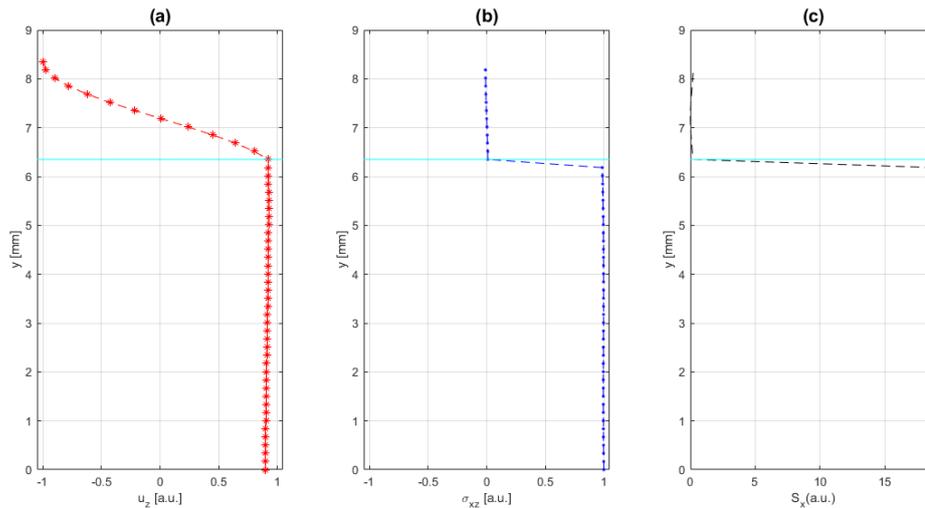


Figura 3.41: Perfis do modo em 210 kHz com comprimento de onda de 15 mm para uma espessura de revestimento de 2.0 mm, com atenuação de 4.5 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento.

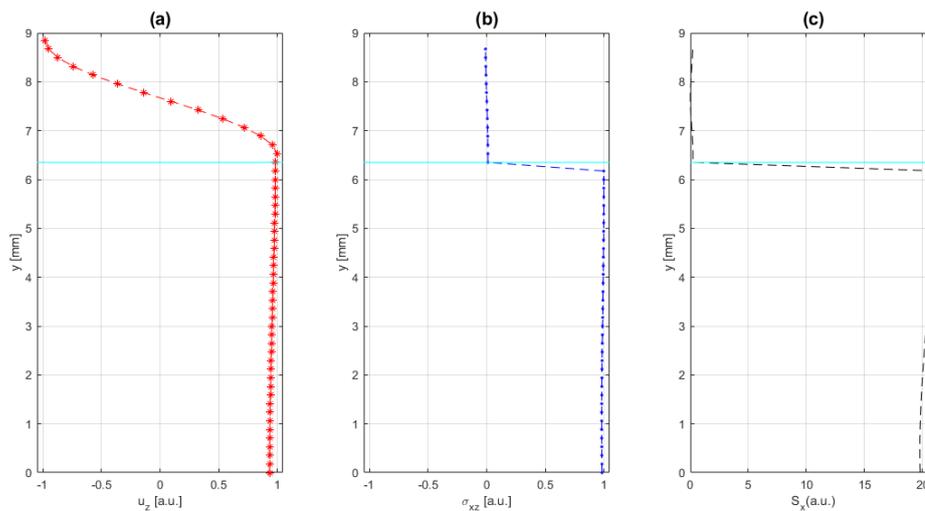


Figura 3.42: Perfis do modo em 210 kHz com comprimento de onda de 15 mm para uma espessura de revestimento de 2.5 mm, com atenuação de 4.5 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento.

Analisando em $VI(a)$, nota-se em Fig. 3.38 que tal modo possui atenuação em torno de 30 dB/m, isso ocorre devido à proximidade do primeiro modo do revestimento, além disso como o modo excitado na camada metálica é o quasi-SH1, a tendência é que as atenuações sejam maiores. Isso é confirmado pelos perfis do modo mostrados na Fig. 3.43, onde, mesmo que pouco perceptível, há um pouco de energia no revestimento vista no vetor de Poynting. Acarretando tal atenuação.

Em $VI(b)$ se tem um afastamento do primeiro modo do revestimento, como

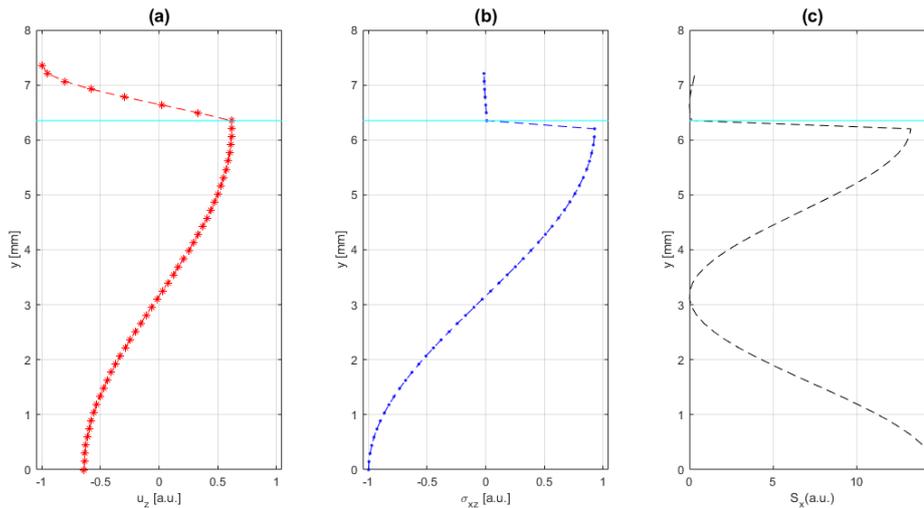


Figura 3.43: Perfis do modo em 330 kHz com comprimento de onda de 15 mm para uma espessura de revestimento de 1.0 mm, com atenuação de 30 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento.

visto na Fig. 3.38. Então é de se esperar que a atenuação diminua, o que de fato ocorre, pois a atenuação neste caso é de aproximadamente 10 dB/m. Tal comportamento também é confirmado pelos seus perfis vistos em Fig. 3.44, onde quase não há energia, dada pelo vetor de Poynting, no revestimento e a mesma se concentra em sua maior parte na camada de aço.

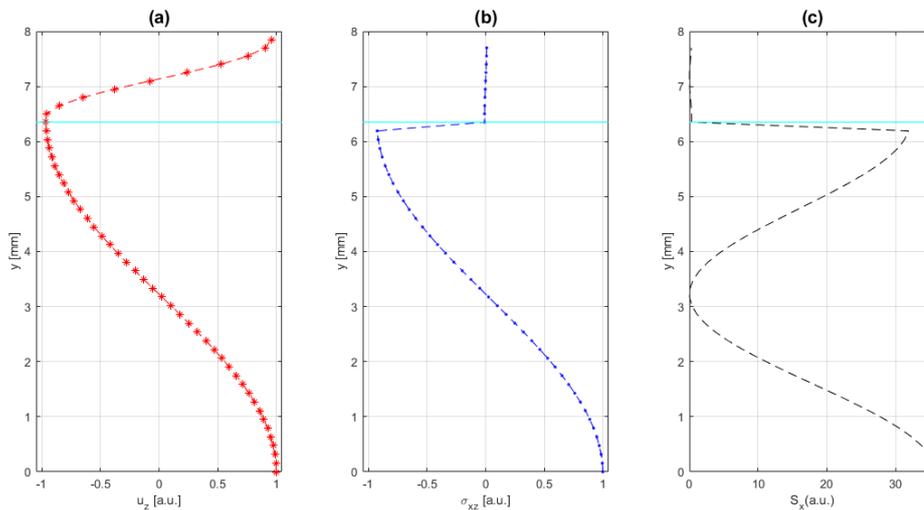


Figura 3.44: Perfis do modo em 330 kHz com comprimento de onda de 15 mm para uma espessura de revestimento de 1.5 mm, com atenuação de 10 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento.

$VI(c)$ e $VI(d)$ são casos semelhantes, uma vez que ambos excitam o segundo modo do revestimento, o que causa aumento de atenuação. Em ambos os casos a

atenuação está em torno de 50dB/m. Os perfis de modo, vistos respectivamente na Fig. 3.45 e Fig. 3.46, confirmam isso. Ambos os vetores de deslocamento confirmam a excitação do modo superior do revestimento, o que ocasionou o aumento de atenuação.

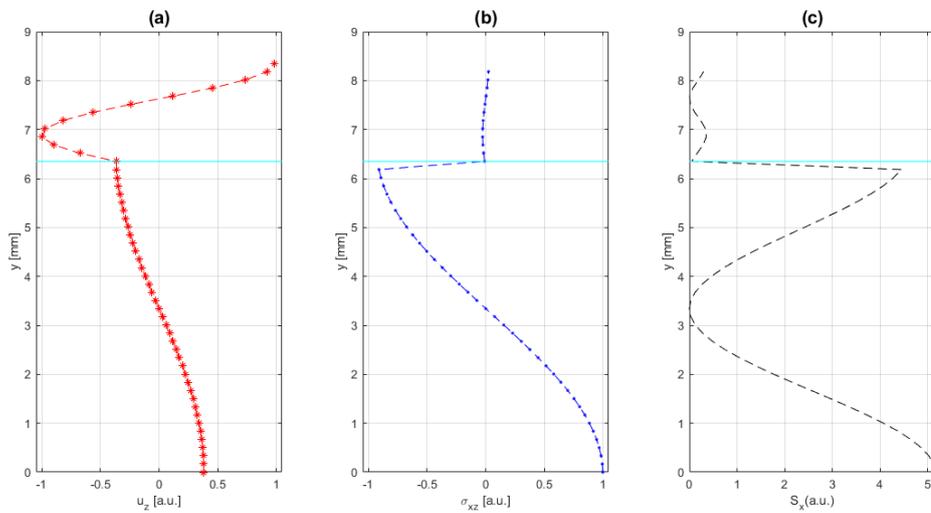


Figura 3.45: Perfis do modo em 330 kHz com comprimento de onda de 15 mm para uma espessura de revestimento de 2.0 mm, com atenuação de 50 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento.

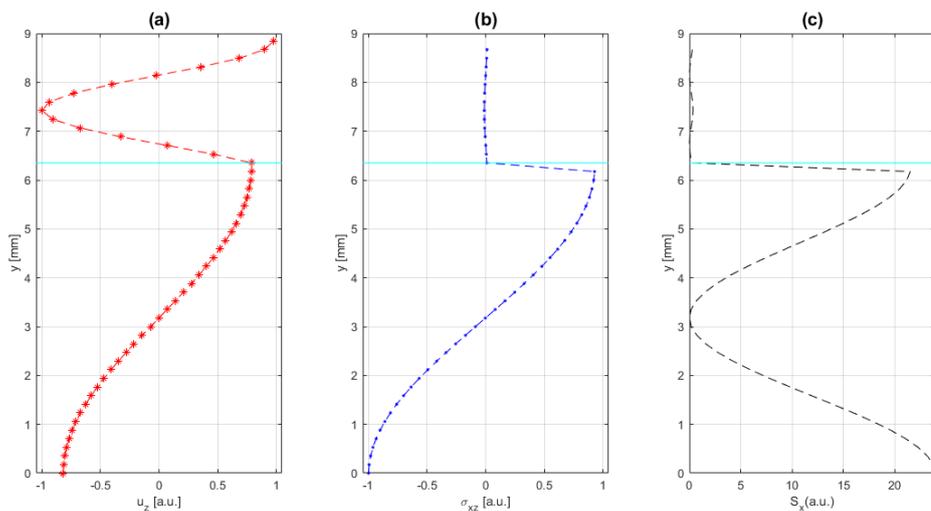


Figura 3.46: Perfis do modo em 330 kHz com comprimento de onda de 15 mm para uma espessura de revestimento de 2.5 mm, com atenuação de 50 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento.

A Tab. 3.12 mostra a atenuação de desse modo para as diferentes camadas de espessura, onde para as espessuras de 1.0 mm e 2.5 mm possuem atenuações maiores devido a proximidades de modos do revestimento.

A seguir, foi analisado os modos para comprimento de onda de 10 mm.

Espessura do revestimento (mm)	Atenuação (dB/m)
1.0	60.682
1.5	14.428
2.0	25.652
2.5	207.509

Tabela 3.12: Atenuação dos modos do metal com 15 mm de comprimento de onda em 330 kHz para diferentes espessuras da camada de polietileno.

3.3.2.5 10 mm

Por fim, foi analisado também para 10mm de comprimento de onda. Assim como nos casos anteriores, foram estudados o modo quasi-SH0, excitado em 310 kHz, e o modo quasi-SH1, excitado em 400 kHz, para as diferentes espessuras. Os pontos de operação *VII* e *VIII*, respectivos aos modos quasi-SH0 e quasi-SH1 podem ser vistos na Fig. 3.47.

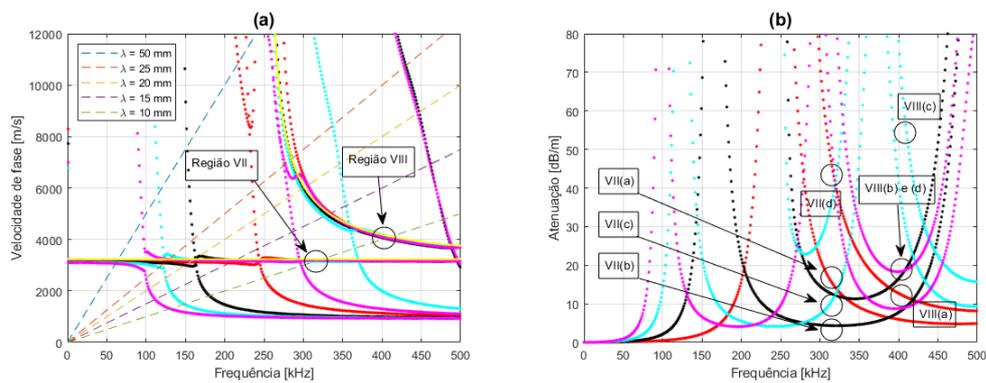


Figura 3.47: Curvas de dispersão semelhantes a Fig. 3.5 com adição da região de operação em 10 mm a ser estudada. Em (a) temos a curva de velocidade de fase, onde as linhas tracejadas mostram a relação entre frequência e velocidade para diferentes comprimentos de onda, a saber, 1.0 mm, 1.5 mm, 2.0 mm e 2.5 mm. Em (b) tem-se as curvas de atenuação.

Primeiramente, foi analisado a região *VII(a)* e como pode ser visto em Fig. 3.47, a atenuação está em torno de 15 dB/m devido à proximidade do primeiro modo do revestimento. Isso pode ser visto também pelos perfis na Fig.3.48, onde ao observar atentamente para o vetor de Poynting, tem-se pouca da energia no revestimento. Como a região excitada se localiza em quasi-SH0, a atenuação não é considerada grande.

Em *VII(b)* há um maior afastamento do primeiro modo do revestimento, causando uma baixa atenuação, em torno de 4.5 dB/m, tornando um excelente ponto de operação para testes não destrutivos, dado que possui alta frequência. Tal comportamento é confirmado pelos perfis vistos em Fig. 3.49. Como se pode ver no vetor de Poynting, quase não há energia no revestimento, mostrando que de fato há baixa atenuação.

Para *VII(c)* tem-se um cenário parecido com *VII(a)*, devido à proximidade do segundo modo do revestimento, a atenuação aumentou para aproximadamente 10 dB/m. Isso também é confirmado pelos perfis do modo visto em Fig. 3.50, onde

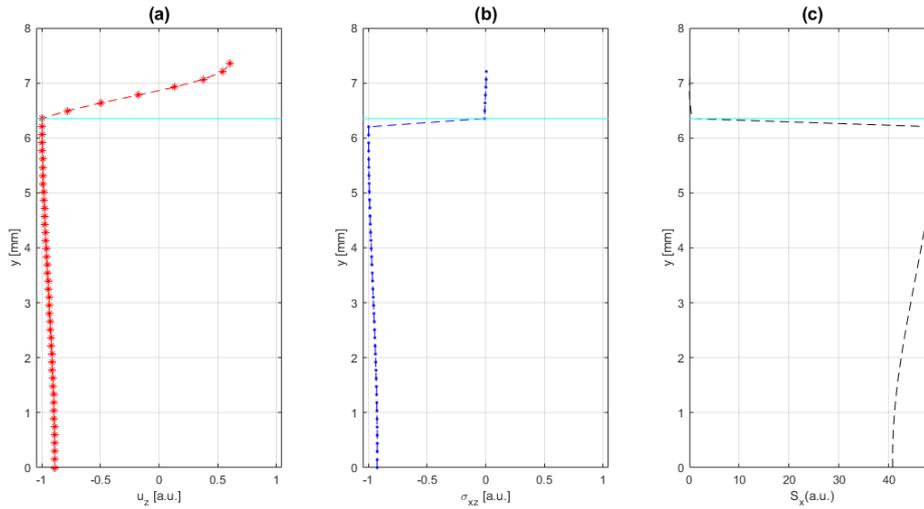


Figura 3.48: Perfis do modo em 310 kHz com comprimento de onda de 10 mm para uma espessura de revestimento de 1.0 mm, com atenuação de 15 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento.

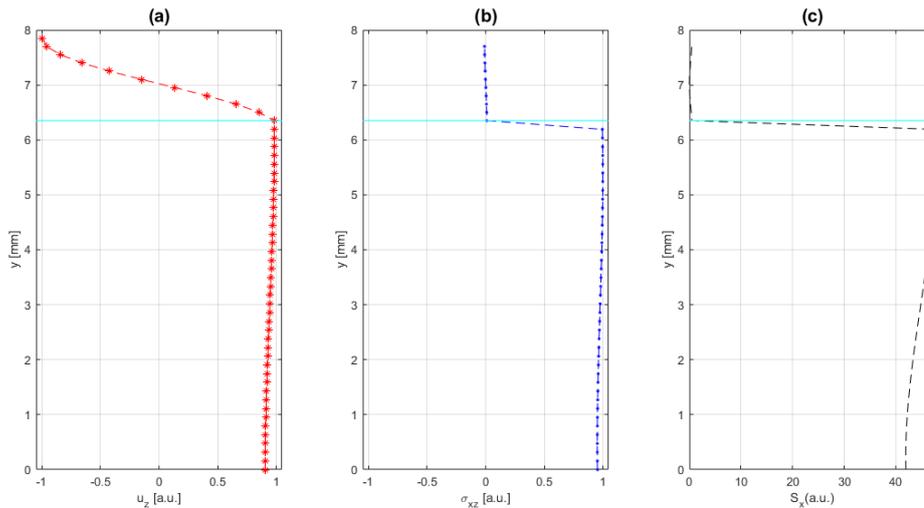


Figura 3.49: Perfis do modo em 310 kHz com comprimento de onda de 10 mm para uma espessura de revestimento de 1.5 mm, com atenuação de 4.5 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento.

analisando o vetor de Poynting tem-se que a energia se encontra em sua maior parte no aço e pouco no revestimento.

Para *VII(d)*, devido a aproximação do segundo modo do revestimento, vista na Fig. 3.47, a atenuação aumenta. Neste caso para em torno de 45 dB/m, confirmando que cruzamento entre modos do metal e do revestimento aumentam consideravelmente a atenuação. Isso também é visto nos perfis analisados na Fig. 3.51, onde no vetor de deslocamento se pode ver que o modo gerado no revestimento é o seu segundo, e no

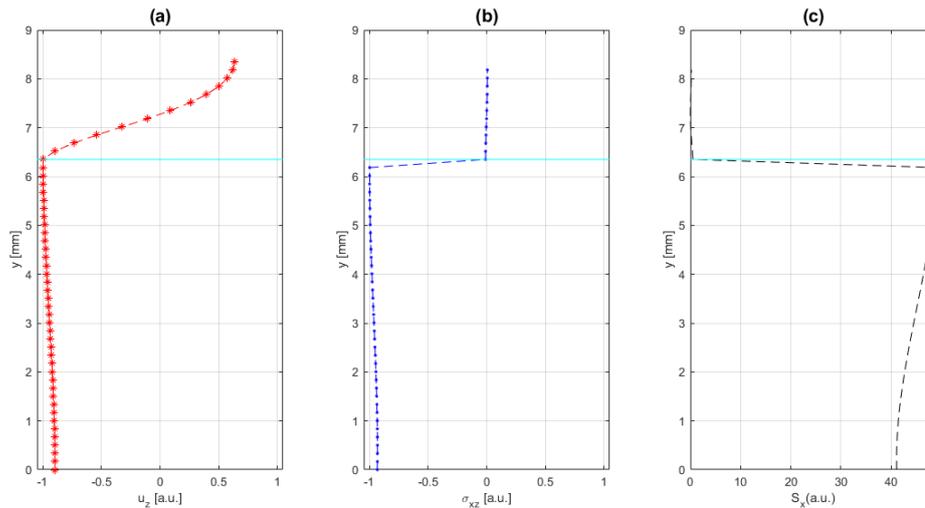


Figura 3.50: Perfis do modo em 310 kHz com comprimento de onda de 10 mm para uma espessura de revestimento de 2.0 mm, com atenuação de 10 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento.

vetor de Poynting, é possível notar que parte da energia se encontra no revestimento, aumentando a atenuação.

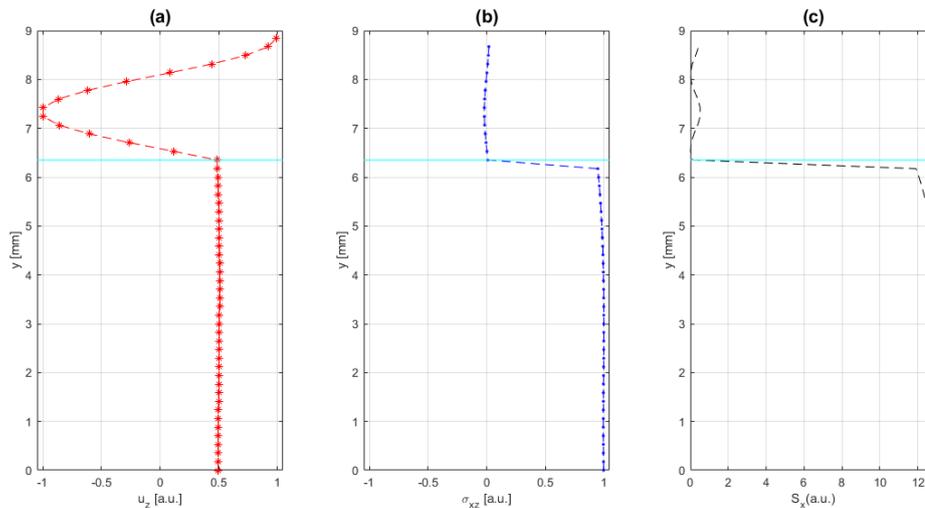


Figura 3.51: Perfis do modo em 310 kHz com comprimento de onda de 10 mm para uma espessura de revestimento de 2.5 mm, com atenuação de 45 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento.

A Tab. 3.13 mostra a atenuação de desse modo para as diferentes camadas de espessura, onde apenas para a espessura de 2.5 mm se tem maior atenuação em relação aos demais casos.

Foi estudado também o modo quasi-SH1 para 10 mm de comprimento de onda. Tal região, denominada *VIII*, pode ser excitada em aproximadamente 400 kHz.

Espessura do revestimento (mm)	Atenuação (dB/m)
1.0	14.449
1.5	4.322
2.0	10.807
2.5	42.090

Tabela 3.13: Atenuação dos modos do metal com 10 mm de comprimento de onda em 310 kHz para diferentes espessuras da camada de polietileno.

Em VIII(a), como se pode ver na Fig. 3.47, o primeiro modo do revestimento se encontra afastado da região de operação, resultando em uma baixa atenuação de aproximadamente 10 dB/m. Os perfis do modo, vistos na Fig. 3.52, denotam que toda a energia, dada pelo vetor de Poynting, está concentrada na camada de aço e quase não há energia no revestimento.

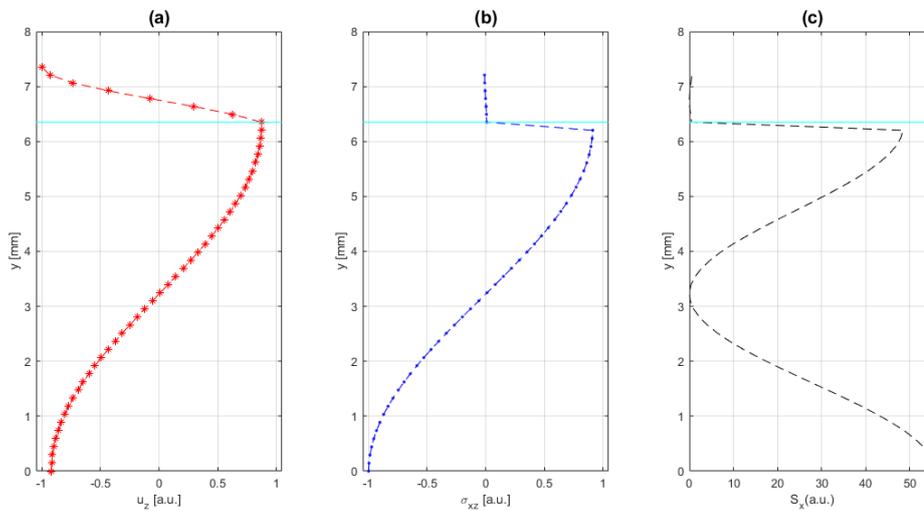


Figura 3.52: Perfis do modo em 400 kHz com comprimento de onda de 10 mm para uma espessura de revestimento de 1.0 mm, com atenuação de 10 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento.

Em VIII(b), como se pode ver na Fig. 3.47, o primeiro modo do revestimento se encontra mais afastado, porém há aproximação do segundo modo do revestimento. Resultando em um aumento de atenuação para aproximadamente 20 dB/m. Os perfis do modo, vistos na Fig. 3.53, denotam no vetor de deslocamento que o segundo modo do revestimento está sendo excitado, mas quase toda a energia, dada pelo vetor de Poynting, está concentrada na camada de aço não no revestimento.

Em VIII(c), como pode ser visto na Fig. 3.47, há uma nova aproximação do segundo modo do revestimento. Resultando em um maior aumento de atenuação para aproximadamente 55 dB/m. Os perfis do modo, vistos na Fig. 3.54, denotam no vetor de deslocamento que o segundo modo do revestimento está sendo excitado, e a energia, denotada pelo vetor de Poynting, está em sua maior parte na camada de aço, porém há energia considerável na camada de revestimento, causando aumento

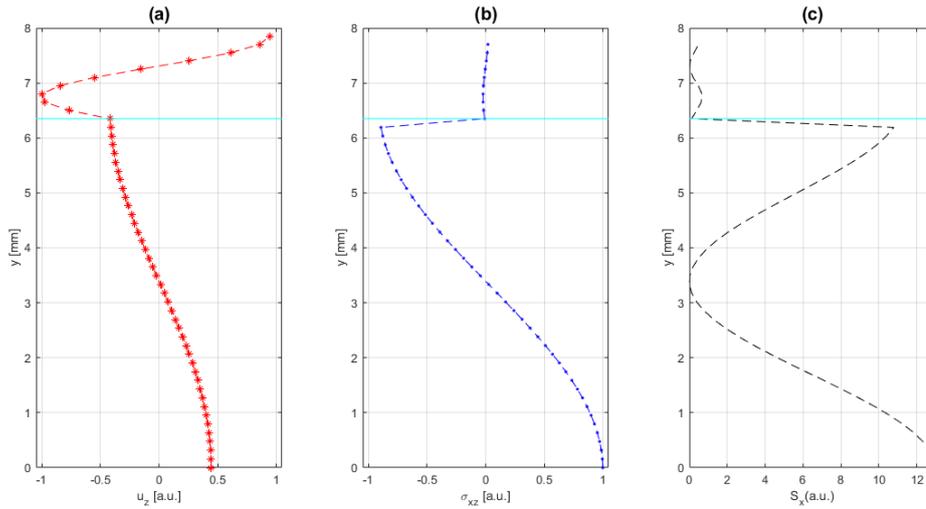


Figura 3.53: Perfis do modo em 400 kHz com comprimento de onda de 10 mm para uma espessura de revestimento de 1.5 mm, com atenuação de 20 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento.

na atenuação.

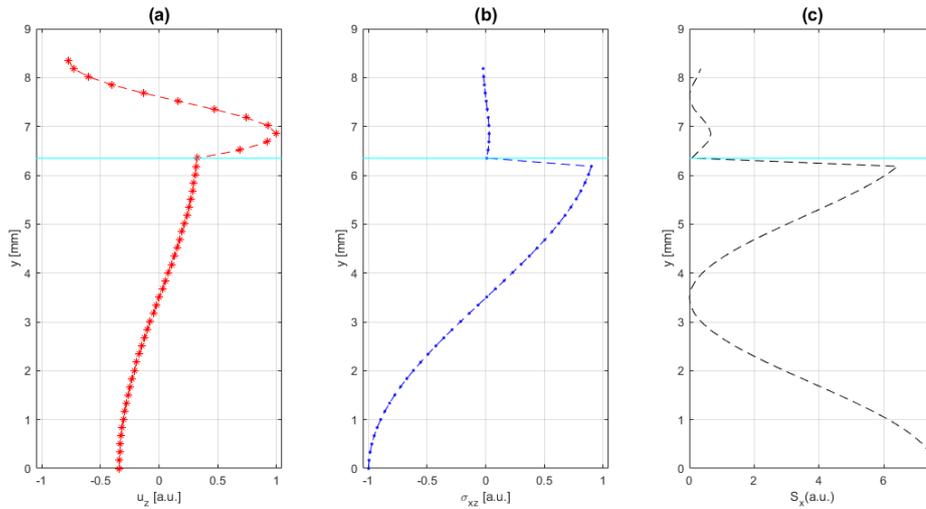


Figura 3.54: Perfis do modo em 400 kHz com comprimento de onda de 10 mm para uma espessura de revestimento de 2.0 mm, com atenuação de 55 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento.

Por fim em *VIII(c)*, como pode ser visto na Fig. 3.47, o segundo modo do revestimento encontra-se mais afastado da região de operação, acarretando uma diminuição da atenuação para em torno de 20 dB/m. Os perfis desse modo, vistos na Fig. 3.55, confirmam tal redução. A energia, vista através do vetor de Poynting, está concentrada em sua maior parte na camada metálica e quase não há energia no revestimento.

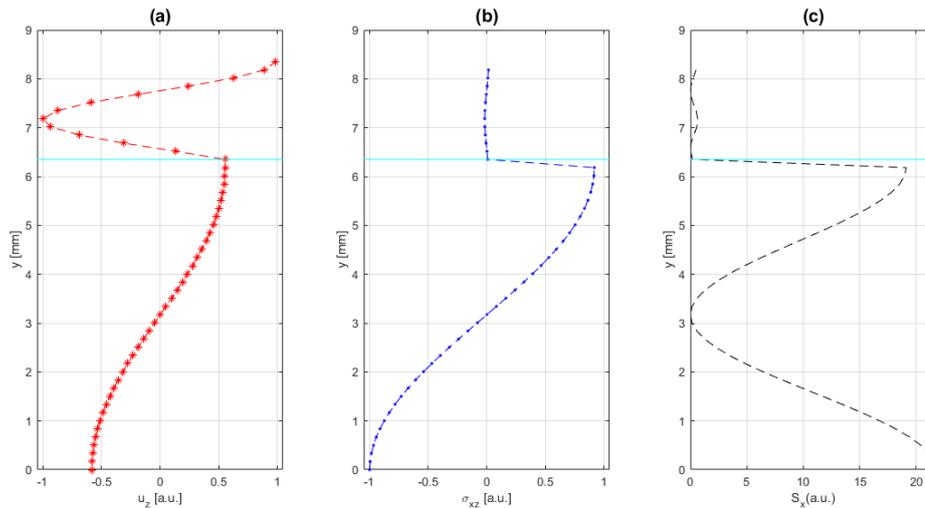


Figura 3.55: Perfis do modo em 400 kHz com comprimento de onda de 10 mm para uma espessura de revestimento de 2.5 mm, com atenuação de 20 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento.

A Tab. 3.14 denota a atenuação de desse modo para as diferentes camadas de espessura, onde apenas há alta atenuação para espessura de 2.0 mm.

Espessura do revestimento (mm)	Atenuação (dB/m)
1.0	11.908
1.5	17.665
2.0	54.343
2.5	18.510

Tabela 3.14: Atenuação dos modos do metal com 10 mm de comprimento de onda em 400 kHz para diferentes espessuras da camada de polietileno.

3.3.2.6 Conclusão

Por fim, foi analisado quais os melhores modos para as diferentes espessuras de revestimento, com o objetivo de escolher os modos que possuem menor atenuação. A Tab. 3.15 denota a atenuação de todos os modos estudados, onde é possível notar que o aumento de espessura, não necessariamente acarretará um aumento de atenuação, e que através dos estudos realizados nessa seção, a atenuação está diretamente relacionada a excitação dos modos do revestimento.

Percebe-se que para a espessura de 1.0 mm as regiões de menor atenuação foram 25 mm - 125 kHz (a), 20 mm - 160 kHz (a) e 10 mm - 400 kHz (a), para a espessura de 1.5 mm foram as regiões 25 mm - 125 kHz (b), 15 mm - 210 kHz (b) e 10 mm - 310 kHz (b), para espessura de 2.0 mm foram 20mm - 160 kHz (c), 15mm - 210 kHz (c) e 10mm - 310 kHz (c), e para espessura de 2.5 mm foram 25mm - 125 kHz (d), 20mm - 160 kHz (d) e 15mm - 210 kHz (d).

Ponto de operação	Atenuação (dB/m)
25 mm - 125 kHz (a)	0.985
25 mm - 125 kHz (b)	7.601
25 mm - 125 kHz (c)	82.164
25 mm - 125 kHz (d)	13.226
25 mm - 285 kHz (a)	99.085
25 mm - 285 kHz (b)	18.504
25 mm - 285 kHz (c)	22.915
25 mm - 285 kHz (d)	199.299
20 mm - 160 kHz (a)	2.664
20 mm - 160 kHz (b)	334.753
20 mm - 160 kHz (c)	13.757
20 mm - 160 kHz (d)	5.492
20 mm - 300 kHz (a)	60.682
20 mm - 300 kHz (b)	14.428
20 mm - 300 kHz (c)	25.652
20 mm - 300 kHz (d)	207.509
15 mm - 210 kHz (a)	20.630
15 mm - 210 kHz (b)	13.719
15 mm - 210 kHz (c)	4.798
15 mm - 210 kHz (d)	4.303
15 mm - 330 kHz (a)	29.890
15 mm - 330 kHz (b)	11.531
15 mm - 330 kHz (c)	52.022
15 mm - 330 kHz (d)	50.047
10 mm - 310 kHz (a)	14.449
10 mm - 310 kHz (b)	4.322
10 mm - 310 kHz (c)	10.807
10 mm - 310 kHz (d)	42.090
10 mm - 400 kHz (a)	11.908
10 mm - 400 kHz (b)	17.665
10 mm - 400 kHz (c)	54.343
10 mm - 400 kHz (d)	18.510

Tabela 3.15: Atenuação dos modos estudados para as diferentes espessuras de revestimento de polietileno.

A seguir, foi estudado um novo material de revestimento analisando os novos perfis de modo e os novos valores de atenuação.

3.3.3

Alteração de material de revestimento

Para continuar avaliando os efeitos do revestimento na propagação das ondas CSH, um novo material foi escolhido, para esse caso foi escolhido o epóxi, e a Tab. 3.16 mostra as características do novo caso de estudo.

Como se pode ver na Tab. 3.16, há valores bem distintos, o que impactarão diretamente na geração dos modos do revestimento, que por consequência, afeta em

Características	Aço	Epóxi
Raio interno (mm)	155.5	161.9
Raio externo (mm)	161.9	163.9
Densidade (kg/m^3)	7850	800
Velocidade de corpo da onda-P (m/s)	5850	1900
Constante de atenuação da onda-P (dB/mm/MHz)	0	1.419
Impedância acústica da onda-P (MRayl)	46	1.52
Velocidade de corpo da onda-S (m/s)	3230	860
Constante de atenuação da onda-S (dB/mm/MHz)	0	4.743
Impedância acústica da onda-S (MRayl)	25	0.62

Tabela 3.16: Caso de estudo de uma camada de 6.35 mm de aço e uma camada de 2.0 mm de epóxi.

quais modos possuem baixa atenuação. A Fig. 3.56 denota o resultado do método CSH para o novo caso de estudo por meio das curvas de velocidade de fase e de atenuação.

Como visto na Fig. 3.56, os modos pertencentes a camada metálica não sofreu alteração, pois não houve alteração na camada metálica, mas devido a mudança do material do revestimento, os modos do revestimento sofreram alterações, o que irá impactar os perfis de cada modo. A seguir foi comparado a propagação dos modos para 25 mm.

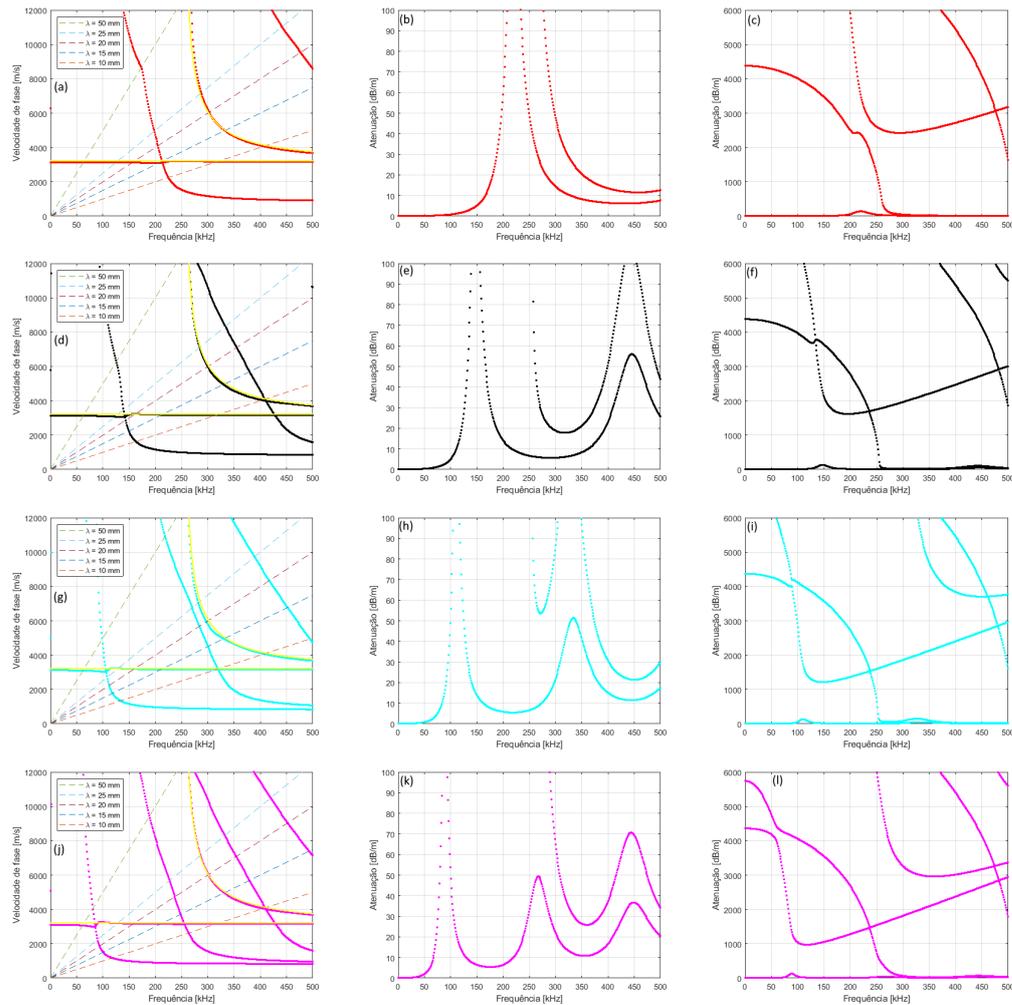


Figura 3.56: Curvas de dispersão para ondas CSH em um duto com uma camada de aço de 6.35 mm e uma camada revestimento de epóxi de diferentes espessuras, a saber, 1.0 mm em pontos vermelhos (a)-(c), 1.5 mm em pontos pretos (d)-(f), 2.0 mm em pontos cianos (g)-(i) e 2.5 mm em pontos rosas (j)-(l). As curvas em amarelo denotam a velocidade de fase para uma placa de aço de mesma espessura sem revestimento (a,d,g,h). Na primeira coluna temos a curva de velocidade de fase, onde as linhas tracejadas mostram a relação entre frequência e velocidade para diferentes comprimentos de onda, a saber, 1.0 mm, 1.5 mm, 2.0 mm e 2.5 mm. Nas demais colunas tem-se as curvas de atenuação.

3.3.3.1 25 mm

Primeiramente, foram analisados os modos gerados em 25 mm. A Tab. 3.17 denota os valores de atenuação de cada modo para as diferentes espessuras de revestimento para o modo centrado em 125 kHz.

Espessura do revestimento (mm)	Atenuação no polietileno (dB/m)	Atenuação no epóxi (dB/m)
1.0	0.985	2.0768
1.5	7.601	24.7102
2.0	82.164	36.6578
2.5	13.226	10.4067

Tabela 3.17: Atenuação dos modos do metal com 25 mm de comprimento de onda em 125 kHz para diferentes espessuras da camada de polietileno e epóxi.

Como se pode ver na Tab. 3.17, para 1.0 mm e 2.5mm os valores de atenuação se encontram próximos. Isso é devido a distância da região de excitação com os modos do revestimento. Entretanto para as espessuras de 1.5 e 2.0 mm, os valores de atenuação são distintos. Para 1.5 mm, tem-se em torno de 7.5 dB/m no polietileno e 25 dB/m no epóxi. Tal ocorrido se deve a proximidade do primeiro modo do revestimento no epóxi o que aumenta a atenuação e no polietileno. Tal comportamento no epóxi é confirmado nos perfis do modo vistos na Fig. 3.57, onde se pode ver por meio do vetor de Poynting que parte da energia se encontra no revestimento.

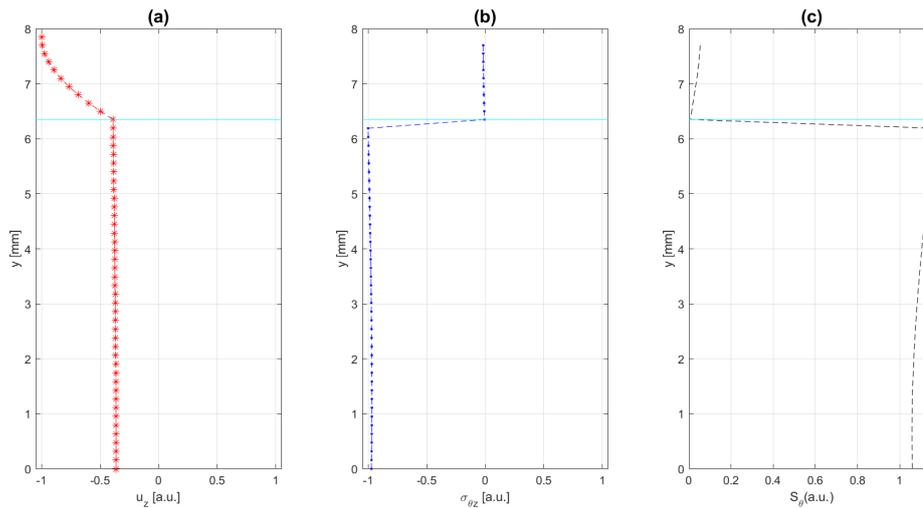


Figura 3.57: Perfis do modo em 125 kHz com comprimento de onda de 25 mm para uma espessura de revestimento de epóxi de 1.5 mm, com atenuação de 25 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento.

Já para a espessura de 2.0 mm, tem-se um cenário oposto, onde no polietileno há uma proximidade maior do modo do revestimento, enquanto no epóxi também há uma proximidade, porém menor. Tal comportamento é confirmado pelos perfis do modo vistos na Fig. 3.58, onde se pode ver no vetor de Poynting que há energia considerável na camada de revestimento.

Também foi analisado o modo quasi-SH1, excitado com frequência de aproximadamente 285 kHz. A Tab. 3.18 mostra os valores de atenuação dos modos gerados para as diferentes espessuras de revestimento.

Espessura do revestimento (mm)	Atenuação no polietileno (dB/m)	Atenuação no epóxi (dB/m)
1.0	99.085	67.7926
1.5	18.504	22.3371
2.0	22.915	58.4725
2.5	199.299	110.1878

Tabela 3.18: Atenuação dos modos do metal com 25 mm de comprimento de onda em 285 kHz para diferentes espessuras da camada de polietileno e epóxi.

Para esse modo, há divergência nos valores de atenuação principalmente para

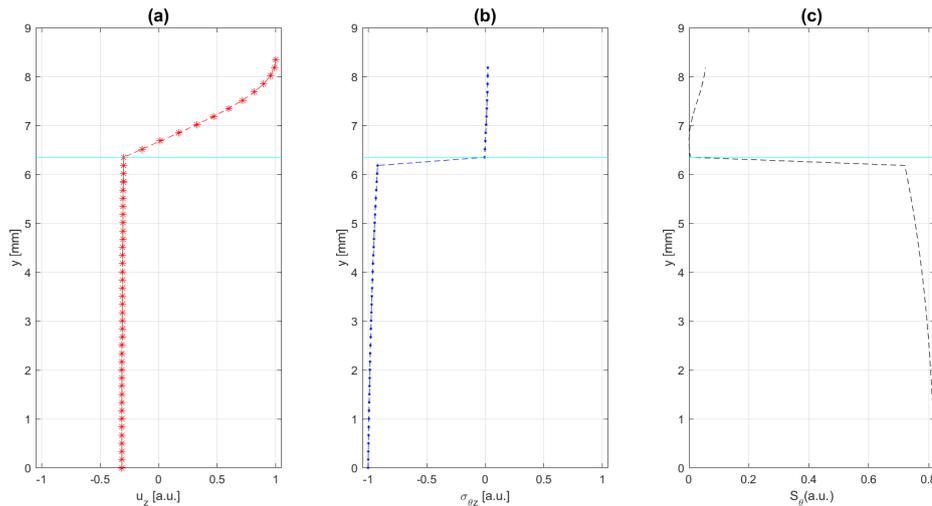


Figura 3.58: Perfis do modo em 125 kHz com comprimento de onda de 25 mm para uma espessura de revestimento de epóxi de 2.0 mm, com atenuação de 36 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento.

as espessuras de 1.0, 2.0 e 2.5 mm. Para a espessura de 1.0 mm, há um afastamento em relação aos modos do revestimento, o que ocasiona em uma redução da atenuação. A Fig. 3.59 mostra os perfis desse modo, onde os mesmos mostram que a energia está concentrada na camada metálica, mas há uma pequena parcela no revestimento.

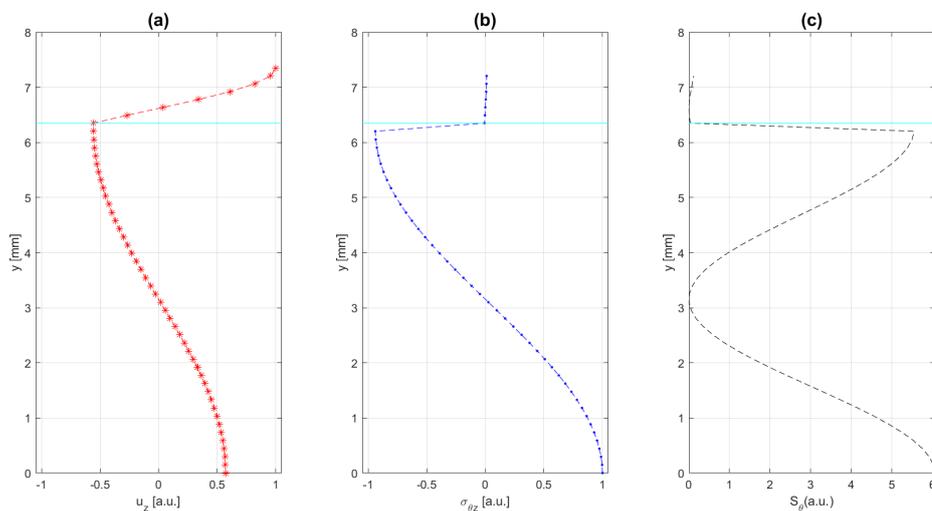


Figura 3.59: Perfis do modo em 285 kHz com comprimento de onda de 25 mm para uma espessura de revestimento de epóxi de 1.0 mm, com atenuação de 70 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento.

Já para a 2.0 mm, o segundo modo do revestimento se encontra próximo da região de atenuação, visto que ao excitar modos de ordem superior acarreta um aumento da atenuação. Isso é confirmado pelos perfis vistos na Fig. 3.60, onde se

pode ver no vetor de deslocamento que está sendo excitado o segundo modo do revestimento.

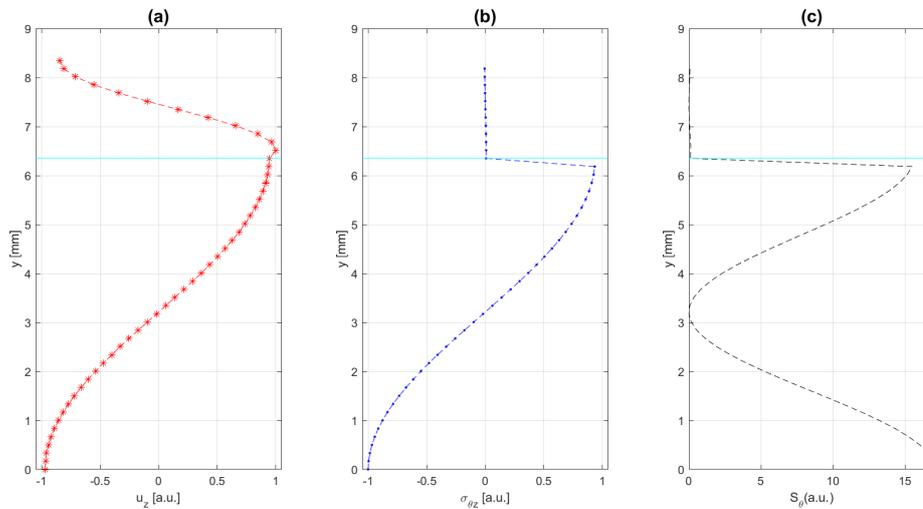


Figura 3.60: Perfis do modo em 285 kHz com comprimento de onda de 25 mm para uma espessura de revestimento de epóxi de 2.0 mm, com atenuação de 60 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento.

Por fim, para a espessura de 2.5 mm, há uma diferença de atenuação pois o terceiro modo do revestimento se encontra próximo da região de atenuação, dessa forma o valor de atenuação sofrera uma diferença. Isso é confirmado pelos perfis vistos na Fig. 3.61, onde se pode ver no vetor de deslocamento que está sendo excitado o terceiro modo do revestimento.

A seguir, foram estudados os modos excitados com comprimento de onda de 20 mm.

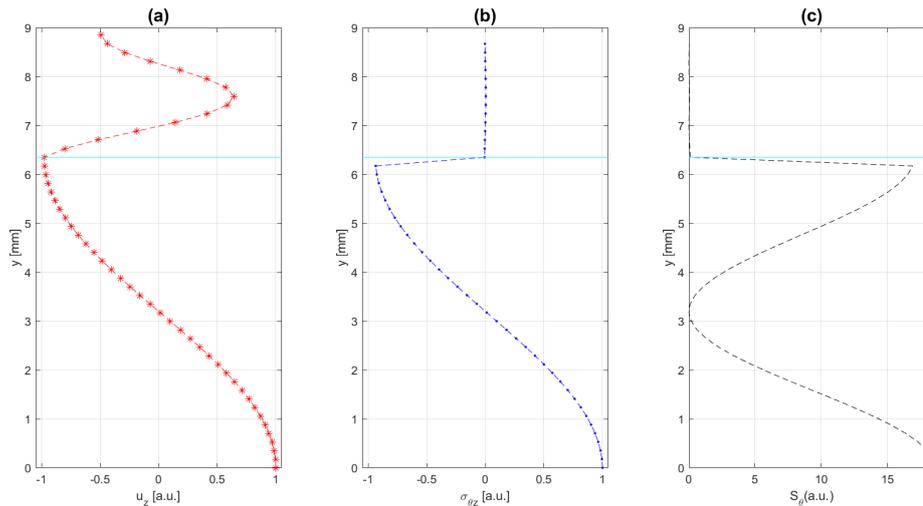


Figura 3.61: Perfis do modo em 285 kHz com comprimento de onda de 25 mm para uma espessura de revestimento de epóxi de 2.5 mm, com atenuação de 110 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento.

3.3.3.2 20 mm

Foi analisado o modo quasi-SH0 cuja frequência de excitação é aproximadamente 160 kHz. A Tab. 3.19 denota os valores de atenuação dos modos gerados.

Espessura do revestimento (mm)	Atenuação no polietileno (dB/m)	Atenuação no epóxi (dB/m)
1.0	2.664	6.4971
1.5	334.753	66.7902
2.0	13.757	10.6663
2.5	5.492	5.8651

Tabela 3.19: Atenuação dos modos do metal com 20 mm de comprimento de onda em 160 kHz para diferentes espessuras da camada de polietileno e epóxi.

Conforme mostrado na Tab. 3.19, todos os valores de atenuação para camada de epóxi são próximos dos valores do polietileno, com exceção da espessura de 1.5 mm, onde para revestimento de polietileno há um encontro entre o modo do metal e do revestimento, enquanto no epóxi há uma proximidade do modo do metal e do revestimento, mas com distância maior em relação ao caso do polietileno. Os perfis do modo em 1.5 mm, ilustrados na Fig. 3.62, denotam que há energia no revestimento, mas diferentemente do caso do polietileno, a maior parte ainda se encontra na camada de aço.

Foi analisado também o modo quasi-SH1 centrado em 300 kHz, onde a Tab. 3.20 denota os valores de atenuação desse modo para as diferentes espessuras de polietileno e de epóxi.

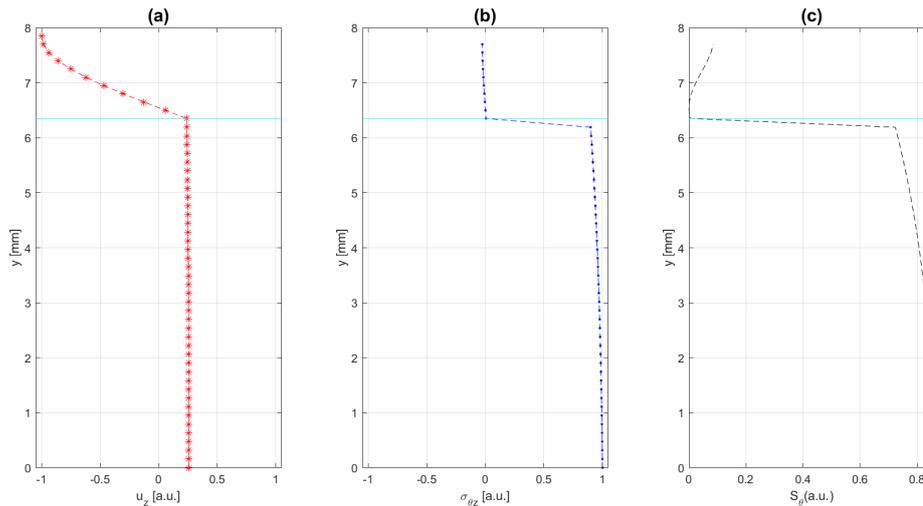


Figura 3.62: Perfis do modo em 160 kHz com comprimento de onda de 20 mm para uma espessura de revestimento de epóxi de 1.5 mm, com atenuação de 67 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente zz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento.

Espessura do revestimento (mm)	Atenuação no polietileno (dB/m)	Atenuação no epóxi (dB/m)
1.0	60.682	45.2717
1.5	14.428	18.8492
2.0	25.652	81.6850
2.5	207.509	62.5120

Tabela 3.20: Atenuação dos modos do metal com 20 mm de comprimento de onda em 300 kHz para diferentes espessuras da camada de polietileno e epóxi.

Percebe-se na Tab. 3.20 que para as espessuras de 1.0 e 1.5 mm se tem valores próximos de atenuação, sendo as divergências oriundas das diferenças de material. Entretanto, para as demais espessuras há divergências por motivos diferentes. Para 2.0 mm, o segundo modo do revestimento se encontra próximo ao ponto de operação, o que aumenta a atenuação. A Fig. 3.63 mostra os perfis de modo que confirmam tal comportamento, onde a energia, ilustrada pelo vetor de Poynting, mesmo concentrada em sua maior parte na camada de aço, também se encontra em boa parte no revestimento.

Já para 2.5 mm, tem-se a situação oposta. Enquanto para revestimento de polietileno há uma aproximação do modo do revestimento, no revestimento de epóxi há uma distância maior da região de excitação em relação ao segundo modo do revestimento, conseqüentemente diminuindo a atenuação. Os perfis do modo vistos na Fig. 3.64, mostram que a maior parte da energia está na camada de aço e uma parcela menor no revestimento.

A seguir, foram analisados os modos para comprimento de onda de 15 mm.

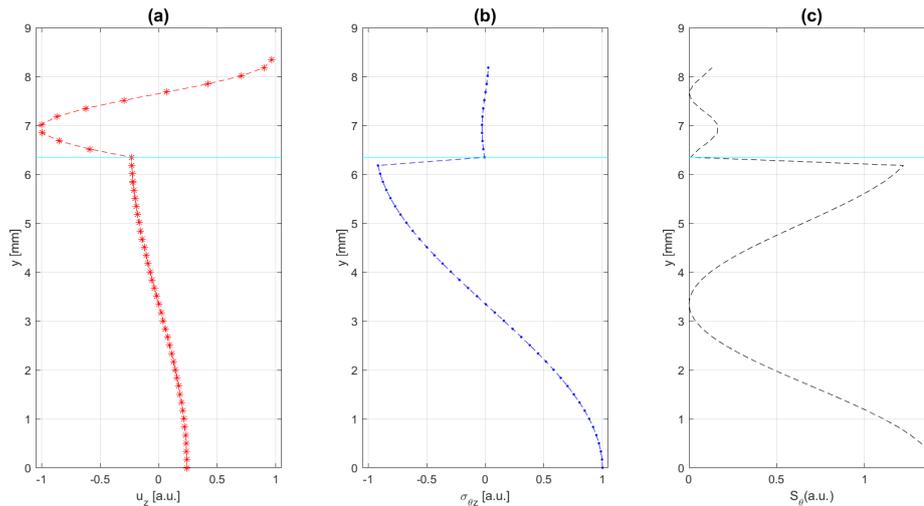


Figura 3.63: Perfis do modo em 300 kHz com comprimento de onda de 20 mm para uma espessura de revestimento de epóxi de 2.0 mm, com atenuação de 80 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento.

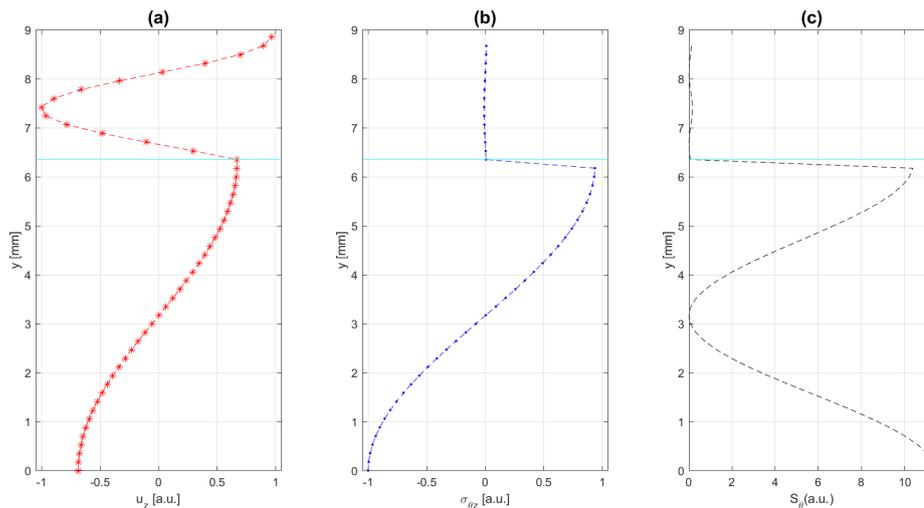


Figura 3.64: Perfis do modo em 300 kHz com comprimento de onda de 20 mm para uma espessura de revestimento de epóxi de 2.5 mm, com atenuação de 80 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento.

3.3.3.3 15 mm

Assim como anteriormente, foi estudado o modo quasi-SH0, onde, para comprimento de onda de 15 mm, possui frequência de excitação em torno de 210 kHz. A Tab. 3.21 denota os valores de atenuação dos modos gerados.

Como visto na Tab. 3.21, todos os valores de atenuação são relativamente próximos, com exceção da espessura de 1.0 mm, onde, para o revestimento de epóxi,

Espessura do revestimento (mm)	Atenuação no polietileno (dB/m)	Atenuação no epóxi (dB/m)
1.0	20.630	4200.3495
1.5	13.7190	10.6983
2.0	4.798	5.5484
2.5	4.303	7.8822

Tabela 3.21: Atenuação dos modos do metal com 15 mm de comprimento de onda em 210 kHz para diferentes espessuras da camada de polietileno e epóxi.

tem-se um encontro entre o modo do metal e o segundo modo do revestimento, o que aumenta consideravelmente a atenuação. O comportamento desse modo pode ser analisado pelos seus perfis vistos na Fig. 3.65, onde é possível ver no vetor de Poynting que a energia está concentrada no revestimento e não na camada de aço, ocasionando em uma alta atenuação.

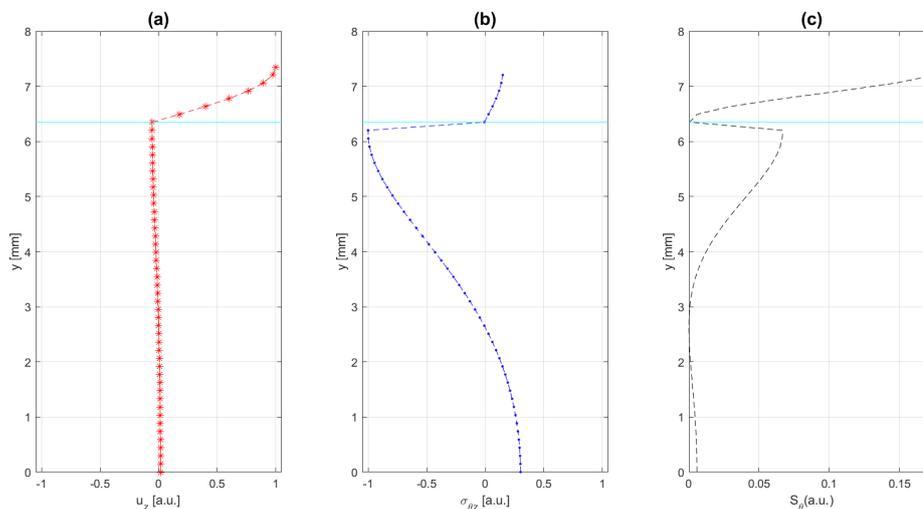


Figura 3.65: Perfis do modo em 210 kHz com comprimento de onda de 15 mm para uma espessura de revestimento de epóxi de 2.5 mm, com atenuação de 4200 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θ_z do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento.

Foi analisado também o modo quasi-SH1 cuja frequência de excitação é em torno de 330 kHz. A Tab. 3.22 mostra os valores de atenuação para as diferentes espessuras de revestimento.

Espessura do revestimento (mm)	Atenuação no polietileno (dB/m)	Atenuação no epóxi (dB/m)
1.0	29.890	25.8151
1.5	11.531	18.2566
2.0	52.022	126.907
2.5	50.047	31.4717

Tabela 3.22: Atenuação dos modos do metal com 15 mm de comprimento de onda em 330 kHz para diferentes espessuras da camada de polietileno e epóxi.

Novamente, percebe-se que os valores de atenuação são relativamente próximos com exceção das espessuras de 2.0 e 2.5 mm. Para a espessura de 2.0 mm, há uma proximidade maior do segundo modo do revestimento em relação ao polietileno, o que ocasiona o aumento da atenuação. Os perfis do modo, vistos na Fig. 3.66, confirmam tal comportamento, onde a energia, vista no vetor de Poynting, está concentrada no revestimento o que ocasiona o aumento da atenuação.

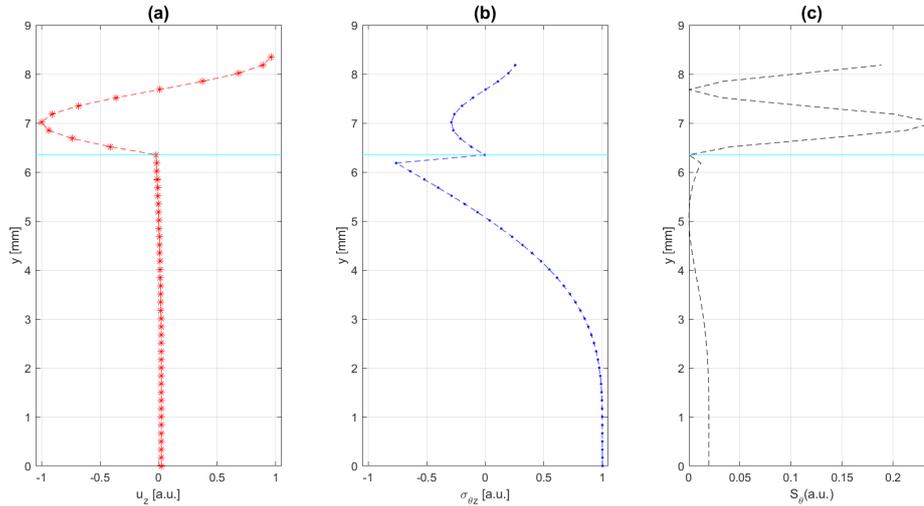


Figura 3.66: Perfis do modo em 330 kHz com comprimento de onda de 15 mm para uma espessura de revestimento de epóxi de 2.0 mm, com atenuação de 145 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento.

Entretanto, para 2.5 mm, tem-se uma situação oposta, onde no polietileno há uma aproximação maior do modo do revestimento, enquanto no epóxi há um afastamento o que ocasiona em uma redução de atenuação. A Fig. 3.67 mostra os perfis desse modo, onde se pode ver que a energia, denotada pelo vetor de Poynting, está concentrada em sua maior parte na camada de aço.

A seguir, foram estudados os modos com comprimento de onda de 10 mm.

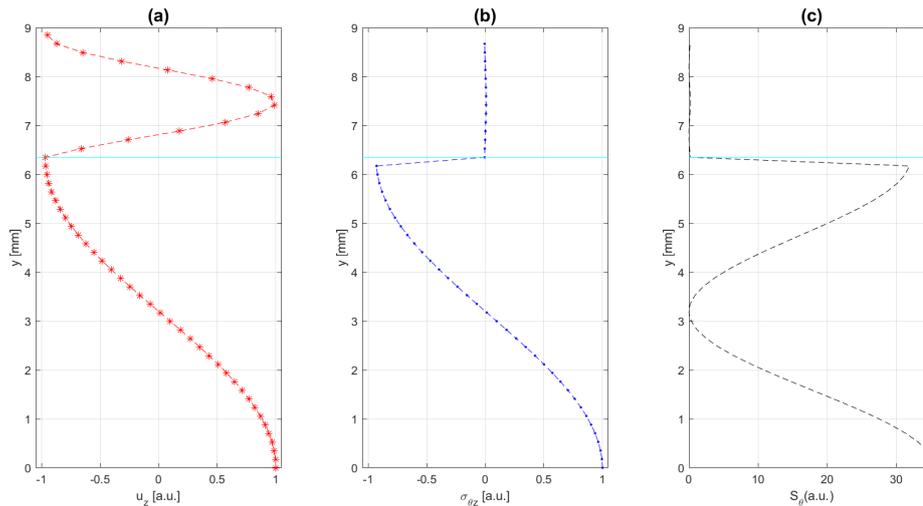


Figura 3.67: Perfis do modo em 330 kHz com comprimento de onda de 15 mm para uma espessura de revestimento de epóxi de 2.5 mm, com atenuação de 30 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento.

3.3.3.4 10 mm

Por fim, foi estudado, também, os modos para 10 mm de comprimento de onda. O modo quasi-SH0 possui frequência de excitação em torno de 310 kHz. A Tab. 3.23 denota os valores de atenuação dos modos gerados.

Espessura do revestimento (mm)	Atenuação no polietileno (dB/m)	Atenuação no epóxi (dB/m)
1.0	14.449	11.3185
1.5	4.322	6.063
2.0	10.807	37.0653
2.5	42.090	14.8148

Tabela 3.23: Atenuação dos modos do metal com 10 mm de comprimento de onda em 310 kHz para diferentes espessuras da camada de polietileno e epóxi.

Como visto na Tab. 3.23, todos os valores de atenuação são relativamente próximos, com exceção da espessura de 2.0 mm e 2.5 mm. Para a espessura de 2.0 mm, tem-se uma aproximação do segundo modo do revestimento o que aumenta a atenuação. Os perfis mostrados na Fig. 3.68 confirmam tal fato, onde a energia, vista através do vetor de Poynting, embora concentrada em sua maior parte na camada de aço, a mesma também se encontra em quantidade razoável no revestimento.

Já para 2.5 mm, encontra-se um cenário oposto, onde há um afastamento dos modos do revestimento, ocasionando em uma redução de atenuação. A Fig. 3.69 ilustra os perfis desse modo, onde se pode ver que a energia, denotada pelo vetor de Poynting, está quase toda concentrada na camada metálica e quase não há energia na camada de revestimento.

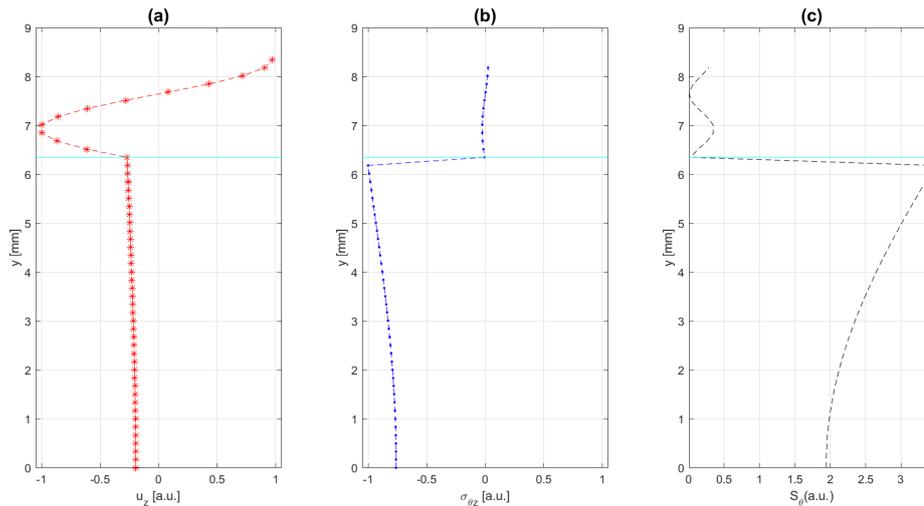


Figura 3.68: Perfis do modo em 310 kHz com comprimento de onda de 10 mm para uma espessura de revestimento de epóxi de 2.0 mm, com atenuação de 40 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento.

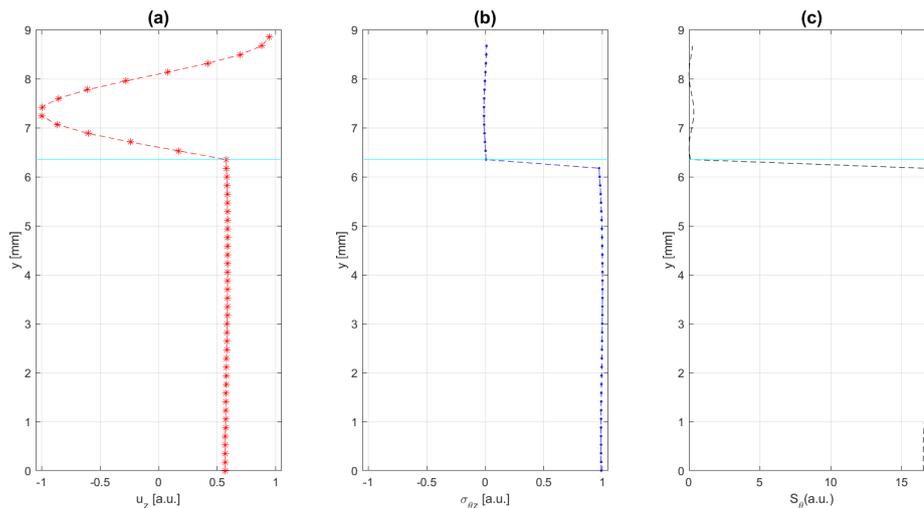


Figura 3.69: Perfis do modo em 310 kHz com comprimento de onda de 10 mm para uma espessura de revestimento de epóxi de 2.5 mm, com atenuação de 15 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento.

Foi analisado também o modo quasi-SH1 cuja frequência de excitação é em torno de 400 kHz. A Tab. 3.24 mostra os valores de atenuação para as diferentes espessuras de revestimento.

Como se pode ver na Tab. 3.24, com exceção da espessura de 1.0 mm, todos os valores de atenuação diferem. Para a espessura de 1.5 mm há uma aproximação do segundo modo do revestimento como se pode ver nos perfis desse modo visto na Fig. 3.70, onde no vetor de deslocamento pode-se ver que está sendo excitado tal

Espessura do revestimento (mm)	Atenuação no polietileno (dB/m)	Atenuação no epóxi (dB/m)
1.0	11.908	13.049
1.5	17.665	55.9178
2.0	54.343	27.8437
2.5	18.510	40.4883

Tabela 3.24: Atenuação dos modos do metal com 10 mm de comprimento de onda em 400 kHz para diferentes espessuras da camada de polietileno e epóxi.

modo, e o vetor de Poynting mostra que a energia possui parcela considerável no revestimento.

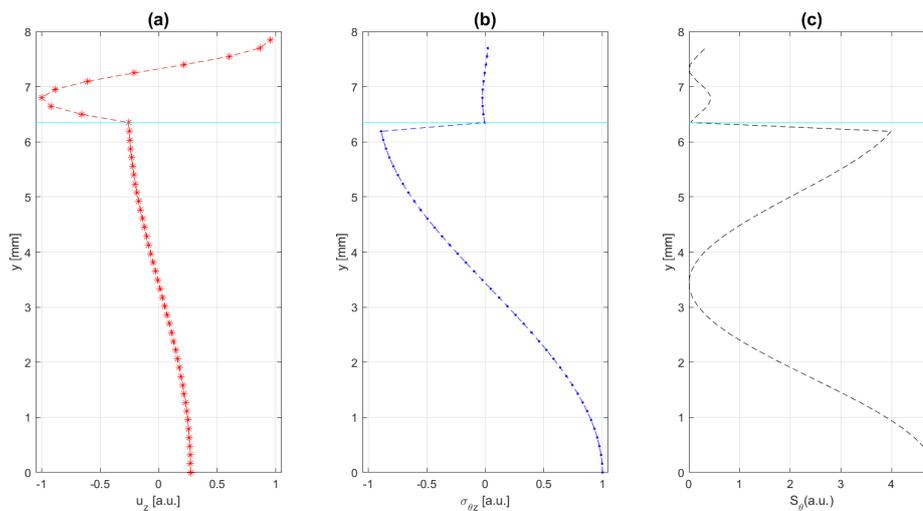


Figura 3.70: Perfis do modo em 310 kHz com comprimento de onda de 10 mm para uma espessura de revestimento de epóxi de 1.5 mm, com atenuação de 55 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento.

Para a espessura de 2.0 mm, há um afastamento dos modos do revestimento, e como se pode ver nos perfis do modo, mostrados na Fig. 3.71, a energia se concentra em sua maior parte no metal e quase não há energia no revestimento, sendo o valor relativamente alto de atenuação proveniente da excitação do segundo que possui maior atenuação.

Por fim, para a espessura de 2.5 mm, há um afastamento dos modos do revestimento, e como se pode ver nos perfis do modo, mostrados na Fig. 3.72, o terceiro modo do revestimento está sendo excitado, sendo possível ver tal fato pelo vetor de deslocamento, o que ocasiona um aumento de atenuação, mesmo que a energia, mostrada por meio do vetor de Poynting, esteja quase em sua totalidade na camada de metal.

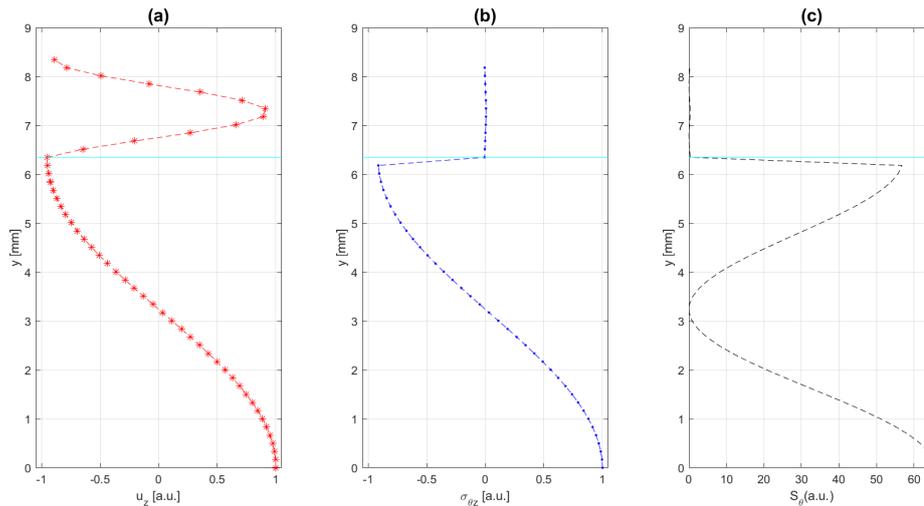


Figura 3.71: Perfis do modo em 310 kHz com comprimento de onda de 10 mm para uma espessura de revestimento de epóxi de 2.0 mm, com atenuação de 30 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento.

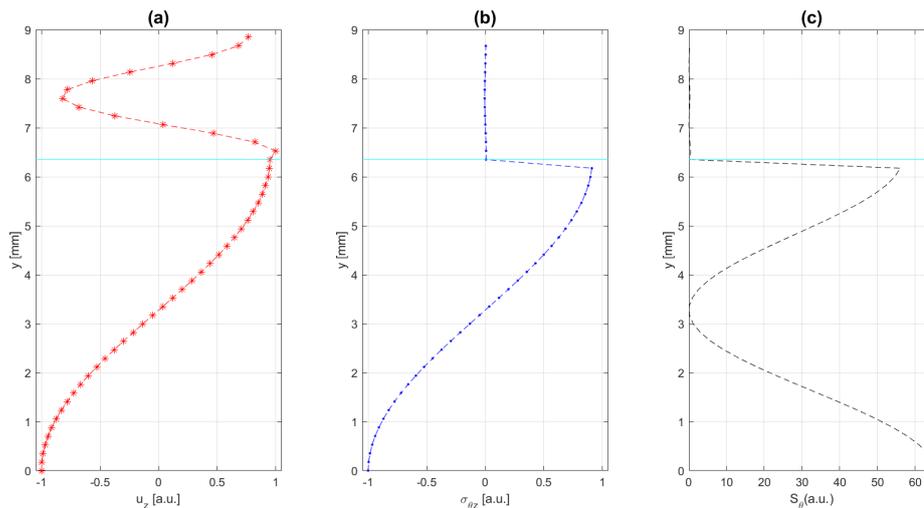


Figura 3.72: Perfis do modo em 310 kHz com comprimento de onda de 10 mm para uma espessura de revestimento de epóxi de 2.5 mm, com atenuação de 40 dB/m. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento.

3.3.3.5 Conclusão

Assim como para o revestimento de polietileno, foram analisados quais os melhores modos para as diferentes espessuras de revestimento. A Tab. 3.25, denota a atenuação de todos os modos estudados, onde, assim como no estudo da camada de polietileno, nota-se que aumentar a espessura do revestimento viscoelástico, não necessariamente acarretará um aumento de atenuação.

Ponto de operação	Atenuação (dB/m)
25 mm - 125 kHz (a)	2.0768
25 mm - 125 kHz (b)	24.7102
25 mm - 125 kHz (c)	36.6578
25 mm - 125 kHz (d)	10.4067
25 mm - 285 kHz (a)	67.7926
25 mm - 285 kHz (b)	22.3371
25 mm - 285 kHz (c)	58.4725
25 mm - 285 kHz (d)	110.1878
20 mm - 160 kHz (a)	6.4971
20 mm - 160 kHz (b)	66.7902
20 mm - 160 kHz (c)	10.6663
20 mm - 160 kHz (d)	5.8651
20 mm - 300 kHz (a)	45.2717
20 mm - 300 kHz (b)	18.8492
20 mm - 300 kHz (c)	81.6850
20 mm - 300 kHz (d)	62.512
15 mm - 210 kHz (a)	4200.3495
15 mm - 210 kHz (b)	10.6983
15 mm - 210 kHz (c)	5.5484
15 mm - 210 kHz (d)	7.8822
15 mm - 330 kHz (a)	25.8151
15 mm - 330 kHz (b)	18.2566
15 mm - 330 kHz (c)	126.907
15 mm - 330 kHz (d)	31.4717
10 mm - 310 kHz (a)	11.3185
10 mm - 310 kHz (b)	6.063
10 mm - 310 kHz (c)	37.0653
10 mm - 310 kHz (d)	14.8148
10 mm - 400 kHz (a)	13.049
10 mm - 400 kHz (b)	55.9178
10 mm - 400 kHz (c)	27.8437
10 mm - 400 kHz (d)	40.4883

Tabela 3.25: Atenuação dos modos estudados para as diferentes espessuras de revestimento de epóxi.

Nota-se que para a espessura de 1.0 mm as regiões de menor atenuação foram 25 mm - 125 kHz, 20 mm - 160 kHz e 10 mm - 310 kHz, para a espessura de 1.5 mm foram as regiões 15 mm - 210 kHz, 15 mm - 330 kHz e 10 mm - 310 kHz, para a espessura de 2.0 mm foram as regiões 20 mm - 160 kHz, 15 mm - 210 kHz e 10 mm - 400 kHz, e por fim, para a espessura de 2.5 mm foram as regiões 25 mm - 125 kHz, 20 mm - 160 kHz e 15 mm - 210 kHz (d). A seguir foram estudados sobre o que acontece ao mudar as constantes de atenuação e velocidade de fase.

3.3.4

Alteração nas constantes do material

Nessa subseção foi estudado o que acontece quando se altera os valores de constante de atenuação e de velocidade de fase. Tal estudo foi realizado alterando os valores das constantes no caso de estudo da Tab. 3.16, foi escolhido aumento de 10 % e redução de 10, 25, 50 e 75 %. Nessa seção, foram abodados os aumento de 10 % e redução de 10 %, porque essas constantes usualmente apresentam pequenas variações em relação ao seu valor original; valores de demais reduções encontram-se no apêndice B para uma análise de caráter mais incomum, mas que se faz necessário para melhor entendimento do efeito de atenuação devido à proximidade de modos do revestimento. Primeiramente, foi analisado a mudança na constante de atenuação, depois na constante de velocidade de fase.

3.3.4.1

Alteração na constante de atenuação - Aumento de 10 %

Para 10 % de aumento no valor de atenuação obteve-se a Fig. 3.73, e se nota que há semelhanças no gráfico de atenuação e velocidade de fase com relação ao visto na Fig. 3.56, tendo somente divergência nas amplitudes. A Tab. 3.26 compara os valores obtidos para o novo valor da constante de atenuação, onde a diferença foi calculada conforme a Eq. 3-2

$$Diferença(\%) = \frac{Att_{100} - Att_k}{Att_{100}} \times 100, \quad (3-2)$$

onde Att_{100} é a atenuação para a constante com seu valor original e Att_k é a atenuação para a constante com valor igual k% do seu valor original.

Como visto na Tab. 3.26 a média foi aproximadamente de 9 % o que se encontra próximo dos 10 % esperado, onde a distinção dos valores é dada pela formatação do próprio método SAFE cuja solução é por elementos, ou seja, a solução é dada por um par de atenuação em uma determinada frequência, portanto há diferenças uma vez que ao excitar o modo em uma determinada frequência com determinada velocidade de fase, tal método encontra uma frequência próxima e a atenuação respectiva a esse modo. A seguir foi estudada uma redução do valor da constante em 10 % do valor original.

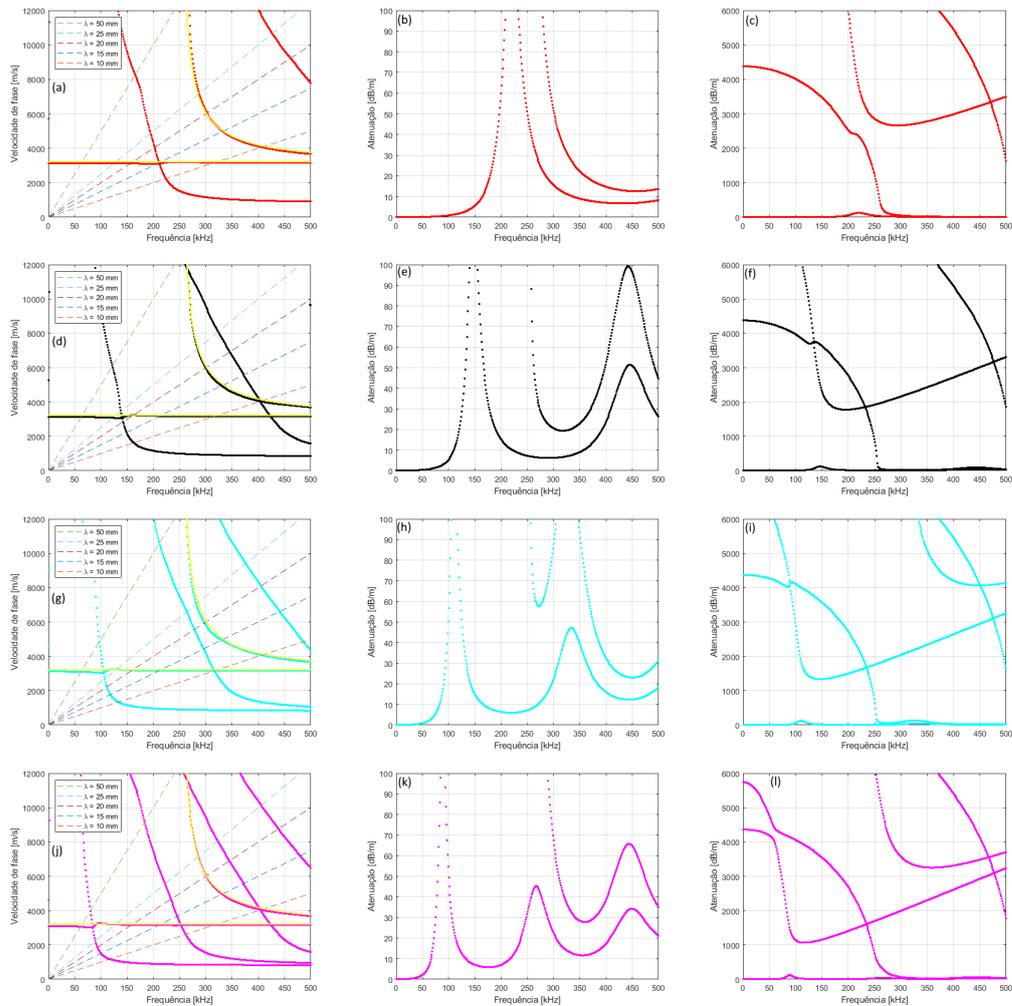


Figura 3.73: Curvas de dispersão para ondas CSH em um duto com uma camada de aço de 6.35 mm e uma camada revestimento de epóxi com constante de atenuação aumentada em 10 % de seu valor original e de diferentes espessuras, a saber, 1.0 mm em pontos vermelhos (a)-(c), 1.5 mm em pontos pretos (d)-(f), 2.0 mm em pontos cianos (g)-(i) e 2.5 mm em pontos rosas (j)-(l). As curvas em amarelo denotam a velocidade de fase para uma placa de aço de mesma espessura sem revestimento (a,d,g,h). Na primeira coluna temos a curva de velocidade de fase, onde as linhas tracejadas mostram a relação entre frequência e velocidade para diferentes comprimentos de onda, a saber, 1.0 mm, 1.5 mm, 2.0 mm e 2.5 mm. Nas demais colunas têm-se as curvas de atenuação.

Ponto de operação	Atenuação no epóxi original (dB/m)	Atenuação no epóxi em 110% (dB/m)	Diferença (%)
25 mm - 125 kHz (a)	2.0768	2.2773	9.65
25 mm - 125 kHz (b)	24.7102	26.2099	6.07
25 mm - 125 kHz (c)	36.6578	38.1332	4.02
25 mm - 125 kHz (d)	10.4067	11.2607	8.21
25 mm - 285 kHz (a)	67.7926	72.7445	7.30
25 mm - 285 kHz (b)	22.3371	24.4039	9.25
25 mm - 285 kHz (c)	58.4725	61.9163	5.89
25 mm - 285 kHz (d)	110.1878	121.639	10.39
20 mm - 160 kHz (a)	6.4971	7.0794	8.96
20 mm - 160 kHz (b)	66.7902	75.8278	13.53
20 mm - 160 kHz (c)	10.6663	11.539	8.18
20 mm - 160 kHz (d)	5.8651	6.3992	9.11
20 mm - 300 kHz (a)	45.2717	48.8469	7.90
20 mm - 300 kHz (b)	18.8492	20.5933	9.25
20 mm - 300 kHz (c)	81.685	90.1352	10.34
20 mm - 300 kHz (d)	62.512	69.8429	11.73
15 mm - 210 kHz (a)	4200.3495	4684.99	11.54
15 mm - 210 kHz (b)	10.6983	11.578	8.22
15 mm - 210 kHz (c)	5.5484	6.06	9.22
15 mm - 210 kHz (d)	7.8822	8.5376	8.31
15 mm - 330 kHz (a)	25.8151	28.0234	8.55
15 mm - 330 kHz (b)	18.2566	20.0785	9.98
15 mm - 330 kHz (c)	126.907	135.91	7.09
15 mm - 330 kHz (d)	31.4717	34.2769	8.91
10 mm - 310 kHz (a)	11.3185	12.2514	8.24
10 mm - 310 kHz (b)	6.063	6.6191	9.17
10 mm - 310 kHz (c)	37.0653	40.0388	8.02
10 mm - 310 kHz (d)	14.8148	15.6445	5.60
10 mm - 400 kHz (a)	13.049	14.2466	9.18
10 mm - 400 kHz (b)	55.9178	62.4145	11.62
10 mm - 400 kHz (c)	27.8437	29.6938	6.64
10 mm - 400 kHz (d)	40.4883	44.7344	10.49

Média:	8.77
---------------	------

Tabela 3.26: Comparação dos valores de atenuação dos modos estudados para as diferentes espessuras de revestimento de epóxi para constante de atenuação igual com aumento de 10 % de seu valor original.

3.3.4.2

Alteração na constante de atenuação - Redução de 10 %

Para redução de 10 % no valor de atenuação foi obtida a Fig. 3.74, e novamente, nota-se que há semelhanças nos gráficos de dispersão com relação aos vistos na Fig. 3.56, com nova divergência nas amplitudes, nesse caso menor. A Tab. 3.27 compara os valores obtidos para o novo valor da constante de atenuação.

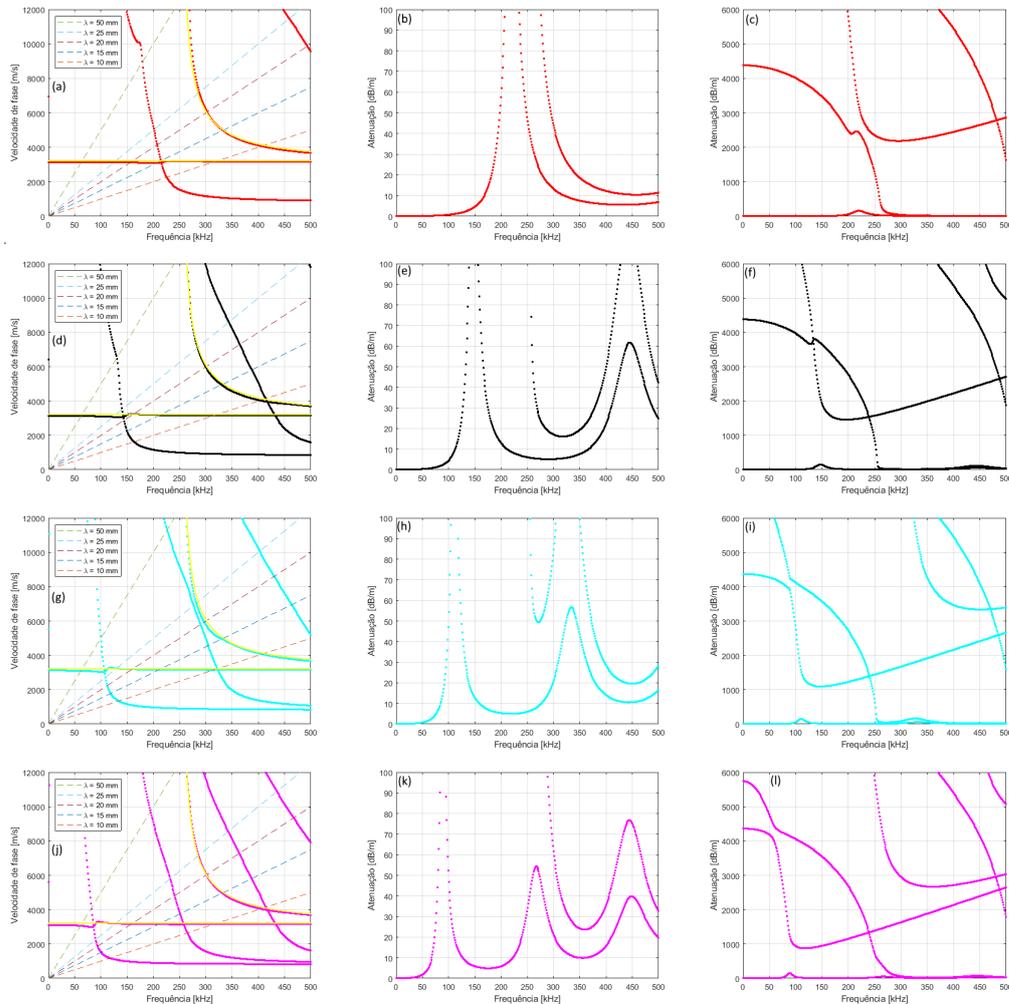


Figura 3.74: Curvas de dispersão para ondas CSH em um duto com uma camada de aço de 6.35 mm e uma camada revestimento de epóxi com constante de atenuação reduzida em 10 % de seu valor original e de diferentes espessuras, a saber, 1.0 mm em pontos vermelhos (a)-(c), 1.5 mm em pontos pretos (d)-(f), 2.0 mm em pontos cianos (g)-(i) e 2.5 mm em pontos rosas (j)-(l). As curvas em amarelo denotam a velocidade de fase para uma placa de aço de mesma espessura sem revestimento (a,d,g,h). Na primeira coluna tem-se a curva de velocidade de fase, onde as linhas tracejadas mostram a relação entre frequência e velocidade para diferentes comprimentos de onda, a saber, 1.0 mm, 1.5 mm, 2.0 mm e 2.5 mm. Nas demais colunas têm-se as curvas de atenuação.

Assim como no caso anterior a média encontrada foi de aproximadamente de 9 % se encontrando próximo dos 10 %, para esse caso os valores menores, onde a distinção dos valores é dada pela formatação do próprio método SAFE, como dito anteriormente. No A encontra-se mudança em tal constante para outras porcentagens. A seguir, foi estudada a mudança para a constante de velocidade da onda de corpo transversal.

Ponto de operação	Atenuação no epóxi original (dB/m)	Atenuação no epóxi em 90% (dB/m)	Diferença (%)
25 mm - 125 kHz (a)	2.0768	1.8745	9.74
25 mm - 125 kHz (b)	24.7102	23.0093	6.88
25 mm - 125 kHz (c)	36.6578	32.284	11.93
25 mm - 125 kHz (d)	10.4067	9.5087	8.63
25 mm - 285 kHz (a)	67.7926	62.431	7.91
25 mm - 285 kHz (b)	22.3371	20.2285	9.44
25 mm - 285 kHz (c)	58.4725	54.5623	6.69
25 mm - 285 kHz (d)	110.1878	97.7503	11.29
20 mm - 160 kHz (a)	6.4971	5.8981	9.22
20 mm - 160 kHz (b)	66.7902	61.3192	8.19
20 mm - 160 kHz (c)	10.6663	9.7481	8.61
20 mm - 160 kHz (d)	5.8651	5.3181	9.33
20 mm - 300 kHz (a)	45.2717	41.4754	8.39
20 mm - 300 kHz (b)	18.8492	17.0698	9.44
20 mm - 300 kHz (c)	81.685	76.6181	6.20
20 mm - 300 kHz (d)	62.512	59.3837	5.00
15 mm - 210 kHz (a)	4200.3495	3948.69	5.99
15 mm - 210 kHz (b)	10.6983	9.7738	8.64
15 mm - 210 kHz (c)	5.5484	5.0261	9.41
15 mm - 210 kHz (d)	7.8822	7.1961	8.70
15 mm - 330 kHz (a)	25.8151	23.517	8.90
15 mm - 330 kHz (b)	18.2566	16.5783	9.19
15 mm - 330 kHz (c)	126.907	111.957	11.78
15 mm - 330 kHz (d)	31.4717	29.002	7.85
10 mm - 310 kHz (a)	11.3185	10.3386	8.66
10 mm - 310 kHz (b)	6.063	5.4945	9.38
10 mm - 310 kHz (c)	37.0653	32.2522	12.99
10 mm - 310 kHz (d)	14.8148	13.8645	6.41
10 mm - 400 kHz (a)	13.049	11.8246	9.38
10 mm - 400 kHz (b)	55.9178	49.9261	10.72
10 mm - 400 kHz (c)	27.8437	25.8028	7.33
10 mm - 400 kHz (d)	40.4883	35.6665	11.91

Média:	8.88
---------------	------

Tabela 3.27: Comparação dos valores de atenuação dos modos estudados para as diferentes espessuras de revestimento de epóxi para constante de atenuação reduzida em 10% de seu valor original.

3.3.4.3

Alteração na constante de velocidade de fase - Aumento de 10 %

Para finalizar o estudo envolvendo o modelo analítico, foi estudado também o que acontece ao mudar a constante de velocidade de fase transversal. Como tal constante sofrerá mudanças em seu valor, é esperado alterações nas curvas pertencentes aos modos do revestimento. Dessa forma mudará também as curvas de atenuação dado que agora os pontos que anteriormente eram de cruzamento entre

modos do metal e modos do revestimento podem sofrer afastamentos, em relação ao caso original visto na Fig. 3.56, e os pontos onde não havia cruzamentos podem passar a tê-los o que influenciará diretamente no valor de atenuação. Primeiramente foi estudado para um aumento na constante de velocidade de 10 % e a Fig. 3.75 e a Tab. 3.28.

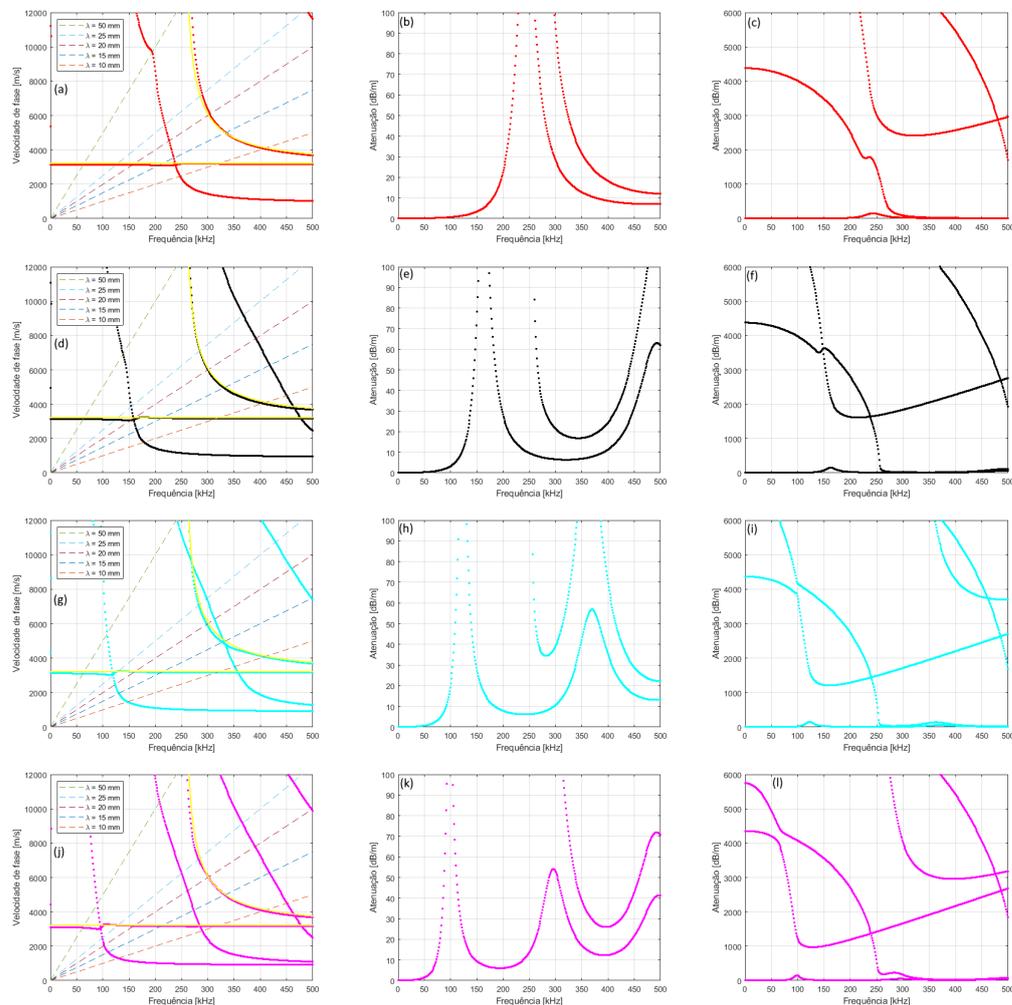


Figura 3.75: Curvas de dispersão para ondas CSH em um duto com uma camada de aço de 6.35 mm e uma camada revestimento de epóxi com constante de velocidade de fase aumentada em 10 % de seu valor original e de diferentes espessuras, a saber, 1.0 mm em pontos vermelhos (a)-(c), 1.5 mm em pontos pretos (d)-(f), 2.0 mm em pontos cianos (g)-(i) e 2.5 mm em pontos rosas (j)-(l). As curvas em amarelo denotam a velocidade de fase para uma placa de aço de mesma espessura sem revestimento (a,d,g,h). Na primeira coluna temos a curva de velocidade de fase, onde as linhas tracejadas mostram a relação entre frequência e velocidade para diferentes comprimentos de onda, a saber, 1.5 mm, 2.0 mm e 2.5 mm. Nas demais colunas têm-se as curvas de atenuação.

Diferente da mudança na constante de atenuação, não se é esperado que a atenuação aumente em 10% devido a mudança da posição de excitação dos modos do revestimento, e, como se pode ver, as curvas pertencentes aos modos do revestimento se deslocaram levemente para a direita, mudando a interação ao excitar um modo do metal, influenciando diretamente no valor de atenuação. Para este caso foi encontrada uma média de 68.21 % de variação em relação ao caso original. Tal valor foi composto por aumento/diminuição de alguns casos, como por exemplo o modo 20 mm - 300

Ponto de operação	Atenuação no epóxi original (dB/m)	Atenuação com epóxi em 110% (dB/m)	Diferença (%)
25 mm - 125 kHz (a)	2.0768	1.5665	24.57
25 mm - 125 kHz (b)	24.7102	11.541	53.29
25 mm - 125 kHz (c)	36.6578	107.187	192.40
25 mm - 125 kHz (d)	10.4067	18.4889	77.66
25 mm - 285 kHz (a)	67.7926	142.8983	110.79
25 mm - 285 kHz (b)	22.3371	27.4652	22.96
25 mm - 285 kHz (c)	58.4725	34.4533	41.08
25 mm - 285 kHz (d)	110.1878	227.2128	106.21
20 mm - 160 kHz (a)	6.4971	4.0903	37.04
20 mm - 160 kHz (b)	66.7902	150.621	125.51
20 mm - 160 kHz (c)	10.6663	19.0522	78.62
20 mm - 160 kHz (d)	5.8651	8.0249	36.82
20 mm - 300 kHz (a)	45.2717	85.8529	89.64
20 mm - 300 kHz (b)	18.8492	21.4254	13.67
20 mm - 300 kHz (c)	81.685	38.045	53.42
20 mm - 300 kHz (d)	62.512	163.0689	160.86
15 mm - 210 kHz (a)	4200.3495	43.2887	98.97
15 mm - 210 kHz (b)	10.6983	18.9427	77.06
15 mm - 210 kHz (c)	5.5484	7.0375	26.84
15 mm - 210 kHz (d)	7.8822	6.4161	18.60
15 mm - 330 kHz (a)	25.8151	42.4345	64.38
15 mm - 330 kHz (b)	18.2566	17.1936	5.82
15 mm - 330 kHz (c)	146.907	9150.206	6128.57
15 mm - 330 kHz (d)	31.4717	59.6532	89.55
10 mm - 310 kHz (a)	11.3185	19.968	76.42
10 mm - 310 kHz (b)	6.063	6.3838	5.29
10 mm - 310 kHz (c)	37.0653	15.1785	59.05
10 mm - 310 kHz (d)	14.8148	35.4804	139.49
10 mm - 405 kHz (a)	13.049	17.2723	32.36
10 mm - 405 kHz (b)	55.9178	25.5766	54.26
10 mm - 405 kHz (c)	27.8437	9.8232	64.72
10 mm - 405 kHz (d)	40.4883	9.2063	77.26

Média:	68.21*
---------------	--------

Tabela 3.28: Comparação dos valores de atenuação dos modos estudados para as diferentes espessuras de revestimento de epóxi para constante de velocidade de fase igual com aumento de 10 % de seu valor original. *No cálculo da média foi desconsiderado o valor do modo 15 mm - 330 kHz para uma espessura de 2.0 mm, devido ao cruzamento entre o modo do metal e do revestimento aumentar a atenuação consideravelmente.

kHz (d) onde há um aumento claro da atenuação pois há uma aproximação entre o modo do metal e o segundo modo do revestimento, tal comportamento é confirmado pelos perfis desse modo vistos na Fig. 3.76, onde, ao analisar o vetor de Poynting, pode-se ver que há energia considerável no revestimento acarretando um aumento de atenuação.

Pode-se ver também que alguns modos sofreram poucas alterações em seu valor de atenuação, mantendo-se boas escolhas para utilização em testes não-destrutivos.

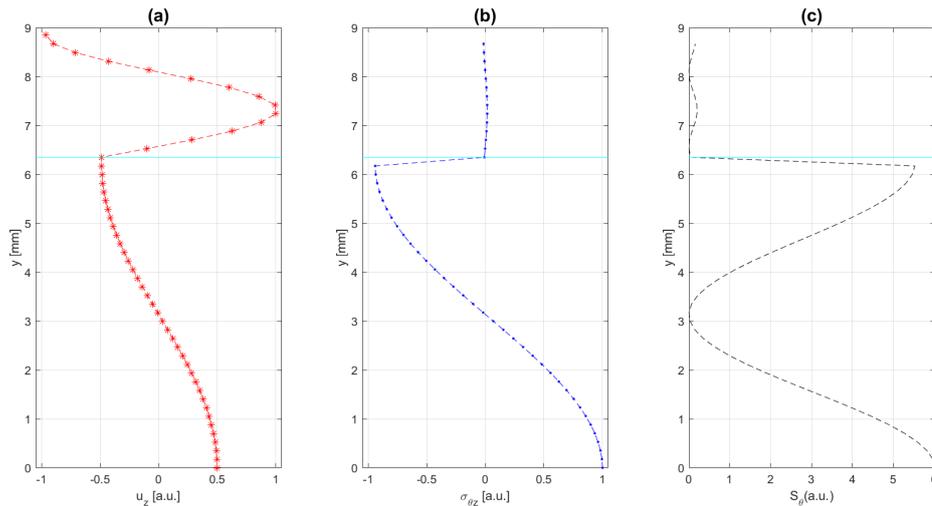


Figura 3.76: Perfis do modo em 300 kHz com comprimento de onda de 20 mm para uma espessura de revestimento de epóxi de 2.5 mm, com atenuação de 160 dB/m com constante de velocidade de fase em 110% do seu valor original. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento.

Para espessura de 1.0 mm tem-se 25 mm - 125 kHz e 20 mm - 160 kHz, para 1.5 mm, os modos de baixa atenuação com poucas alterações são 15 mm - 330 kHz e 10 mm - 310 kHz, para 2.0 mm se tem o modo 15 mm - 210 kHz, e finalmente para 2.5 mm tem-se os modos 20 mm - 160 kHz e 15 mm - 210 kHz.

A seguir foi estudado a mudança do valor da constante estudada com redução de 10% de seu valor original.

3.3.4.4

Alteração na constante de velocidade de fase - Redução de 10 %

Para uma alteração de 90 % do valor da constante de velocidade de fase foi obtida a Fig. 3.77 onde se pode ver, diferentemente do caso anterior, que as curvas dos modos pertencentes ao revestimento se encontram levemente mais a esquerda em relação as curvas vistas na Fig. 3.56 o que ocasiona em mudanças nos valores de atenuação, tais valores podem ser vistos na Tab. 3.29.

Como se pode ver, vários modos sofreram alterações de valor devido à(ao) nova(o) aproximação/afastamento com uma variação em torno de 55 % com alguns modos que antes possuíam atenuação baixa ou moderada e, com a mudança no valor da constante, agora possuem alta atenuação, como por exemplo o modo com comprimento de onda de 25 mm em 125 kHz com espessura de 1.5 mm, onde, como se pode ver nos seus perfis denotados em Fig. 3.78, a energia dada pelo seu vetor de Poynting se concentra um pouco mais na energia em relação ao caso anterior.

Assim como o estudo anterior da constante de velocidade de fase, alguns modos sofreram poucas alterações no seu valor de atenuação sendo bons candidatos a utilização em testes não-destrutivos. Para 1.0 mm de espessura de revestimento

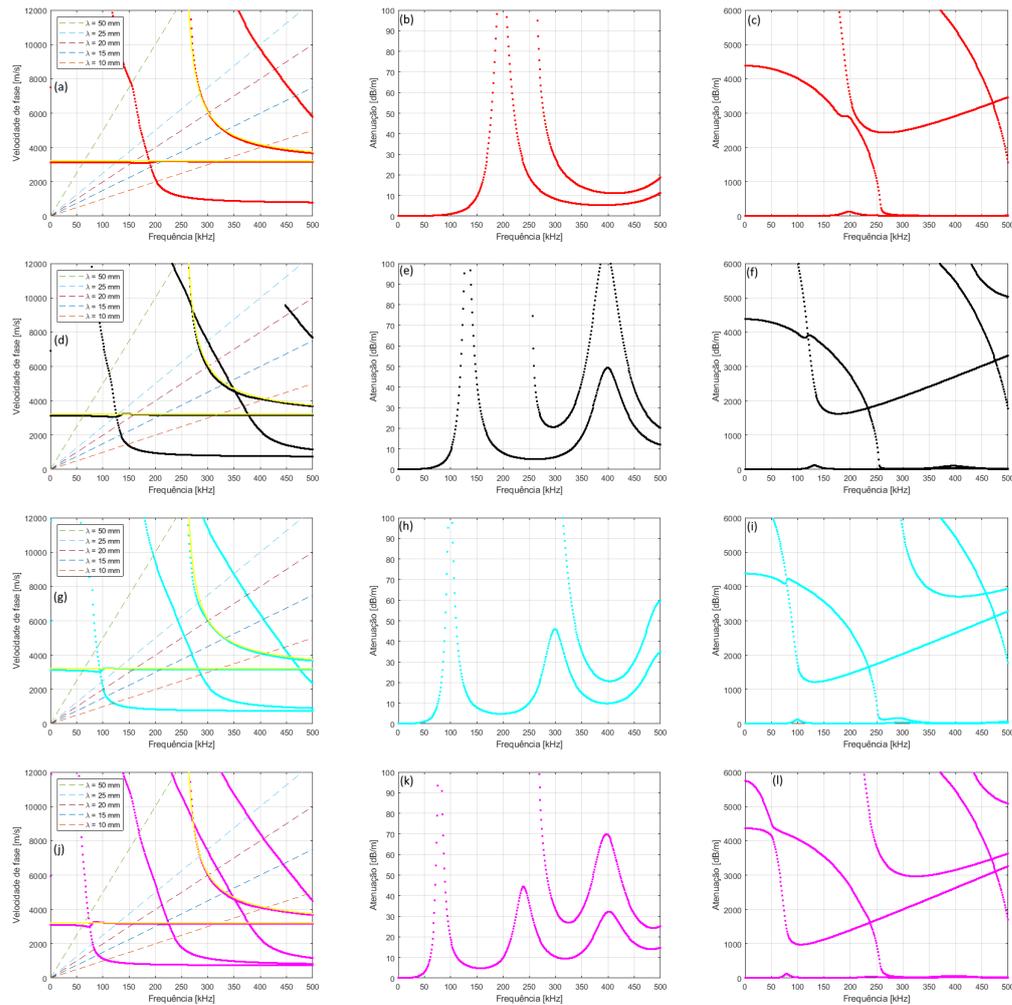


Figura 3.77: Curvas de dispersão para ondas CSH em um duto com uma camada de aço de 6.35 mm e uma camada revestimento de epóxi com constante de velocidade de fase modificada para 90 % de seu valor original e de diferentes espessuras, a saber, 1.0 mm em pontos vermelhos (a)-(c), 1.5 mm em pontos pretos (d)-(f), 2.0 mm em pontos cianos (g)-(i) e 2.5 mm em pontos rosas (j)-(l). As curvas em amarelo denotam a velocidade de fase para uma placa de aço de mesma espessura sem revestimento (a,d,g,h). Na primeira coluna temos a curva de velocidade de fase, onde as linhas tracejadas mostram a relação entre frequência e velocidade para diferentes comprimentos de onda, a saber, 1.0 mm, 1.5 mm, 2.0 mm e 2.5 mm. Nas demais colunas têm-se as curvas de atenuação.

tem-se os modos 25 mm - 125 kHz, 10 mm - 310kHz e 10 mm - 405 kHz, já para 1.5 mm de espessura de revestimento, observa-se os modos 15 mm - 210 kHz e 10 mm - 310 kHz, para 2.0 mm tem-se os modos 20 mm - 160 kHz e 15 mm - 210 kHz, por fim para 2.5 mm observa-se os modos 25 mm - 125 kHz, 20 mm - 160 kHz e 10 mm - 310 kHz. As demais porcentagens foram estudadas no apêndice A.

Ponto de operação	Atenuação no epóxi original (dB/m)	Atenuação com epóxi em 90% (dB/m)	Diferença (%)
25 mm - 125kHz (a)	2.0768	3.1023	49.38
25 mm - 125kHz (b)	24.7102	78.0899	216.02
25mm - 125kHz (c)	36.6578	15.339	58.16
25 mm - 125kHz (d)	10.4067	6.4746	37.78
25 mm - 285kHz (a)	67.7926	36.8343	45.67
25 mm - 285kHz (b)	22.3371	21.4312	4.060
25 mm - 285kHz (c)	58.4725	159.7739	173.25
25 mm - 285kHz (d)	110.1878	45.3895	58.81
20 mm - 160kHz (a)	6.4971	12.9217	98.88
20 mm - 160kHz (b)	66.7902	23.1082	65.40
20 mm - 160kHz (c)	10.6663	6.6062	38.06
20 mm - 160kHz (d)	5.8651	4.800	18.16
20 mm - 300kHz (a)	45.2717	26.5405	41.38
20 mm - 300kHz (b)	18.8492	20.7043	9.84
20 mm - 300kHz (c)	81.685	163.8008	100.53
20 mm - 300kHz (d)	62.512	32.5982	47.85
15 mm - 210kHz (a)	4200.3495	73.9458	98.24
15 mm - 210kHz (b)	10.6983	6.6683	37.67
15 mm - 210kHz (c)	5.5484	5.0834	8.38
15 mm - 210kHz (d)	7.8822	15.5401	97.15
15 mm - 330kHz (a)	25.8151	16.9973	34.16
15 mm - 330kHz (b)	18.2566	27.9675	53.19
15 mm - 330kHz (c)	146.907	55.2883	62.37
15 mm - 330kHz (d)	31.4717	27.1267	13.81
10 mm - 310kHz (a)	11.3185	7.0599	37.63
10 mm - 310kHz (b)	6.063	7.6436	26.07
10 mm - 310kHz (c)	37.0653	34.885	5.88
10 mm - 310kHz (d)	14.8148	9.4547	36.18
10 mm - 405kHz (a)	13.049	11.1208	14.78
10 mm - 405kHz (b)	55.9178	102.5033	83.31
10 mm - 405kHz (c)	27.8437	20.7084	25.63
10 mm - 405kHz (d)	40.4883	67.3129	66.25

Média:	55.12
---------------	-------

Tabela 3.29: Comparação dos valores de atenuação dos modos estudados para as diferentes espessuras de revestimento de epóxi para constante de velocidade de fase igual a 90 % de seu valor original.

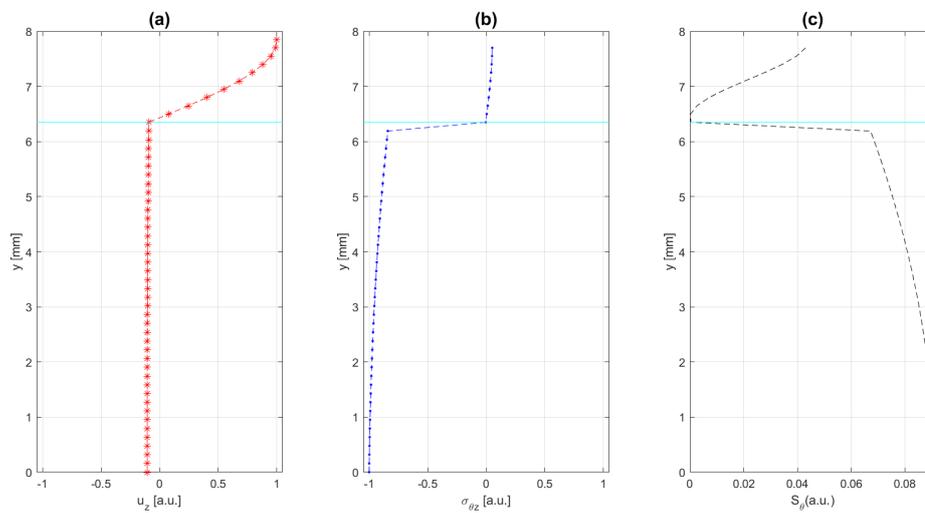


Figura 3.78: Perfis do modo em 125 kHz com comprimento de onda de 25 mm para uma espessura de revestimento de epóxi de 1.5 mm, com atenuação de 80 dB/m com constante de velocidade de fase em 90 % do seu valor original. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento.

3.3.5

Conclusão

Foi estudado o modelo analítico utilizando o método semi-analítico de elementos finitos para estudar diversos modos com diferentes comprimentos de onda com o objetivo de fazer uma primeira análise de qual modo pode ser utilizado em testes não-destrutivos e detecção de defeitos.

Primeiramente, foram estudados os modos do revestimento, onde foi notado que tais modos possuem atenuação alta inviabilizando qualquer estudo feito por meio de ondas ultrassônicas, após isso foram estudados os modos do metal em baixa frequência, onde se pode ver que quanto maior a camada de revestimento, maior atenuação. Após, foi estudado a geração de modos metálicos em altas frequências em uma camada de revestimento de polietileno onde se percebeu que quanto maior proximidade o entre os modos pertencentes a parte metálica e os modos do revestimento, maior a atenuação presente, os valores de cada modo estudado podem ser vistos em Tab. 3.15. Em seguida, foi estudado a troca do material, dessa vez foi estudado o revestimento de epóxi e os resultados dos modos foram comparados com os encontrados no estudo anterior com polietileno. Nesse estudo, percebeu-se novamente que os valores de atenuação dependem da proximidade entre os modos do metal e os modos do revestimento, para materiais diferentes, os modos do revestimento se encontravam em posições diferentes na curva de dispersão ocasionando aumento/redução de atenuação em alguns casos. Os valores de atenuação no novo material foram descritos na Tab. 3.25. Por fim, foi analisado o que acontece ao mudar os valores das constantes de atenuação e de velocidade de fase, onde a atenuação dos modos estudados varia aproximadamente igual a variação da constante e na velocidade de fase, a atenuação varia conforme as mudanças de aproximação/afastamento dos modos do revestimento.

A partir dos estudos realizados nesse capítulo, alguns modos foram considerados boas escolhas para aquele que deseja realizar um teste não-destrutivo sem ter de realizar um novo estudo de cada modo em cada material, por possuir menor atenuação em relação aos demais e a sua energia estar, em sua maior parte, na camada metálica, e, conseqüentemente, com pouca energia no revestimento viscoelástico. Para espessura de 1.0 mm de revestimento tem-se o modo 25 mm - 125 kHz, para 1.5 mm observa-se o modo 10 mm - 310 kHz, para 2.0 mm tem-se o modo 15 mm - 210 kHz e por fim em 2.5 mm o modo 20 mm - 160 kHz. Sendo o modo 10 mm - 310 kHz considerado a escolha mais ideal caso se deseje fazer um teste não-destrutivo sem qualquer estudo prévio.

No Cap. 4 foram estudadas regiões de operação em um modelo numérico de elementos finitos com o objetivo de confirmar o estudo analítico por meio de comparação entre os perfis dos modos obtidos no modelo analítico e no modelo numérico, e os valores de atenuação calculados pelos mesmos. Após, foi feita a análise de defeitos com os modos 25 mm - SH0 para espessura de 2.0 mm, e 20 mm - SH1 para espessura de 1.0 mm, pois possuem alta atenuação, implicando em uma maior dificuldade de analisar o eco de retorno proveniente do defeito, e os modos 25 mm -

SH1 para espessura de 2.0 mm, 20 mm - SH0 para espessura de 1.0 mm, 15 mm - SH0 para espessura de 1.5 mm, 15 mm - SH1 para espessura de 1.5 mm, 10 mm - SH0 para espessura de 1.5 mm, 10 mm - SH1 para espessura de 1.5 mm, pois possuem baixa atenuação, sendo possível analisar o eco de retorno.

4 Modelo de elementos finitos

4.1 Teoria

Estudos por meio de modelos numéricos são comumente usados [2,4,9,22,39,49] por permitir simulações com alta confiabilidade e de forma rápida, sendo mais comum a utilização de modelo de elementos finitos como explicado de forma completa em [1]. O objetivo do emprego do método de elementos finitos, do inglês *Finite Element Method* [2,39,40], e abreviado de FEM, aqui é confirmar os estudos realizados no Cap. 3, e a partir de tal confirmação realizar uma análise de defeitos para confirmar quais modos, de fato, não conseguem ser eficazes nesse tipo de NDT. Nesse trabalho tal foi utilizado o software, operante via nuvem, OnScale[®] [2,39,50] como simulador.

Como visto no Cap. 2, para placas cuja razão de raio interno pelo raio externo se aproxima da unidade, pode-se adotar as soluções obtidas em placas para dutos [1,2,7], o que facilita a análise. A geração das ondas SH foi realizado por meio de forças impostas imitando um padrão de PPM EMATs seguindo trabalhos anteriores [2,3,39], possibilitando diferentes modos com diferentes comprimentos de onda, possibilitando contemplando várias análises. Nessa dissertação, foi escolhido simular um PPM EMAT de 5 períodos excitado por um tone-burst de 8 ciclos senoidal da frequência do modo de interesse, como explicado na Sec. 2.2.4, aplicado na parte inferior da placa, conforme Fig. 4.1. Dessa forma, é possível gerar o modo de interesse, onde tanto o comprimento de onda e frequência podem ser definidos previamente.

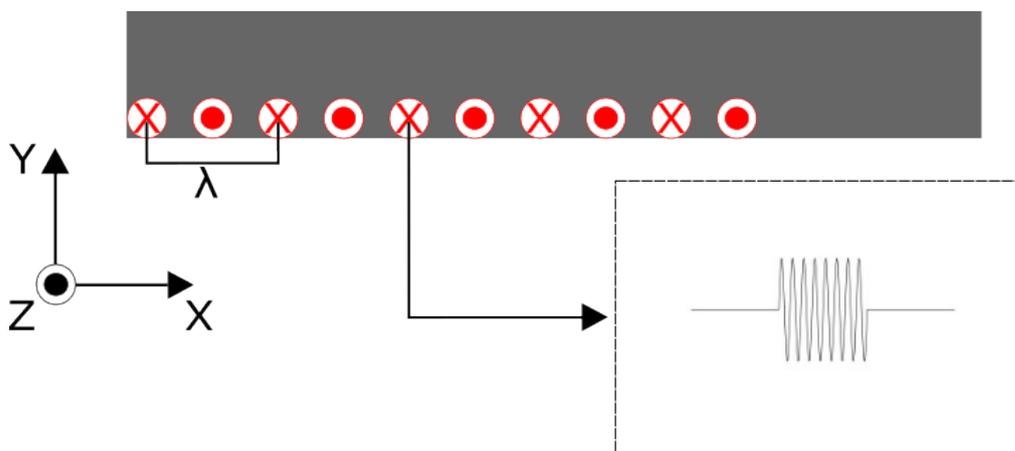


Figura 4.1: Padrão de PPM EMAT utilizado na parte inferior de uma placa. Onde os círculos vermelhos simulam as forças de Lorentz na direção z com o tone-burst de 8 ciclos e λ denota 1 período das forças que também identifica o comprimento de onda gerado.

Foi estabelecida uma geometria com as mesmas propriedades elásticas do caso

estudado pela Tab. 3.3, com a diferença desse ser realizado em uma placa. A placa exibida na Fig. 4.2 possui comprimento de 1 m, largura de 200 mm, espessura de aço de 6.35 mm, sendo necessária uma geometria tridimensional devido ao software escolhido não possuir atenuação para os modos SH em duas dimensões [50], e espessura variável do revestimento de polietileno, onde seu comportamento viscoelástico foi inserido por meio de sua velocidade da onda de corpo cisalhante, densidade e coeficiente de atenuação da onda-S, não sendo possível inserir um valor pré determinado, onde toda a explicação de como o modelo calcula a atenuação pode ser vista em [50]. Para as simulações de defeito, o mesmo foi posicionado no meio da placa com 10 mm de comprimento e 3 mm de altura. Foram adotadas como condições de contorno absorvedor, ou seja, a onda não é refletida e nem transmitida, sendo totalmente absorvida, nas direções x e z , de tal forma que impossibilita interferências de ondas refletidas, facilitando a análise, e colocada como livre na direção y , para ser atender as condições de geração de ondas guiadas SH. Foi adotado como saída do modelo, a componente z do campo de velocidade na posição (0, 100 mm) do plano xz a fim de calcular os perfis de modo.

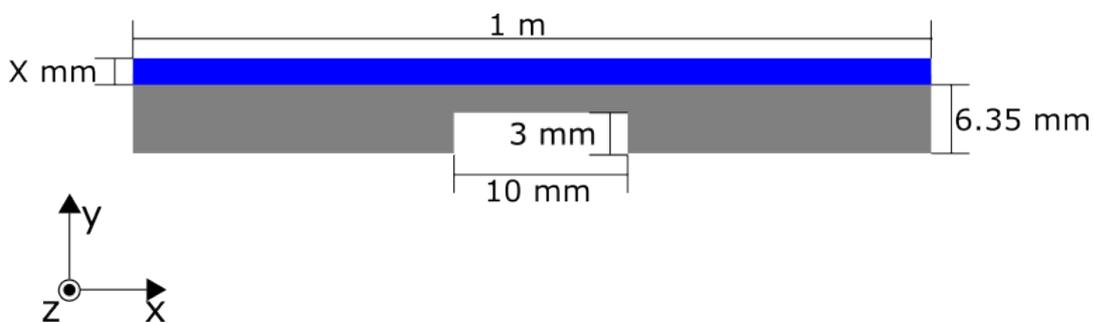


Figura 4.2: Geometria utilizada no modelo numérico. A parte cinza da placa denota a camada de aço de 6.35 mm e a azul denota o revestimento de espessura variável. Tal placa possui 1 metro de comprimento e defeito de 10 mm de comprimento e 3 mm de altura.

Inicialmente, foi feito um teste de convergência, onde são comumente utilizados 15 elementos por comprimento de onda [21, 39] para obter uma análise numérica adequada, porém, ao se tratar de uma análise numérica que busca maior precisão, faz-se necessário confirmar qual a quantidade ideal de elementos.

4.2

Teste de convergência

Assim como no Cap. 3, foi feito um teste de convergência para averiguar a quantidade ideal de elementos por comprimento de onda a fim de proporcionar compromisso adequado entre precisão numérica e custo computacional. Para esse teste a camada de revestimento foi removida para desconsiderar os efeitos viscoelásticos e a camada de aço foi reduzida para 5 mm. Dessa forma, o teste apresenta menor custo computacional, facilitando a comparação. Foi escolhido o modo SH0 com comprimento de onda de 20 mm, por estar em uma região monomodo, sem a possibilidade de gerar modos indesejados que podem influenciar negativamente no teste.

Neste teste foi calculado o erro médio quadrático, denotado na Eq. 4-1:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{8} \sum_{i=10}^{80} [(v_{z_i} - v_{z_{80}})^2]}, \quad (4-1)$$

onde i é a quantidade de elementos por comprimento de onda, v_{z_i} é a componente z do vetor de velocidade para essa quantidade de elementos. Assim como no Cap. 3, 80 elementos por comprimento de onda foram considerados como referência e o custo computacional foi retirado pelos dados da nuvem da plataforma de 2 CPUs do OnScale[®]. A Fig. 4.3 mostra as ondas propagadas de uma distância de 150 mm geradas do início da placa, a Fig. 4.4 mostra o custo temporal em minutos para aplicar o modelo, e a Fig. 4.5 mostra o erro médio quadrático do sinal exibido em relação ao sinal de referência.

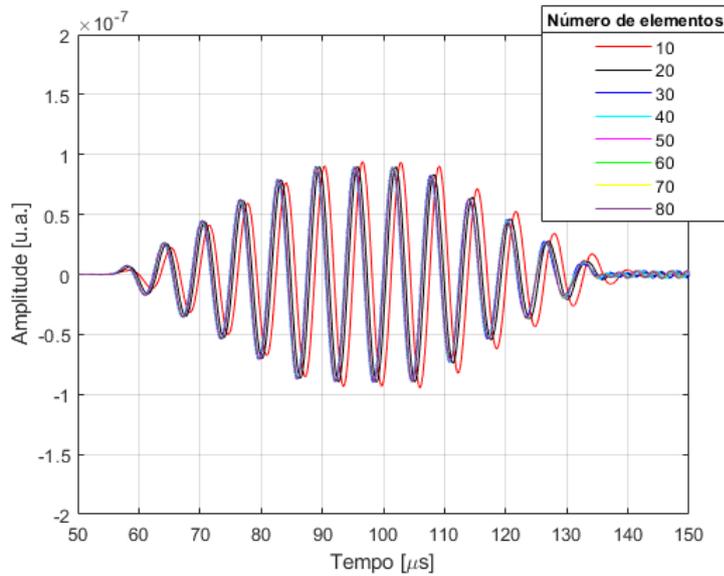


Figura 4.3: Sinal referente a velocidade de partícula na direção z do modo SH0 para 20 mm gerado no teste de convergência para diferentes quantidades de elementos por comprimento de onda gerado no início da placa e recebido em 150 mm.

Ao analisar a Fig. 4.4, pode-se ver que a cada 10 elementos o custo computacional sobe consideravelmente, por exemplo, 50 elementos possui um custo computacional de aproximadamente 150 minutos, inviabilizando medidas para espessuras maiores pois aumentará ainda mais tal custo. Baseado nos erros obtidos, percebe-se que 30 elementos é o mais ideal para as medições possuindo erro médio quadrático relativamente baixo com custo computacional aceitável. A partir desta análise, as simulações subsequentes foram feitas com quantidade de elementos por comprimento de onda igual a 30. A seguir, foi feita uma comparação entre os modelos estudados.

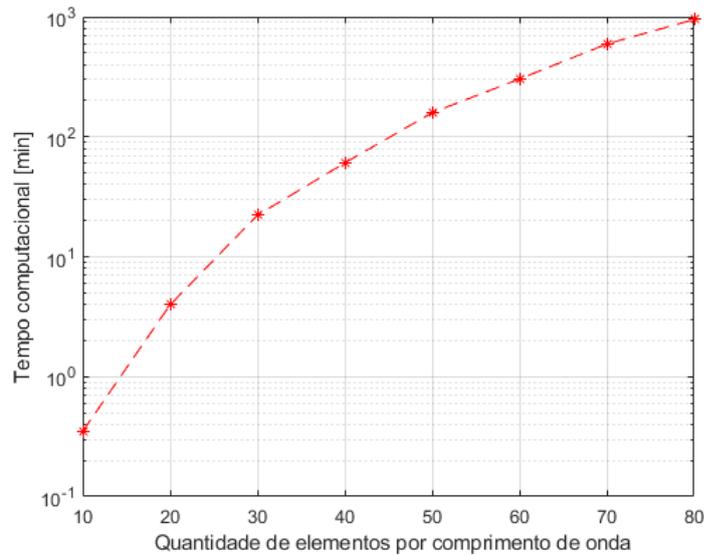


Figura 4.4: Custo computacional em minutos em função da quantidade de elementos por comprimento de onda.

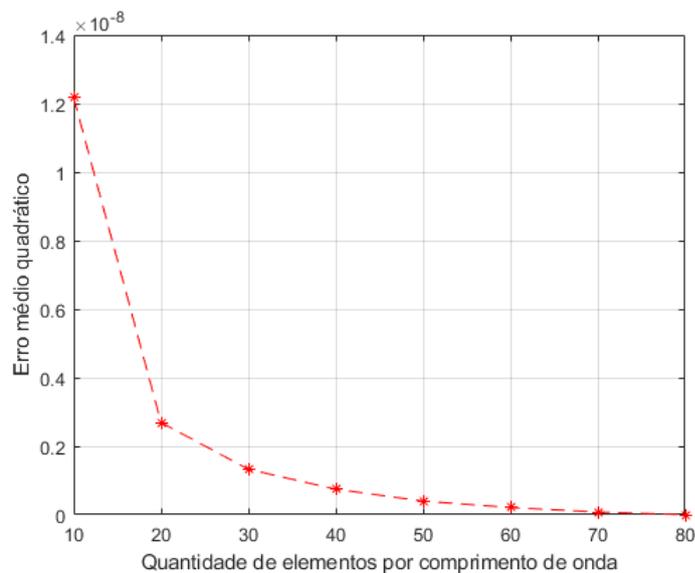


Figura 4.5: Erro médio quadrático calculado em função da quantidade de elementos por comprimento de onda.

4.3 Comparação com o modelo analítico

Uma vez determinado o número de elementos a ser utilizado, foi feito então uma comparação entre os modelos analítico e numérico. Para tal, o defeito não foi modelado a fim de analisar o comportamento da onda propagante e a atenuação causada pelos efeitos viscoelásticos da camada de revestimento.

A análise entre os modelos foi feita por meio de comparação entre os perfis de cada modo e também do valor de atenuação calculada. A geração das ondas foi feita de forma semelhante ao teste de convergência. Para os cálculos dos perfis dos modos, tais foram obtidos por meio de manipulações com as equações vistas no Cap. 2 e o

campo de velocidade obtido no modelo numérico. Para essa comparação ser possível, primeiramente foi calculada o vetor de velocidade teórico na direção z com base na Eq. 2-20 da seguinte forma:

$$v_z(x, y, z, t) = \frac{\partial u_z(x, y, z, t)}{\partial t} = -j\omega(A \sin(qy) + B \cos(qy))e^{j(kx - \omega t)}. \quad (4-2)$$

Ao escolher um determinado modo, implicando em uma frequência fixa ω_a , e analisando em uma posição específica, com exceção da direção y , para a saída do modelo numérico, tem-se a posição (0, 100 mm) no plano xz , obtém-se o campo de velocidade obtido pelo modelo numérico:

$$v_z(y, t) = -j\omega_a(A \sin(qy) + B \cos(qy))e^{-j\omega_a t}. \quad (4-3)$$

Com isso, pode-se normalizar o vetor de velocidade.

$$v_z(y, t)(\text{Normalizado}) = \frac{-j\omega_a(A \sin(qy) + B \cos(qy))e^{-j\omega_a t}}{\max[(-j\omega_a(A \sin(qy) + B \cos(qy))e^{-j\omega_a t})]}. \quad (4-4)$$

Conforme Eq. 4-4, pode-se ver que existem valores que se tornaram constantes. Dessa forma, pode-se reescrever o vetor normalizado da seguinte maneira:

$$v_z(y)(\text{Normalizado}) = \frac{A \sin(qy) + B \cos(qy)}{\max[A \sin(qy) + B \cos(qy)]}. \quad (4-5)$$

Dessa forma, obtém-se uma forma de analisar os perfis apenas analisando ao longo da espessura da placa. Pode-se também fazer a mesma análise para o vetor de deslocamento com a mesma frequência e posição do vetor de velocidade conforme Eq.4-6.

$$u_z(y)(\text{Normalizado}) = \frac{(A \sin(qy) + B \cos(qy))e^{-j\omega_a t}}{\max[(A \sin(qy) + B \cos(qy))e^{-j\omega_a t}]}. \quad (4-6)$$

Como pode ser visto, ao normalizar ambos os vetores, nota-se que ambos são iguais, ou seja, ao normalizar o vetor de velocidade de saída do modelo numérico e o vetor de deslocamento do modelo analítico se pode fazer uma comparação direta de seus perfis de deslocamento.

De acordo com o Rose et. al. [1], pode-se calcular a tensão da componente xz conforme Eq. 4-7.

$$\sigma_{xz}(x, y, z, t) = \mu \frac{\partial u_z}{\partial x} = jk\mu(A \sin(qy) + B \cos(qy))e^{j(kx - \omega t)}. \quad (4-7)$$

Dessa forma, escolhe-se os mesmos pontos de análise, a saber, (0, 100 mm) e frequência ω_a . Vale ressaltar que para um sistema de multicamadas, a segunda constante de Lamé varia na direção y . Normalizando a componente xz , tem-se:

$$\sigma_{xz}(y)(\text{Normalizado}) = \frac{\mu(y)}{\max(\mu(y))} \frac{(A \sin(qy) + B \cos(qy))e^{-j\omega_a t}}{\max[(A \sin(qy) + B \cos(qy))e^{-j\omega_a t}]}. \quad (4-8)$$

Dessa forma, pode-se ter $\sigma_{xz}(\text{Normalizado})$ em função do vetor de velocidade.

$$\sigma_{xz}(y)(\text{Normalizado}) = \frac{\mu(y)}{\max(\mu(y))} v_z(\text{Normalizado}). \quad (4-9)$$

Portanto, semelhante ao vetor de deslocamento, pode-se obter os perfis da componente xz do tensor de tensão em função do vetor de velocidade.

Por fim, para o vetor de Poynting, S_z , pode ser calculado como [1]:

$$S_z(x, y, z, t) = \frac{-1}{2} u_z \sigma'_{xz}. \quad (4-10)$$

Substituindo pelas suas formas normalizadas obtém-se:

$$S_z(y) = \frac{-1}{2} \frac{\mu(y)}{\max(\mu(y))} (v_z(\text{Normalizado}))^2. \quad (4-11)$$

Por fim, normalizando o vetor de Poynting tem-se:

$$S_z(y)(\text{Normalizado}) = \frac{\mu(y)}{\max(\mu(y))} (v_z(\text{Normalizado}))^2. \quad (4-12)$$

Portanto, pode-se denotar os perfis de forma normalizada em função do vetor de velocidade ao normalizá-los, de tal forma que é possível fazer uma comparação direta com os perfis obtidos no modelo analítico.

Já o cálculo de atenuação foi feito pela amplitude pico-a-pico da onda propagada ao longo da distância percorrida da onda na parte inferior da placa. Para o cálculo, foram fixadas as coordenadas do plano yz em (0, 100 mm) e frequência ω_a , e uma aproximação linear do vetor de velocidade em conjunto do fator de atenuação da Eq. 2-60 e da 2-61:

$$\text{Pico-a-Pico } \ln(v_z) = \text{Pico-a-Pico} [\alpha x + j(kx - \omega_a t) \ln(-j\omega_a (A \sin(qy_a) + B \cos(qy_a)))]. \quad (4-13)$$

Portanto, pode-se calcular a atenuação pela amplitude pico-a-pico do vetor de velocidade em função da posição do longo de x . Um fator determinante para o cálculo é em quais posições se devem escolher para fazer tal aproximação pois existem casos de excitação em regiões multimodais, por esse motivo as atenuações foram calculadas com distintos pontos ao longo do eixo x . Além disso, para compensar a difração ao longo do plano yz , foram feitas duas simulações, uma retirando a componente de atenuação de onda-S, para calcular tal efeito de difração, e outra com a componente de atenuação de onda-S ativa. Após, subtrai-se ambos os resultados para calcular a atenuação da onda sem considerar efeitos de difração ou perdas que não sejam provenientes do efeito do material viscoelástico.

Foi comparado com o valor obtido de atenuação pelo modelo analítico por meio de cálculo de erro visto na Eq. 4-14:

$$\text{Erro}(\%) = \frac{|\text{Att}_{ana} - \text{Att}_{num}|}{\text{Att}_{ana}} \times 100, \quad (4-14)$$

onde Att_{ana} é a atenuação calculada pelo modelo analítico e Att_{num} a atenuação calculada pelo modelo numérico. Assim como no Cap. 3, analisou-se em diferentes comprimentos de onda, a saber, 25 mm, 20 mm, 15 mm e, por fim, 10 mm, e com diferentes espessuras, a saber, para 25 mm foi escolhida a espessura de 2.0 mm onde pelo modelo analítico possui alta atenuação para 129 kHz e baixa atenuação para 285 kHz, para 20 mm foi escolhida a espessura de 1.0 mm onde pelo modelo analítico possui baixa atenuação para 160 kHz e alta para 300 kHz, e para 15 mm e 10 mm

foi escolhida espessura de 1.5 mm onde seus modos apresentaram baixa atenuação. Todo o processo para o cálculo de atenuação pode ser visto no apêndice A.

4.3.1

Comprimento de onda de 25 mm

Para o comprimento de onda de 25 mm foram estudados dos modos SH0 e os modos SH1 na espessura de 2.0 mm, conforme visto na Fig 4.6.

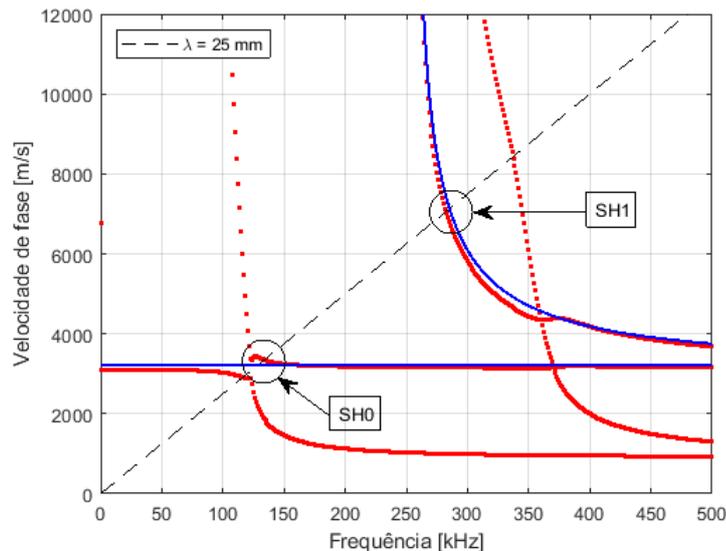


Figura 4.6: Curvas de dispersão para ondas SH em uma placa de aço de 6.35 mm e uma camada de revestimento de polietileno de 2.0 mm. As curvas em vermelho denotam a solução do modelo analítico, as curvas em azul denotam a velocidade de fase para a placa de aço de mesma espessura sem revestimento, e a linha tracejada denota a relação entre velocidade de fase e frequência para um comprimento de 25 mm.

Primeiramente foi estudado o modo SH0, e pelo estudo anterior tal modo excitado encontra-se próximo do primeiro modo do revestimento, o que implica em uma alta atenuação. Ao analisar os perfis, vistos na Fig. 4.7, pode-se ver que ambos os modelos convergem onde ambos são semelhantes e denotam a mesma característica de propagação e confirmando por meio do vetor de Poynting que a energia se concentra em sua maior parte na camada de revestimento. A atenuação calculada pelo modelo foi de 84.5889 dB/m, como visto na Fig. 4.8, e a Tab. 4.1 mostra a diferença da atenuação entre os modelos, confirmando que ambos os modelos estão alinhados.

Já para o modo SH1 para espessura de 2.0 mm, tem-se que o modo do metal encontra-se mais afastado ao modo do revestimento, o que implica em uma redução do valor de atenuação comparado ao caso anterior, e como se pode ver nos perfis vistos na Fig. 4.9, quase toda a energia se encontra na camada metálica. A atenuação calculada foi de 20.5497 dB/m, como visto na Fig. 4.10, e a Tab. 4.1 mostra a diferença entre ambos os modelos, mostrando que ambos convergem. A seguir foram analisados para 20 mm de comprimento de onda.

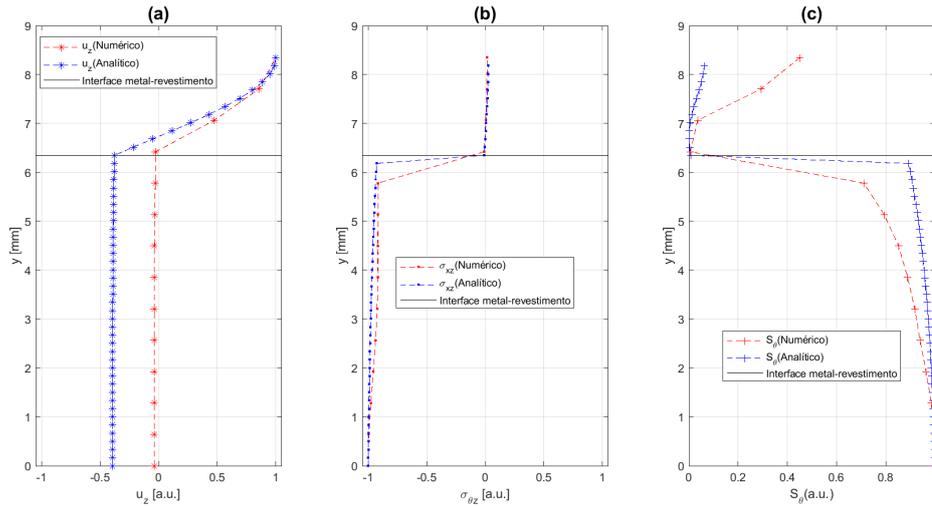


Figura 4.7: Perfis do modo em 129 kHz com comprimento de onda de 25 mm para uma espessura de revestimento de 2.0 mm, para modelo analítico (linha azul) e modelo numérico (linha vermelha). Em (a) tem-se a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) o fluxo de potência do vetor de Poynting normalizado. A linha em preto mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento.

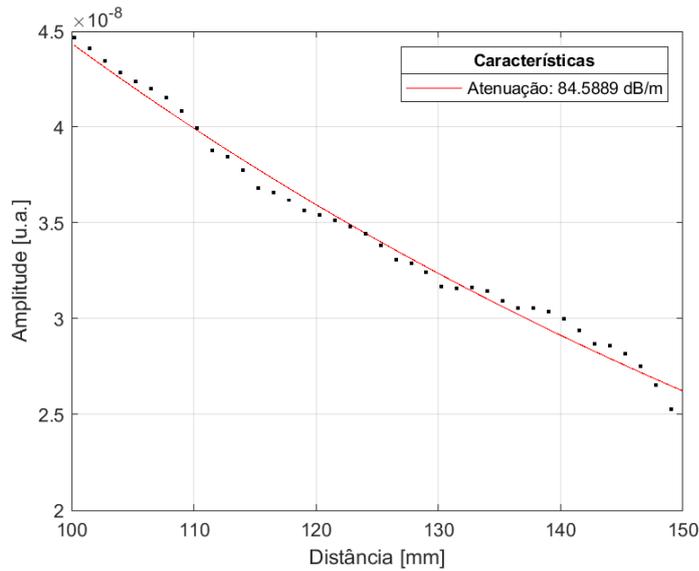


Figura 4.8: Amplitude pico-a-pico do vetor de velocidade do modo SH0 com 25 mm de comprimento de onda em uma placa de revestimento de polietileno de 2.0 mm de espessura. Os pontos pretos denotam os valores pico-a-pico do vetor de velocidade na direção z calculado pelo modelo no numérico e a linha vermelha a sua interpolação.

Modos estudados	Atenuação no modelo analítico (dB/m)	Atenuação no modelo numérico (dB/m)	Erro (%)
25 mm - SH0	82.164	84.5889	2.95
25 mm - SH1	22.915	20.5497	10.32

Tabela 4.1: Atenuação dos modos do metal com 25 mm de comprimento de onda para espessura de polietileno de 2.0 mm.

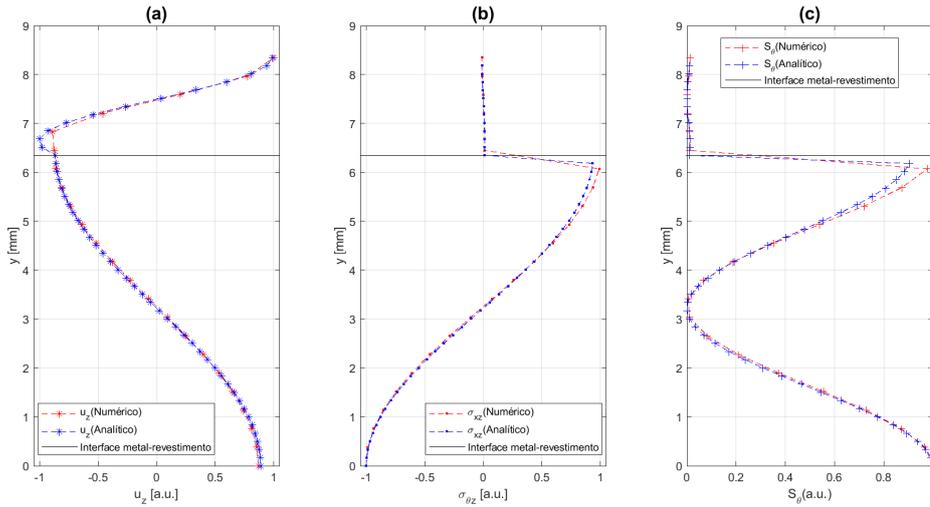


Figura 4.9: Perfis do modo em 285 kHz com comprimento de onda de 25 mm para uma espessura de revestimento de 2.0 mm, para modelo analítico (linha azul) e modelo numérico (linha vermelha). Em (a) tem-se a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) o fluxo de potência do vetor de Poynting normalizado. A linha em preto mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento.

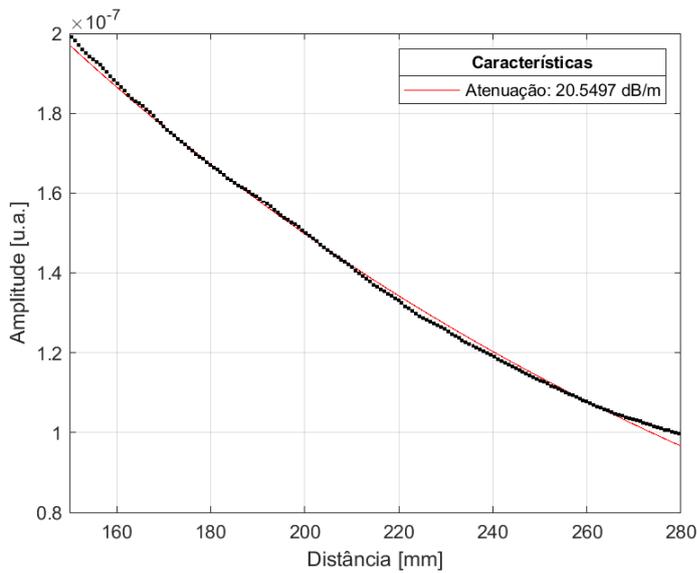


Figura 4.10: Amplitude pico-a-pico do vetor de velocidade do modo SH1 com 25 mm de comprimento de onda em uma placa de revestimento de polietileno de 2.0 mm de espessura. Os pontos pretos denotam os valores pico-a-pico do vetor de velocidade na direção z calculado pelo modelo no numérico e a linha vermelha a sua interpolação.

4.3.2 Comprimento de onda de 20 mm

Para o comprimento de onda de 20 mm foram estudados dos modos SH0 e os modos SH1 na espessura de 1.0 mm, conforme vistos na Fig. 4.11, e analisar os efeitos comparativos entre todos.

Primeiramente foi estudado o modo SH0, e pelo estudo anterior tal modo excitado encontra-se afastado do primeiro modo do revestimento, o que implica em

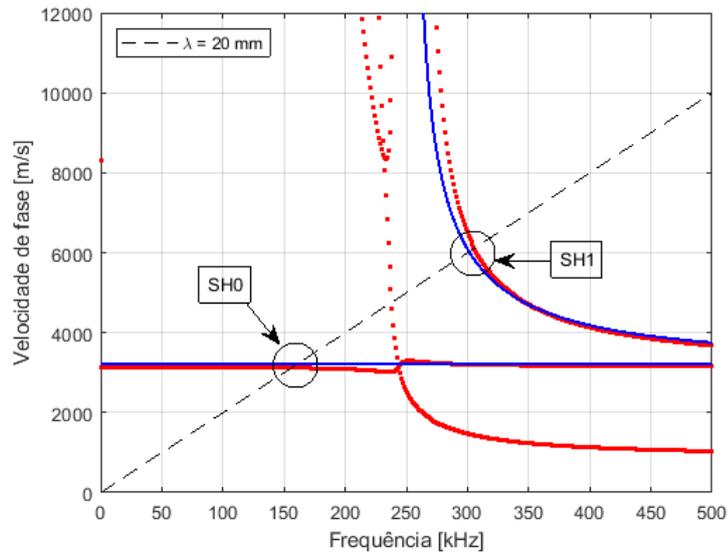


Figura 4.11: Curvas de dispersão para ondas SH em uma placa de aço de 6.35 mm e uma camada de revestimento de polietileno de 1.0 mm. As curvas em vermelho denotam a solução do modelo analítico, as curvas em azul denotam a velocidade de fase para a placa de aço de mesma espessura sem revestimento, e as linha tracejada denota a relação entre velocidade de fase e frequência para um comprimento de 20 mm.

baixa atenuação. Ao analisar os perfis, vistos na Fig. 4.12, pode-se ver que ambos os modelos convergem onde ambos são semelhantes e denotam a mesma característica de propagação e confirmando por meio do vetor de Poynting que a energia se concentra em sua maior parte na camada de aço. A atenuação calculada pelo modelo foi de 2.5673 dB/m, como visto na Fig. 4.13, e a Tab. 4.2 mostra a diferença da atenuação entre os modelos, confirmando que ambos os modelos estão alinhados.

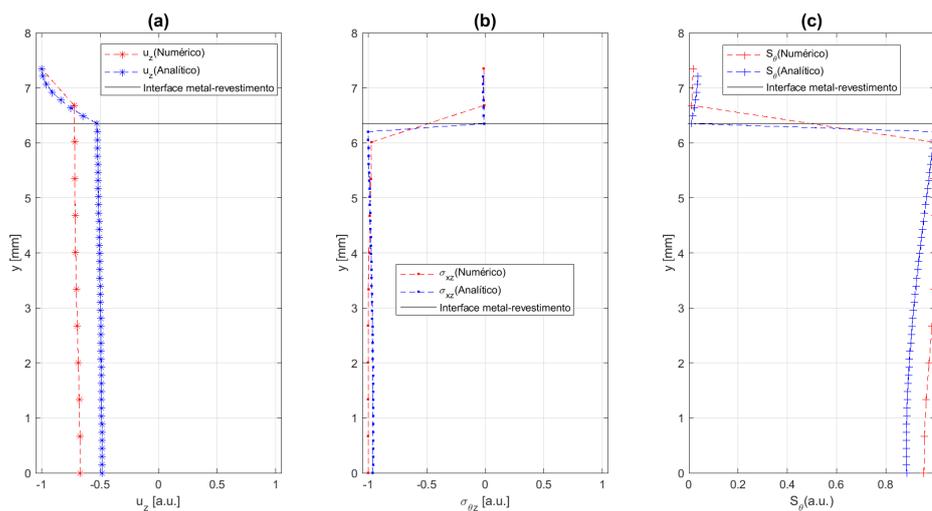


Figura 4.12: Perfis do modo em 160 kHz com comprimento de onda de 20 mm para uma espessura de revestimento de 1.0 mm, para modelo analítico (linha azul) e modelo numérico (linha vermelha). Em (a) tem-se a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) o fluxo de potência do vetor de Poynting normalizado. A linha em preto mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento.

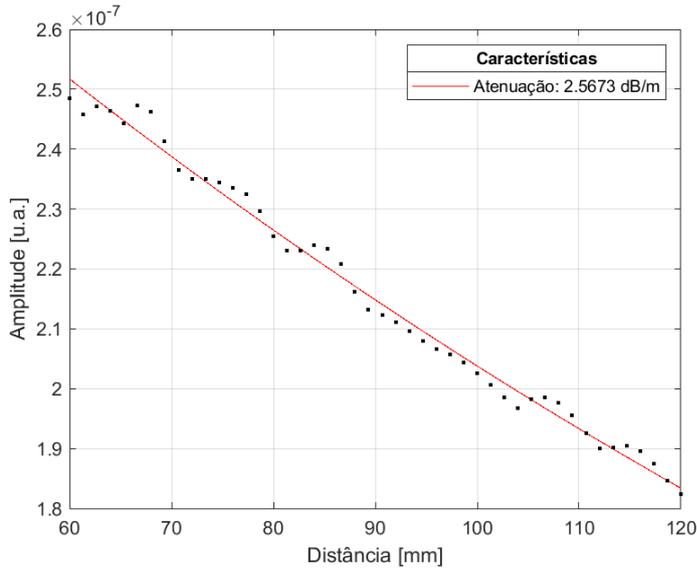


Figura 4.13: Amplitude pico-a-pico do vetor de velocidade do modo SH1 com 20 mm de comprimento de onda em uma placa de revestimento de polietileno de 1.0 mm de espessura. Os pontos pretos denotam os valores pico-a-pico do vetor de velocidade na direção z calculado pelo modelo no numérico e a linha vermelha a sua interpolação.

Já para o modo SH1 para espessura de 1.0 mm, tem-se que o modo do metal encontra-se mais próximo ao modo do revestimento, o que implica em um aumento do valor de atenuação comparado ao caso anterior, e como se pode ver nos perfis vistos na Fig. 4.14, há uma quantidade de energia maior na camada de revestimento. A atenuação calculada foi de 59.7491 dB/m, como visto na Fig. 4.15, e a Tab. 4.2 mostra a diferença entre ambos os modelos, mostrando que ambos convergem. A seguir foram analisados os modos para 15 mm de comprimento de onda.

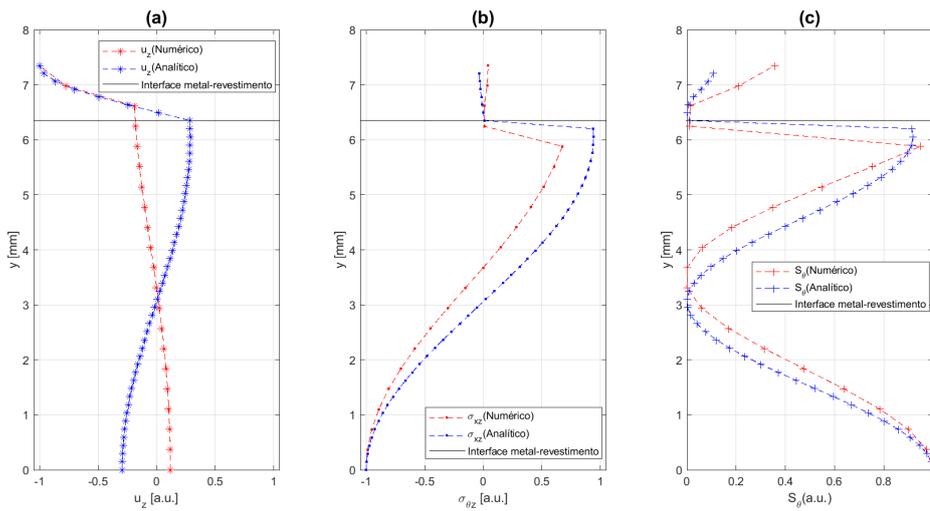


Figura 4.14: Perfis do modo em 300 kHz com comprimento de onda de 20 mm para uma espessura de revestimento de 1.0 mm, para modelo analítico (linha azul) e modelo numérico (linha vermelha). Em (a) tem-se a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) o fluxo de potência do vetor de Poynting normalizado. A linha em preto mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento.

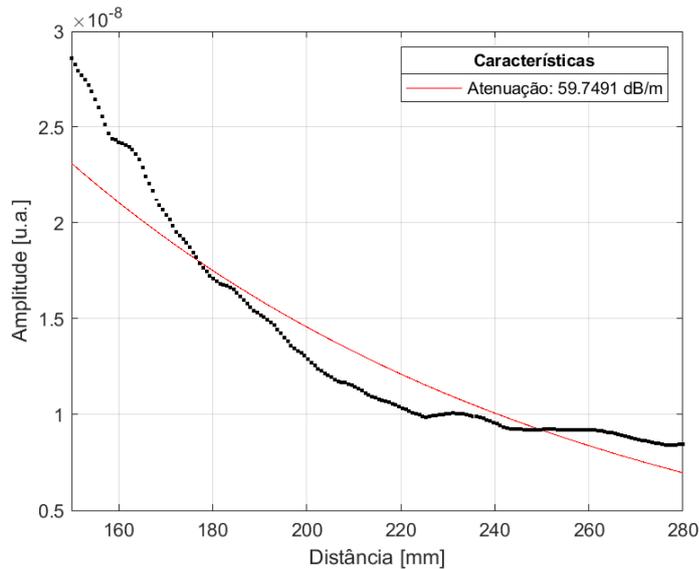


Figura 4.15: Amplitude pico-a-pico do vetor de velocidade do modo SH1 com 20 mm de comprimento de onda em uma placa de revestimento de polietileno de 1.0 mm de espessura. Os pontos pretos denotam os valores pico-a-pico do vetor de velocidade na direção z calculado pelo modelo no numérico e a linha vermelha a sua interpolação.

Modos estudados	Atenuação no modelo analítico (dB/m)	Atenuação no modelo numérico (dB/m)	Erro (%)
20 mm - SH0	2.664	2.5673	3.62
20 mm - SH1	60.682	59.7491	1.53

Tabela 4.2: Atenuação dos modos do metal com 20 mm de comprimento de onda para espessura de polietileno de 1.0 mm.

4.3.3

Comprimento de onda de 15 mm

Para o comprimento de onda de 15 mm foram estudados dos modos SH0 e os modos SH1, conforme Fig. 4.16, na espessura de 1.5 mm e analisar os efeitos comparativos entre todos.

Ambos os modos SH0 e SH1 possuem baixa atenuação por estarem mais afastados dos modos do revestimento. Ao analisar os perfis em SH0, vistos na Fig. 4.17, pode-se ver que ambos os modelos convergem onde ambos são semelhantes e denotam a mesma característica de propagação. A atenuação calculada pelo modelo foi de 14.9454 dB/m, como visto na Fig. 4.18, e a Tab. 4.3 mostra a diferença da atenuação entre os modelos, confirmando que ambos os modelos estão alinhados.

Já para os perfis do modo SH1, vistos na Fig. 4.19, confirmam, por meio do vetor de Poynting, que a quantidade de energia se encontra maior na camada de metálica. A atenuação calculada foi de 59.7491 dB/m, como visto na Fig. 4.20, e a Tab. 4.3 mostra a diferença entre ambos os modelos, mostrando que ambos convergem. A seguir foram analisados os modos para 10 mm de comprimento de onda.

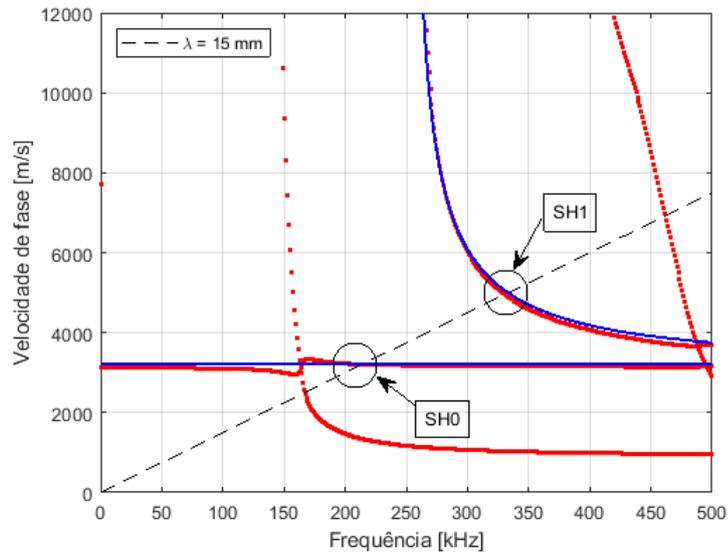


Figura 4.16: Curvas de dispersão para ondas SH em uma placa de aço de 6.35 mm e uma camada de revestimento de polietileno de 1.5 mm. As curvas em vermelho denotam a solução do modelo analítico, as curvas em azul denotam a velocidade de fase para a placa de aço de mesma espessura sem revestimento, e as linha tracejada denota a relação entre velocidade de fase e frequência para um comprimento de 15 mm.

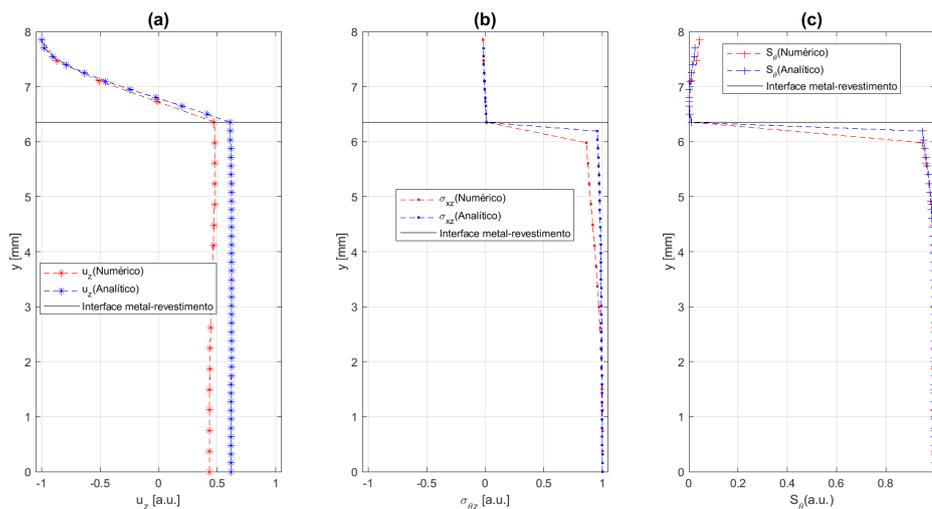


Figura 4.17: Perfis do modo em 215 kHz com comprimento de onda de 15 mm para uma espessura de revestimento de 1.5 mm, para modelo analítico (linha azul) e modelo numérico (linha vermelha). Em (a) tem-se a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) o fluxo de potência do vetor de Poynting normalizado. A linha em preto mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento.

Modos estudados	Atenuação no modelo analítico (dB/m)	Atenuação no modelo numérico (dB/m)	Erro (%)
15 mm - SH0	13.719	13.7537	0.25
15 mm - SH1	11.531	12.5676	1.53

Tabela 4.3: Atenuação dos modos do metal com 15 mm de comprimento de onda para espessura de polietileno de 1.5 mm.

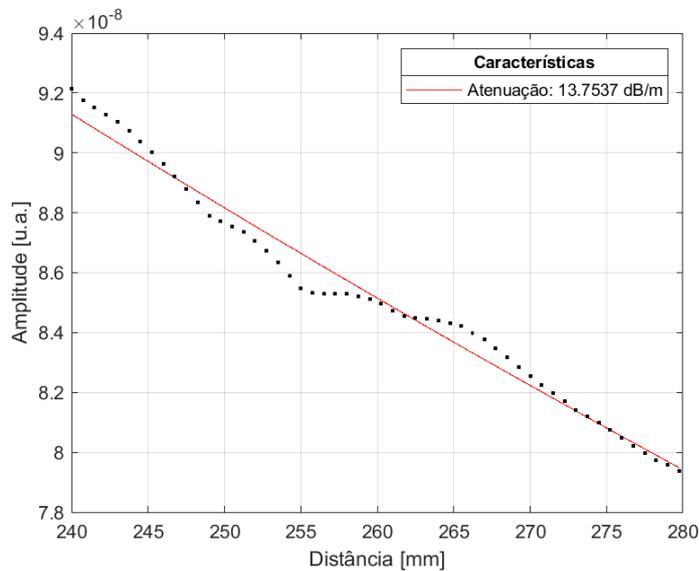


Figura 4.18: Amplitude pico-a-pico do vetor de velocidade do modo SH0 com 15 mm de comprimento de onda em uma placa de revestimento de polietileno de 1.5 mm de espessura. Os pontos pretos denotam os valores pico-a-pico do vetor de velocidade na direção z calculado pelo modelo no numérico e a linha vermelha a sua interpolação.

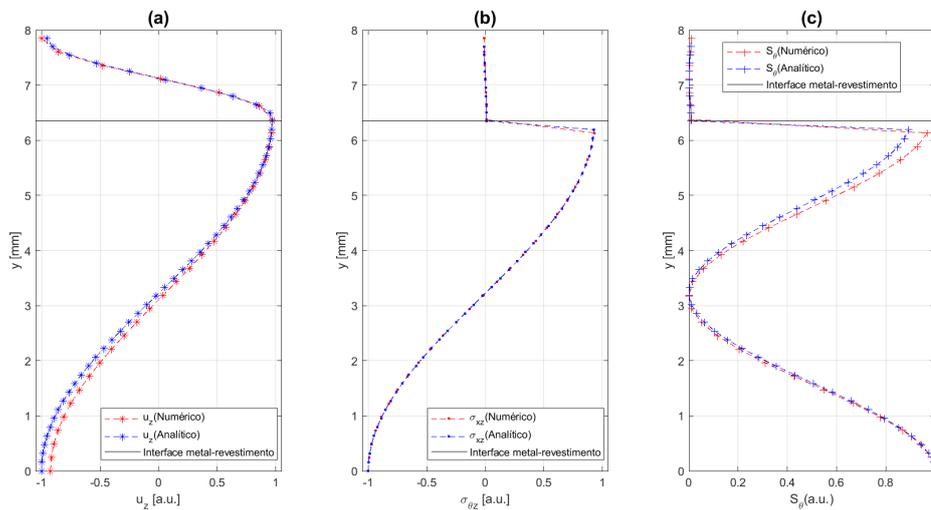


Figura 4.19: Perfis do modo em 330 kHz com comprimento de onda de 15 mm para uma espessura de revestimento de 1.5 mm, para modelo analítico (linha azul) e modelo numérico (linha vermelha). Em (a) tem-se a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) o fluxo de potência do vetor de Poynting normalizado. A linha em preto mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento.

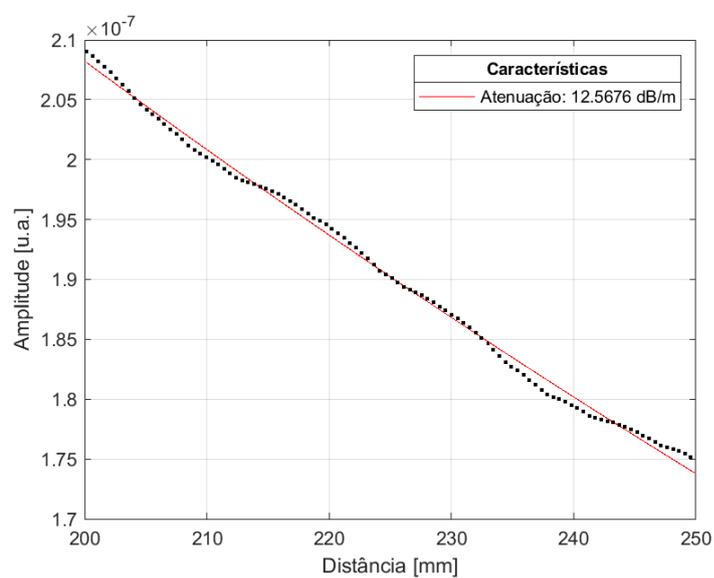


Figura 4.20: Amplitude pico-a-pico do vetor de velocidade do modo SH1 com 15 mm de comprimento de onda em uma placa de revestimento de polietileno de 1.5 mm de espessura. Os pontos pretos denotam os valores pico-a-pico do vetor de velocidade na direção z calculado pelo modelo no numérico e a linha vermelha a sua interpolação.

4.3.4 Comprimento de onda de 10 mm

Por fim, para o comprimento de onda de 10 mm, foram estudados os modos SH0 e SH1 para a espessura de 1.5 mm conforme vistos em Fig. 4.21.

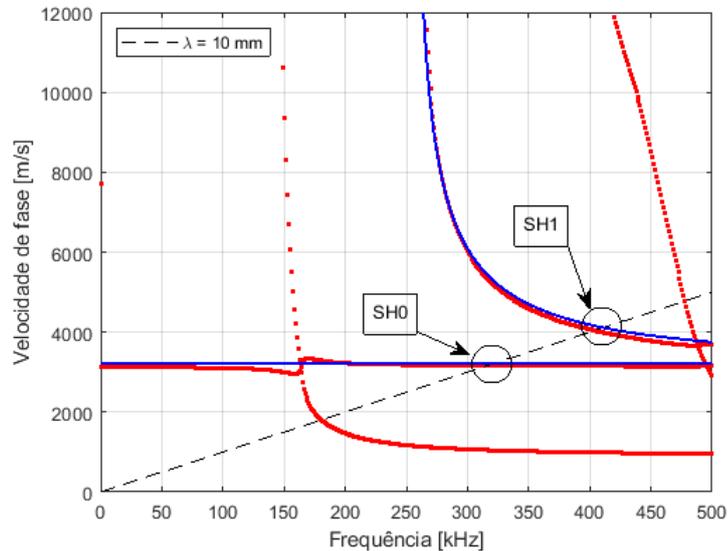


Figura 4.21: Curvas de dispersão para ondas SH em uma placa de aço de 6.35 mm e uma camada de revestimento de polietileno de 1.5 mm. As curvas em vermelho denotam a solução do modelo analítico, as curvas em azul denotam a velocidade de fase para a placa de aço de mesma espessura sem revestimento, e a linha tracejada denota a relação entre velocidade de fase e frequência para um comprimento de 10 mm.

O modo SH0, conforme visto anteriormente, possui baixa atenuação devido a distância entre o modo do metal e do revestimento. Como se pode ver na Fig. 4.22, os perfis de ambos os modelos convergem e pode-se ver, por meio do vetor de Poynting, que a energia está concentrada na camada de aço. A atenuação calculada foi de 4.28 dB/m, como visto na Fig. 4.23 e como se pode ver na Tab. 4.4 ambos os modelos confirmam a atenuação do modo excitado.

Já para o modo SH1 para espessura de 1.5 mm, tem-se que o modo do metal se aproximou mais do modo do revestimento, o que implica em um aumento do valor de atenuação comparado ao caso anterior, mas, como se pode ver nos perfis vistos na Fig. 4.24, a energia ainda se encontra mais concentrada na camada metálica. A atenuação calculada foi de 59.7491 dB/m, como visto na Fig. 4.25, e a Tab. 4.4 mostra a diferença entre ambos os modelos, mostrando que ambos convergem.

Modos estudados	Atenuação no modelo analítico (dB/m)	Atenuação no modelo numérico (dB/m)	Erro (%)
10 mm - SH0	4.322	4.28	0.97
10 mm - SH1	17.665	17.2403	2.41

Tabela 4.4: Atenuação dos modos do metal com 10 mm de comprimento de onda para espessura de polietileno de 1.5 mm.

Dessa forma, é possível visualizar que ambos os modelos convergem e denotam o mesmo comportamento das ondas dado que para calcular a atenuação de ondas

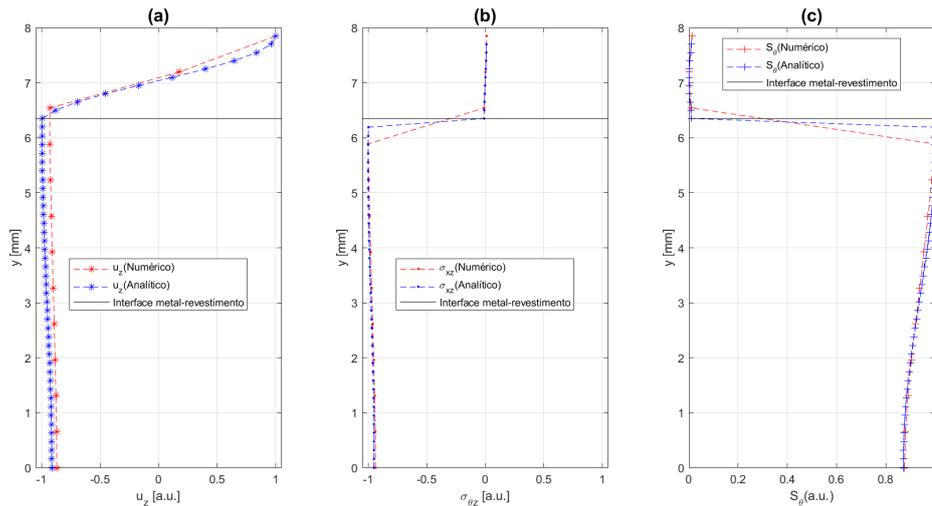


Figura 4.22: Perfis do modo em 310 kHz com comprimento de onda de 10 mm para uma espessura de revestimento de 1.5 mm, para modelo analítico (linha azul) e modelo numérico (linha vermelha). Em (a) tem-se a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) o fluxo de potência do vetor de Poynting normalizado. A linha em preto mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento.

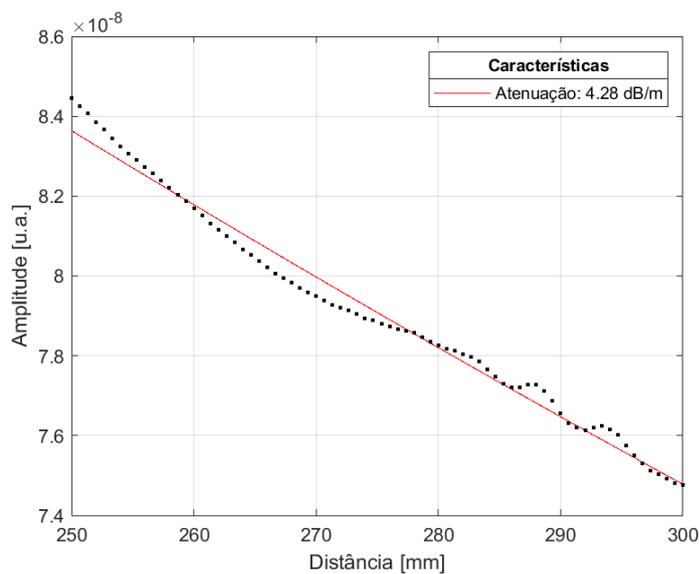


Figura 4.23: Amplitude pico-a-pico do vetor de velocidade do modo SH0 com 10 mm de comprimento de onda em uma placa de revestimento de polietileno de 1.5 mm de espessura. Os pontos pretos denotam os valores pico-a-pico do vetor de velocidade na direção z calculado pelo modelo no numérico e a linha vermelha a sua interpolação.

guiadas SH. A seguir, foram feitas as análises de defeitos para os modos estudados nessa seção.

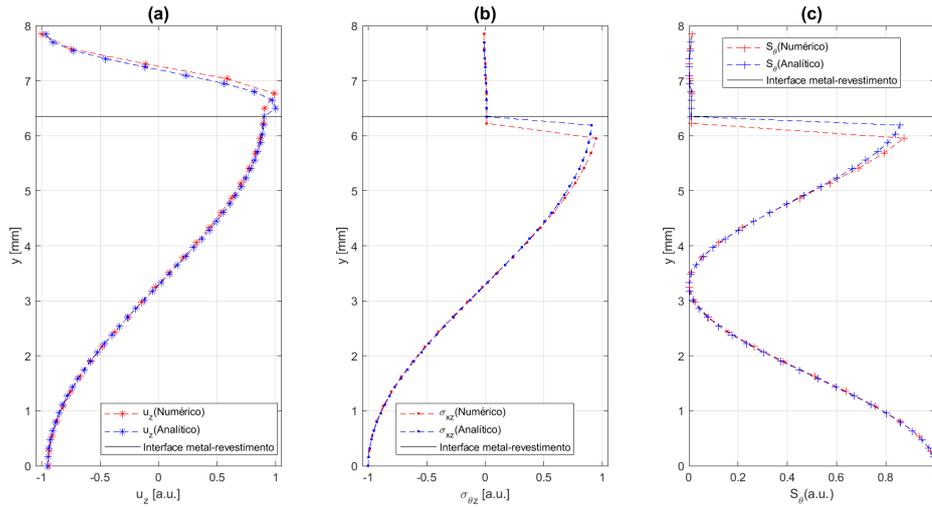


Figura 4.24: Perfis do modo em 400 kHz com comprimento de onda de 10 mm para uma espessura de revestimento de 1.5 mm, para modelo analítico (linha azul) e modelo numérico (linha vermelha). Em (a) tem-se a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) o fluxo de potência do vetor de Poynting normalizado. A linha em preto mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento.

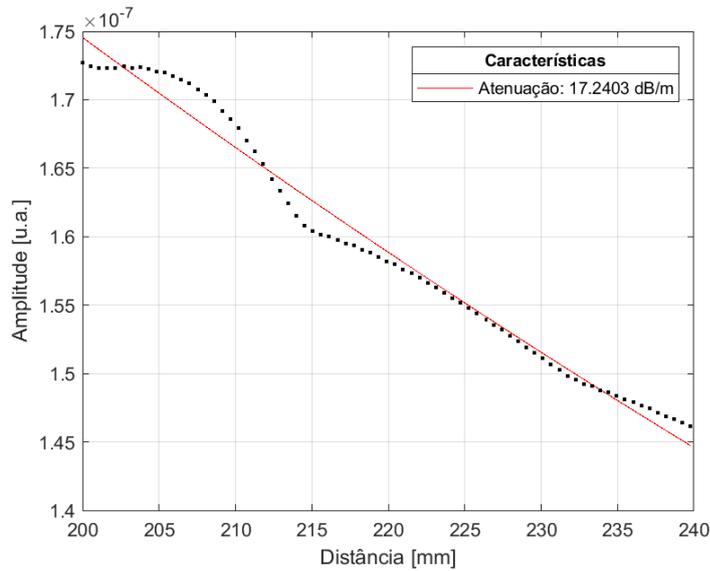


Figura 4.25: Amplitude pico-a-pico do vetor de velocidade do modo SH1 com 10 mm de comprimento de onda em uma placa de revestimento de polietileno de 1.5 mm de espessura. Os pontos pretos denotam os valores pico-a-pico do vetor de velocidade na direção z calculado pelo modelo no numérico e a linha vermelha a sua interpolação.

4.4

Análise de defeitos

Por fim, foi feita a análise de defeitos. Para isso, foi inserido o defeito conforme exibido na Fig. 4.2. Para visualizar seu efeito na propagação de ondas SH, foi comparado o sinal na placa sem e com o mesmo. No último deve ser possível observar o eco de retorno. Ambos os sinais foram detectados a $x = 300$ mm. E também exibido um mapa de cor cuja abscissa representa a distância à posição de excitação na direção

x na parte inferior da placa, a ordenada representa o tempo, e a cota representa o campo de velocidade, onde é possível localizar com precisão o defeito por meio da reflexão da onda nele incidente. Foram analisados tanto os modos SH0 quanto o SH1 para os casos estudados na Sec. 4.3. O objetivo é mostrar se o modo estudado é uma boa escolha para análise de defeitos. Todo o processo para o cálculo do campo de velocidade e do mapa de cor pode ser visto no apêndice D. Primeiramente, foi estudado para o comprimento de onda de 25 mm.

4.4.1

Análise de detecção de defeitos em comprimento de onda de 25 mm

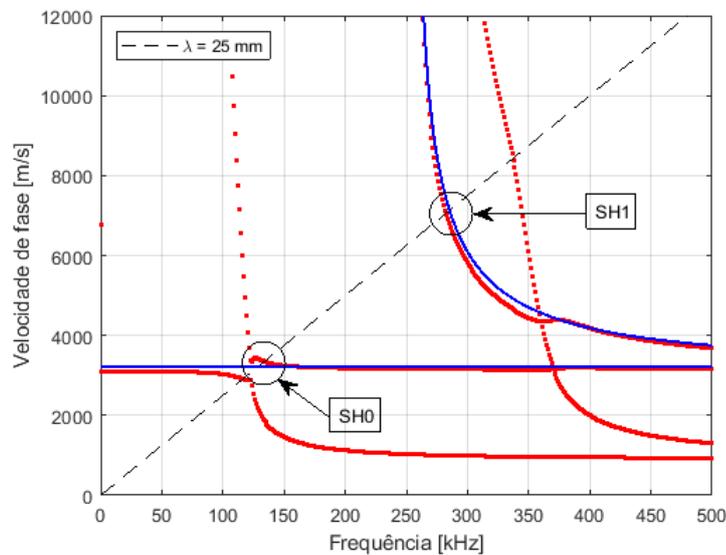


Figura 4.26: Curvas de dispersão para ondas SH em uma placa de aço de 6.35 mm e uma camada de revestimento de polietileno de 2.0 mm. As curvas em vermelho denotam a solução do modelo analítico, as curvas em azul denotam a velocidade de fase para a placa de aço de mesma espessura sem revestimento, e a linha tracejada denota a relação entre velocidade de fase e frequência para um comprimento de 25 mm.

Para comprimento de onda de 25 mm foram estudados ambos os modos SH0 e SH1, vistos na Fig. 4.26, os quais possuem atenuação, com uma camada de polietileno de 2 mm, de aproximadamente 82 dB/m e 23 dB/m, respectivamente de acordo com Sec. 4.3, Tab. 4.1. Primeiramente, foi analisado o modo SH0. Como se pode ver na Fig. 4.27, devido à alta atenuação não se consegue distinguir o defeito no mapa de cor, dado que não há um feixe contrário a propagação dado que, em aproximadamente 200 mm, a onda já havia sido atenuada quase completamente. Isso mostra que, de fato, esse modo não é uma boa escolha para análise de defeito.

Já com o modo SH1, como se pode ver na Fig. 4.28, consegue-se detectar o defeito dado que, no mapa de cor, há um feixe de baixa amplitude retornando na localização do defeito e também se percebe uma quebra da propagação de onda em torno de 500 mm, onde o mesmo se localiza. Embora o modo possua dispersão, é possível detectar, mesmo com baixa amplitude, o eco de retorno, mostrando que tal modo é uma boa escolha para análise de defeitos.

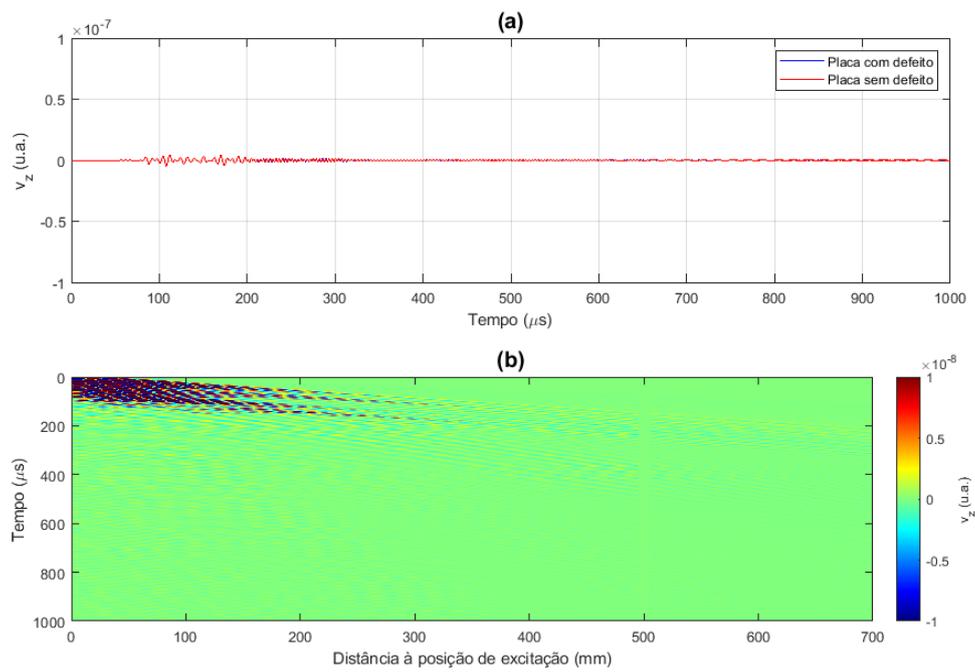


Figura 4.27: Forma de onda do campo de velocidade na direção z SH0 em 125 kHz com comprimento de onda de 25 mm. Em (a) mostra-se a onda SH detectada em 300 mm, no qual a curva em vermelho é a onda propagando em uma placa sem defeitos e a curva em azul é a onda propagando em uma placa com defeito. Em (b) mostra-se o mapa de cor da onda propagando na parte inferior da placa, onde a abscissa é a distância à posição de excitação na direção x na parte inferior da placa, a ordenada é o tempo, e a cota, a amplitude do campo de velocidade.

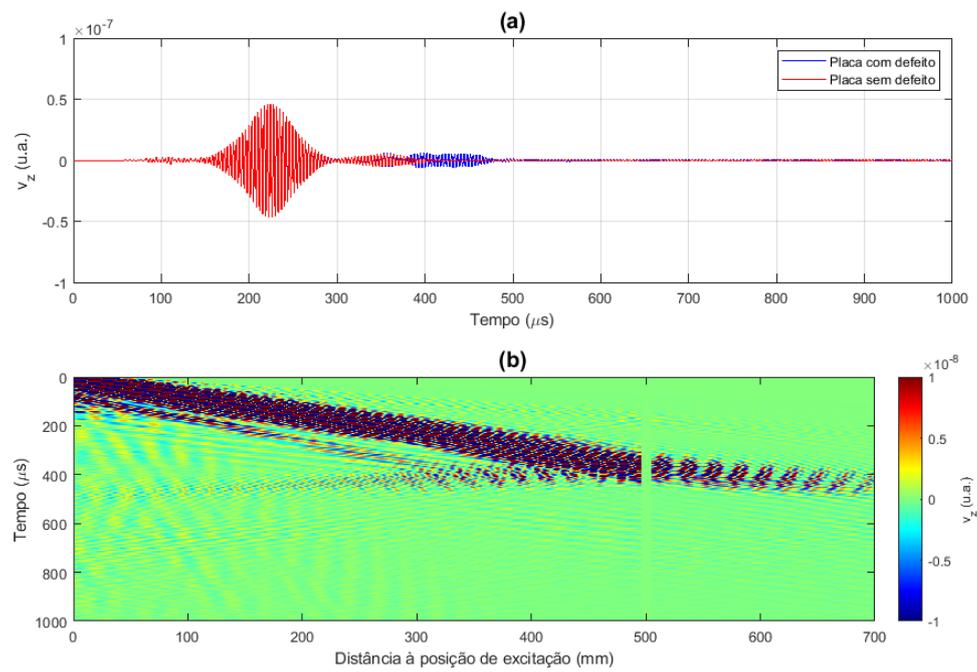


Figura 4.28: Forma de onda do campo de velocidade na direção z do modo SH1 em 285 kHz com comprimento de onda de 25 mm. Em (a) mostra-se a onda SH detectada em 300 mm, no qual a curva em vermelho é a onda propagando em uma placa sem defeitos e a curva em azul é a onda propagando em uma placa com defeito. Em (b) mostra-se o mapa de cor da onda propagando na parte inferior da placa, onde a abscissa é a distância à posição de excitação na direção x na parte inferior da placa, a ordenada é o tempo, e a cota, a amplitude do campo de velocidade.

4.4.2

Análise de detecção de defeitos em comprimento de onda de 20 mm

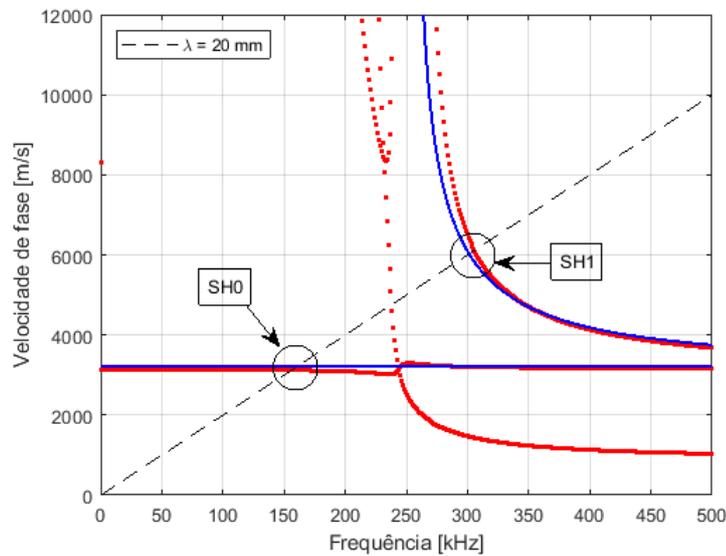


Figura 4.29: Curvas de dispersão para ondas SH em uma placa de aço de 6.35 mm e uma camada de revestimento de polietileno de 1.0 mm. As curvas em vermelho denotam a solução do modelo analítico, as curvas em azul denotam a velocidade de fase para a placa de aço de mesma espessura sem revestimento, e a linha tracejada denota a relação entre velocidade de fase e frequência para um comprimento de 20 mm.

Para comprimento de onda de 20 mm, também foram estudados os modos SH0 e SH1, conforme vistos na Fig. 4.11, nos quais possuem atenuação para uma camada de 1 mm de polietileno de aproximadamente 3 dB/m e 60 dB/m respectivamente. Primeiramente foi visto o modo SH0, onde, como se pode ver na Fig. 4.30, devido à baixa atenuação é possível claramente identificar o defeito no mapa de cor, dado que há uma quebra em torno de 500 mm, e um eco retornando com alta amplitude.

Já com o modo SH1, como se pode ver na Fig. 4.31, diferentemente do caso anterior, não foi possível detectar o defeito. Semelhante ao caso SH0 de 25 mm, a onda foi quase completamente atenuada por volta de 200 mm, tornando inviável realizar uma análise de defeito com esse modo.

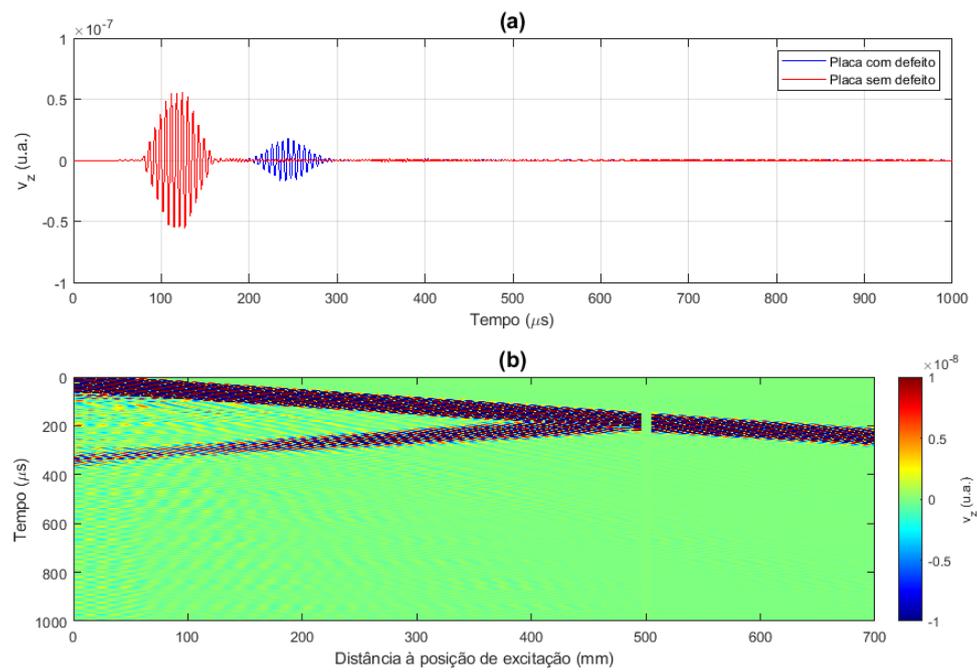


Figura 4.30: Forma de onda do campo de velocidade na direção z do modo SH0 em 160 kHz com comprimento de onda de 20 mm. Em (a) mostra-se a onda SH detectada em 300 mm, no qual a curva em vermelho é a onda propagando em uma placa sem defeitos e a curva em azul é a onda propagando em uma placa com defeito. Em (b) mostra-se o mapa de cor da onda propagando na parte inferior da placa, onde a abscissa é a distância à posição de excitação na direção x na parte inferior da placa, a ordenada é o tempo, e a cota, a amplitude do campo de velocidade.

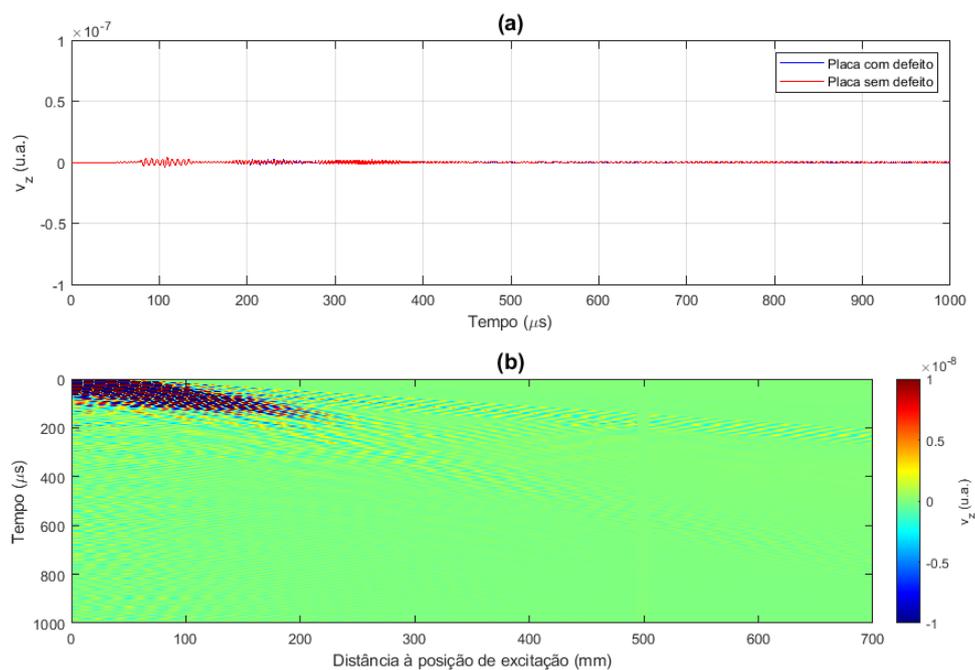


Figura 4.31: Forma de onda do campo de velocidade na direção z do modo SH1 em 300 kHz com comprimento de onda de 20 mm. Em (a) mostra-se a onda SH detectada em 300 mm, no qual a curva em vermelho é a onda propagando em uma placa sem defeitos e a curva em azul é a onda propagando em uma placa com defeito. Em (b) mostra-se o mapa de cor da onda propagando na parte inferior da placa, onde a abscissa é a distância à posição de excitação na direção x na parte inferior da placa, a ordenada é o tempo, e a cota, a amplitude do campo de velocidade.

4.4.3

Análise de detecção de defeitos em comprimento de onda de 15 mm

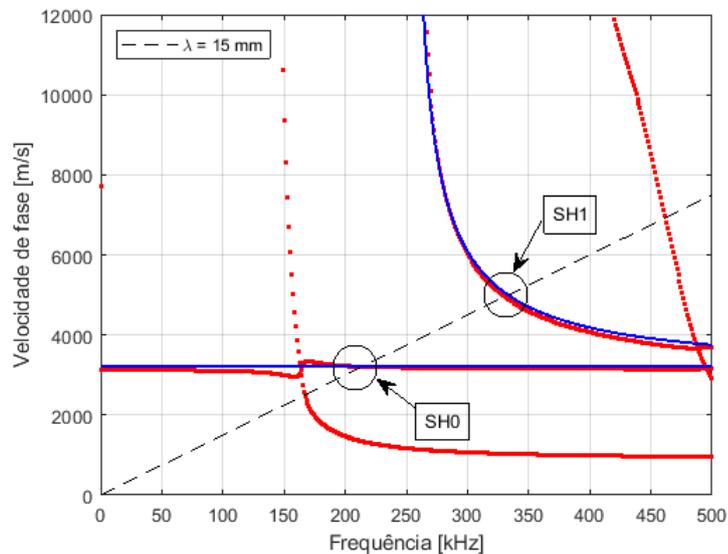


Figura 4.32: Curvas de dispersão para ondas SH em uma placa de aço de 6.35 mm e uma camada de revestimento de polietileno de 1.5 mm. As curvas em vermelho denotam a solução do modelo analítico, as curvas em azul denotam a velocidade de fase para a placa de aço de mesma espessura sem revestimento, e as linha tracejada denota a relação entre velocidade de fase e frequência para um comprimento de 15 mm.

Para comprimento de onda de 15 mm, também foram estudados os modos SH0 e SH1, como vistos na Fig. 4.32, nos quais possuem atenuação, para uma camada de 1.5 mm de polietileno, de aproximadamente 14 dB/m e 12 dB/m, respectivamente. Primeiramente foi visto o modo SH0, onde, como se pode ver na Fig. 4.33, devido à baixa atenuação é possível ver o defeito no mapa de cor, devido a quebra de propagação em 500 mm, e um eco retornando com relativa alta amplitude.

O mesmo acontece com o modo SH1, como se pode ver na Fig. 4.34, onde se foi possível detectar o defeito tanto ao ver um eco retornando e no mapa de cor, com a única diferença de esse modo ser dispersivo, o que confirma a menor amplitude do eco gerado. Por fim, foi estudado para 10 mm de comprimento de onda.

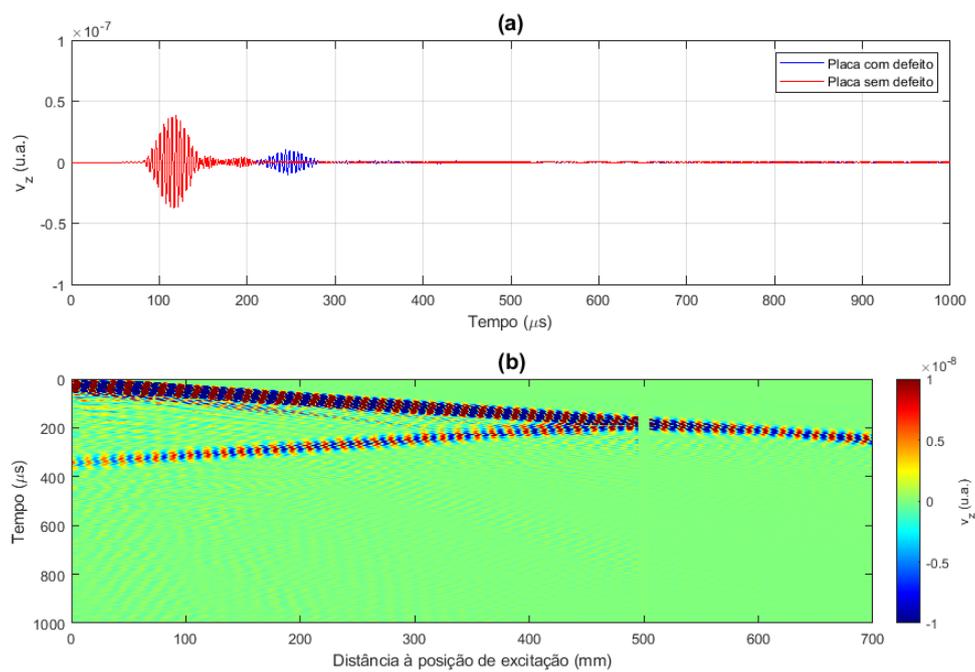


Figura 4.33: Forma de onda do campo de velocidade na direção z do modo SH0 em 210 kHz com comprimento de onda de 15 mm. Em (a) mostra-se a onda SH detectada em 300 mm, no qual a curva em vermelho é a onda propagando em uma placa sem defeitos e a curva em azul é a onda propagando em uma placa com defeito. Em (b) mostra-se o mapa de cor da onda propagando na parte inferior da placa, onde a abscissa é a distância à posição de excitação na direção x na parte inferior da placa, a ordenada é o tempo, e a cota, a amplitude do campo de velocidade.

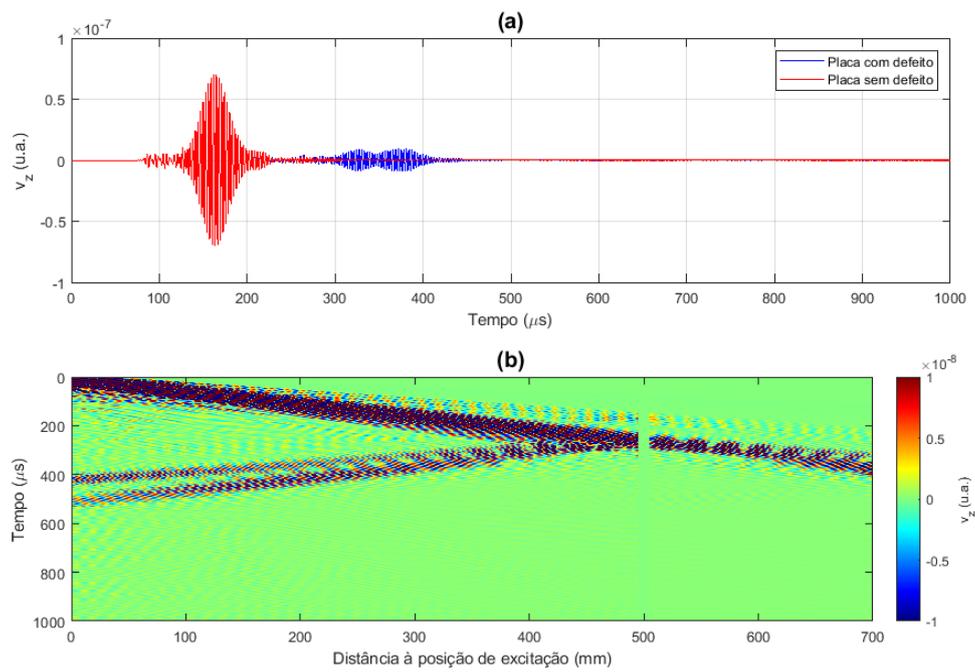


Figura 4.34: Forma de onda do campo de velocidade na direção z do modo SH1 em 330 kHz com comprimento de onda de 15 mm. Em (a) mostra-se a onda SH detectada em 300 mm, no qual a curva em vermelho é a onda propagando em uma placa sem defeitos e a curva em azul é a onda propagando em uma placa com defeito. Em (b) mostra-se o mapa de cor da onda propagando na parte inferior da placa, onde a abscissa é a distância à posição de excitação na direção x na parte inferior da placa, a ordenada é o tempo, e a cota, a amplitude do campo de velocidade.

4.4.4

Análise de detecção de defeitos em comprimento de onda de 10 mm

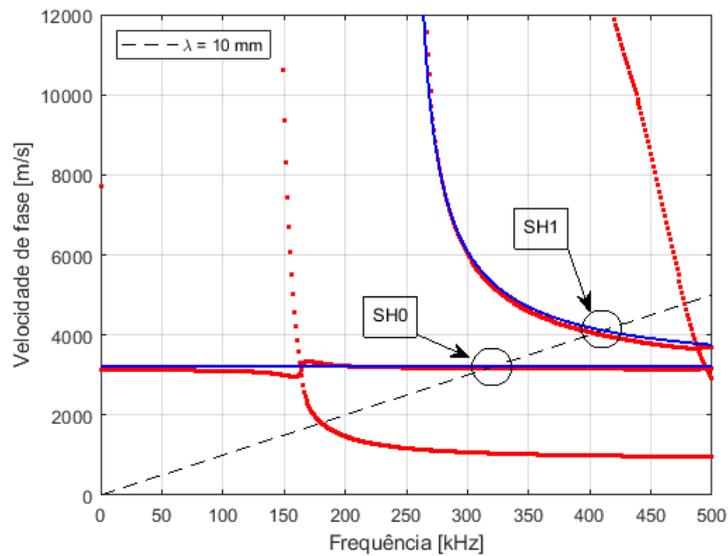


Figura 4.35: Curvas de dispersão para ondas SH em uma placa de aço de 6.35 mm e uma camada de revestimento de polietileno de 1.5 mm. As curvas em vermelho denotam a solução do modelo analítico, as curvas em azul denotam a velocidade de fase para a placa de aço de mesma espessura sem revestimento, e as linha tracejada denota a relação entre velocidade de fase e frequência para um comprimento de 10 mm.

Para comprimento de onda de 10 mm também foram estudados os modos SH0 e SH1, de acordo com a Fig. 4.35, os quais possuem atenuação, para uma camada de 1.5 mm de polietileno, de aproximadamente 4 dB/m e 18 dB/m respectivamente. Primeiramente foi visto o modo SH0, onde, mais uma vez, como se pode ver na Fig. 4.36, devido à baixa atenuação é possível ver o defeito no mapa de cor e um eco retornando com relativa alta amplitude mesmo operando em região multimodal.

O mesmo acontece com o modo SH1, porém com uma menor clareza devido a atenuação ser maior em relação ao modo anterior e o modo SH1 possuir comportamento dispersivo, como se pode ver na Fig. 4.37, onde se foi possível detectar o defeito tanto ao ver um eco retornando e no mapa de cor, por meio da quebra de propagação, com a diferença de esse modo ser dispersivo, o que confirma a menor amplitude do eco gerado.

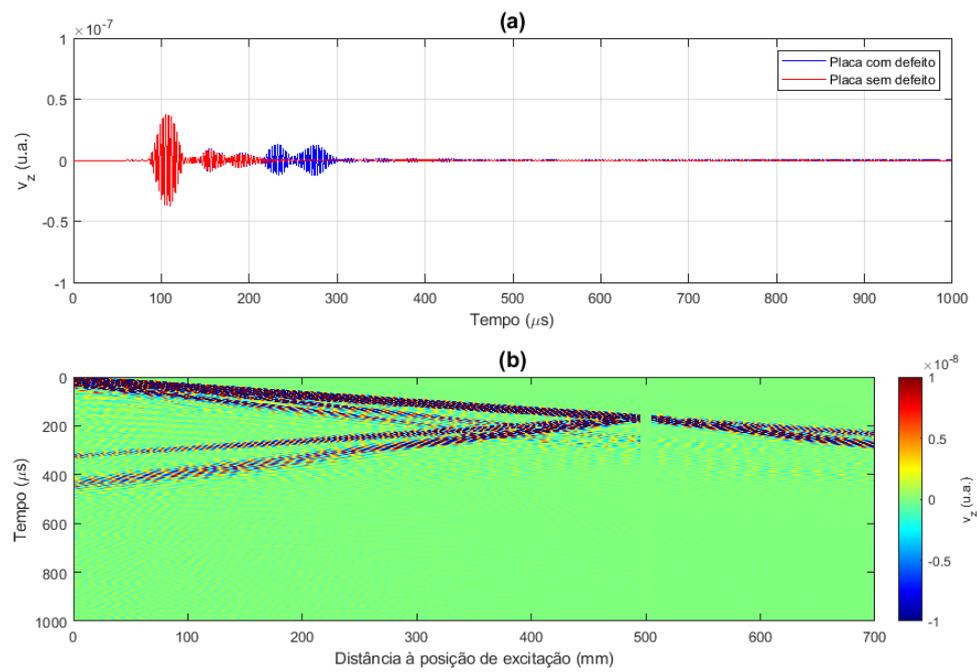


Figura 4.36: Forma de onda do campo de velocidade na direção z do modo SH0 em 310 kHz com comprimento de onda de 10 mm. Em (a) mostra-se a onda SH detectada em 300 mm, no qual a curva em vermelho é a onda propagando em uma placa sem defeitos e a curva em azul é a onda propagando em uma placa com defeito. Em (b) mostra-se o mapa de cor da onda propagando na parte inferior da placa, onde a abscissa é a distância à posição de excitação na direção x na parte inferior da placa, a ordenada é o tempo, e a cota, a amplitude do campo de velocidade.

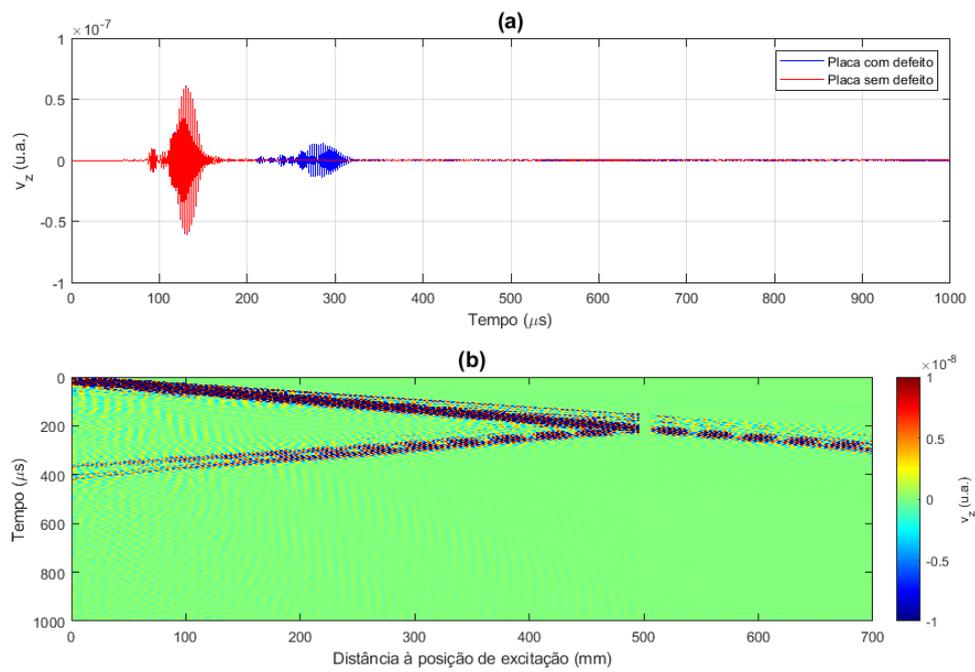


Figura 4.37: Forma de onda do campo de velocidade na direção z do modo SH1 em 400 kHz com comprimento de onda de 10 mm. Em (a) mostra-se a onda SH detectada em 300 mm, no qual a curva em vermelho é a onda propagando em uma placa sem defeitos e a curva em azul é a onda propagando em uma placa com defeito. Em (b) mostra-se o mapa de cor da onda propagando na parte inferior da placa, onde a abscissa é a distância à posição de excitação na direção x na parte inferior da placa, a ordenada é o tempo, e a cota, a amplitude do campo de velocidade.

4.5

Conclusão

Neste capítulo foi utilizado um software comercial de elementos finitos com objetivo de analisar numericamente a propagação dos modos SH em uma placa de características semelhantes a um duto. Primeiro, foi feito um teste de convergência para averiguar quantos elementos por comprimento de onda são suficientes para fazer uma análise precisa com baixo custo computacional, e, concluiu-se que 30 elementos são adequados. Depois, foram comparados os modelos numérico e analítico, onde a atenuação calculada apresentou um erro máximo de 10%, confirmando que ambos modelos mostram boa concordância. Por fim, foi feita uma análise de defeitos, onde com os modos 25 mm - SH1, 20 mm - SH0, ambos os modos de 15 e 10 mm foi possível detectar o defeito, enquanto com os modos 25 mm - SH0 e 20 mm - SH1, não foi possível analisar o defeito pois possuem alta atenuação.

Esse estudo mostrou que é possível compreender as características de propagação de ondas SH na presença de meios viscoelásticos onde, devido as propriedades desses meios, podem afetar consideravelmente a análise de tais modos. Ao analisar o contexto dos modelos vistos nos Cap. 3 e Cap. 4, notou-se que alguns modos que seriam uma boa escolha para o duto/placa nu, como exemplo 25 mm - SH0 para 1 mm de espessura de polietileno, podem ser uma escolha ruim justamente devido à proximidade de modos do revestimento, que aumentam consideravelmente a atenuação. O modo que apresentou melhor desempenho foi o modo SH0 com comprimento de onda de 10 mm, onde mesmo operando em região multimodal, o mesmo apresentou baixa proximidade dos modos do revestimento, e, devido ao seu menor comprimento de onda, possui maior frequência, o que é preferível para análise de defeitos [23], sendo ideal para uma escolha em caso de desconhecimento das características das propriedades do espécimen a ser estudado. Porém, vale ressaltar a importância desse estudo pois, ao saber a característica do duto a ser estudado, é possível escolher o modo ideal, i.e., aquele que apresenta baixa atenuação e também opera em região monomodo.

5 Conclusão

Em duto, devido a necessidade de proteção de seu material metálico contra a corrosão, há necessidade de inserir uma camada de revestimento. A mesma interfere na propagação de tais ondas SH [2,3]. OS materiais utilizados como revestimento apresentam comportamento viscoelásticos e as suas características acústicas afetam diretamente a escolha de qual modo utilizar em um espécime de duas ou mais camadas, especialmente comparado a um duto de uma única camada metálica. Desse modo é mister o entendimento das características de propagação para ter um ambiente de ensaios confiável.

Esta dissertação contemplou uma investigação de quais modos SH possuem melhor desempenho para análise de defeitos em um duto revestido de uma camada de revestimento viscoelástico, por meio de análise de perfis de cada modo e a respectiva atenuação a qual os mesmos estão submetidos, devido a presença da camada de revestimento. Ambos foram calculados pelo modelo analítico demonstrado no Cap. 3 e confirmados pelo modelo numérico no Cap. 4. Foi mostrado que a atenuação é proveniente da presença do revestimento viscoelástico e que quando a energia dos modos de onda propagante está concentrada nesta camada, implica em maior atenuação. Conseqüentemente, ao excitar um modo próximo ao que foi denominado nessa dissertação como modo do revestimento, a energia que, originalmente, estaria concentrada na camada metálica, encontra-se no revestimento causando um aumento considerável de atenuação. Tal conclusão, foi feita por meio de análise de perfis dos modos, mais especificamente pelo vetor de Poynting que ilustra onde tal energia se concentra, sendo possível averiguar quais modos possuem baixa ou alta atenuação.

Foram comparados os resultados de um modelo analítico e um método numérico implementado no software comercial de elementos finitos OnScale[®] para avaliar quais modos possuem baixa atenuação ou não, e como eles se propagam em uma placa de característica semelhante ao duto analisado. Tal software comercial escolhido foi utilizado para confirmar o modelo analítico, através de uma comparação direta dos perfis obtidos por meio da saída do defeito e um cálculo de atenuação e depois analisar defeitos. Em seguida, foi confirmado que alguns modos possuem alta atenuação, a saber, 25 mm - SH0 para espessura de 2 mm de polietileno e 20 mm - SH1 para espessura de 1 mm de polietileno, devido à proximidade de um modo do revestimento e que os mesmos, ao serem submetidos a uma análise de defeitos, não são viáveis para detecção de defeitos. O modo com melhor desempenho, tanto analiticamente e numericamente, foi o 10 mm - SH0 para um duto de 6.35 mm de espessura de metal e espessura variável de revestimentos, pois apresentou atenuação relativamente baixa para todos os casos estudados dessa apresentação, sendo uma primeira escolha para

uma análise sem conhecer a característica do duto/placa em questão. Todavia, há de se valorar esse estudo pois outros modos apresentaram baixa atenuação, como exemplo os que foram abordados no Cap.4, a saber, SH0 e SH1 com comprimentos de onda de 25 mm, 20 mm, 15 mm e 10 mm, SH1 em 25mm - 285 kHz, SH0 em 20 mm - 160 kHz, SH0 em 15 mm - 210 kHz, SH1 em 15 mm - 330 kHz, SH0 em 10 mm - 310 kHz e SH1 em 10 mm - 400 kHz, apresentando atenuação aproximada de 21 dB/m, 3 dB/m, 15 dB/m, 13 dB/m, 4 dB/m e 17 dB/m, respectivamente, e clara identificação do defeito através de sua refletividade.

5.1

Trabalhos futuros

Trabalhos futuros podem generalizar ainda mais esse estudo com o objetivo de melhorar ainda mais a análise de defeitos em placas ou dutos revestidos.

Abranger novos casos com dutos onde a sua razão de raio interno por raio externo seja imprópria para aproximação por placas utilizada nessa dissertação.

Analisar outras possíveis figuras de mérito e suas influências para uma análise de defeitos, por exemplo, dispersão, facilidade de excitação dos modos, fator de confinamento dos modos, entre outros.

Realizar uma modelagem numérica que inclua o acoplamento acústico-eletromagnético de EMATs e a sua direta influência em uma análise de defeitos.

Uma investigação experimental, é sugerido com defeito em uma placa ou duto de características semelhantes com o objetivo de validar experimentalmente esse estudo. Desse modo, pode-se mostrar o quanto os modos chamados de modos do revestimento podem influenciar em uma análise precisa de defeitos.

Outra possibilidade é refazer tal tipo de análise para outros tipos de ondas guiadas ultrassônicas dado que ondas SH não dependem a primeira constante de Lamé.

Ondas de Lamb circunferenciais, por exemplo, a primeira constante de Lamé também possui componentes complexas [1], sendo necessário fazer também um estudo para averiguar quais modos possuem baixa ou alta atenuação.

Referências bibliográficas

- [1] J. L. Rose, *Ultrasonic guided waves in solid media*. Cambridge university press, 2014.
- [2] C. M. Nascimento, L. M. Martinho, and A. C. Kubrusly, “Numerical investigation of the propagation characteristics of shear horizontal guided wave modes in coated pipes,” in *2021 IEEE UFFC Latin America Ultrasonics Symposium (LAUS)*. IEEE, 2021, pp. 1–4.
- [3] M. Clough, M. Fleming, and S. Dixon, “Circumferential guided wave EMAT system for pipeline screening using shear horizontal ultrasound,” *NDT & E International*, vol. 86, pp. 20–27, 2017.
- [4] A. C. Kubrusly and S. Dixon, “Application of the reciprocity principle to evaluation of mode-converted scattered shear horizontal (SH) wavefields in tapered thinning plates,” *Ultrasonics*, vol. 117, p. 106544, 2021.
- [5] J. Mu and J. L. Rose, “Guided wave propagation and mode differentiation in hollow cylinders with viscoelastic coatings,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 124, no. 2, pp. 866–874, 2008.
- [6] O. Trushkevych, M. Tabatabaeipour, S. Dixon, M. D. Potter, G. Dobie, C. Macleod, and R. S. Edwards, “Miniaturised SH EMATs for fast robotic screening of wall thinning in steel plates,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 21, no. 2, pp. 1386–1394, 2020.
- [7] J. K. Van Velsor, *Circumferential guided waves in elastic and viscoelastic multilayered annuli*. The Pennsylvania State University, 2009.
- [8] C. Nascimento, I. Saboia, and A. C. Kubrusly, “Comparison of three configurations of permanent magnetic arrays for electromagnetic acoustic transducer,” in *2020 Brazilian Congress of Electromagnetism*.
- [9] P. Petcher and S. Dixon, “Mode mixing in shear horizontal ultrasonic guided waves,” *Nondestructive testing and Evaluation*, vol. 32, no. 2, pp. 113–132, 2017.
- [10] M. Hirao and H. Ogi, *EMATs for science and industry: noncontacting ultrasonic measurements*. Springer Science & Business Media, 2003.
- [11] R. Benegal, F. Karimi, T. Filleter, and A. N. Sinclair, “Optimization of periodic permanent magnet configuration in lorentz-force EMATs,” *Research in Nondestructive Evaluation*, vol. 29, no. 2, pp. 95–108, 2018.

- [12] X. Chen, R. Su, H. Zhang, S. Wang, and G. Zhai, “Influence of coil parameters on transduction performance of unidirectional EMATs for rayleigh wave,” in *2013 Far East Forum on Nondestructive Evaluation/Testing: New Technology and Application*. IEEE, 2013, pp. 150–154.
- [13] S. Huang, H. Sun, Q. Wang, S. Wang, and W. Zhao, “Unidirectional focusing of horizontally polarized shear elastic waves electromagnetic acoustic transducers for plate inspection,” *Journal of Applied Physics*, vol. 125, no. 16, p. 164504, 2019.
- [14] Q. Ma, J. Jiao, P. Hu, X. Zhong, B. Wu, and C. He, “Excitation and detection of shear horizontal waves with electromagnetic acoustic transducers for nondestructive testing of plates,” *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, vol. 27, no. 2, pp. 428–436, 2014.
- [15] K. R. Leonard and M. K. Hinders, “Lamb wave tomography of pipe-like structures,” *Ultrasonics*, vol. 43, no. 7, pp. 574–583, 2005.
- [16] D. Alleyne and P. Cawley, “The excitation of Lamb waves in pipes using dry-coupled piezoelectric transducers,” *Journal of Nondestructive Evaluation*, vol. 15, pp. 11–20, 1996.
- [17] O. Büyüköztürk, M. A. Taşdemir, and V. Giurgiutiu, “Embedded NDT with piezoelectric wafer active sensors,” in *Nondestructive Testing of Materials and Structures*. Springer, 2013, pp. 987–992.
- [18] B. Maxfield and Z. Wang, “Electromagnetic acoustic transducers for nondestructive evaluation,” *ASM Handbook*, vol. 17, pp. 214–237, 2018.
- [19] R. Ribichini, “Modelling of electromagnetic acoustic transducers,” Ph.D. dissertation, Department of Mechanical Engineering, Imperial College London, 2011.
- [20] V. Garcia, C. Boyero, and J. A. J. Garrido, “Corrosion detection under pipe supports using EMAT medium range guided waves,” in *19th World Conference on Non-Destructive Testing, Munich, Germany*, 2016, pp. 13–17.
- [21] A. C. Kubrusly, M. A. Freitas, J. P. von der Weid, and S. Dixon, “Mode selectivity of SH guided waves by dual excitation and reception applied to mode conversion analysis,” *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, vol. 65, no. 7, pp. 1239–1249, 2018.
- [22] S. Wang, S. Huang, W. Zhao, and Z. Wei, “3D modeling of circumferential SH guided waves in pipeline for axial cracking detection in ili tools,” *Ultrasonics*, vol. 56, pp. 325–331, 2015.
- [23] J. N. Barshinger and J. L. Rose, “Guided wave propagation in an elastic hollow cylinder coated with a viscoelastic material,” *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, vol. 51, no. 11, pp. 1547–1556, 2004.

- [24] H. Jia, M. Jing, and L. R. Joseph, “Guided wave propagation in single and double layer hollow cylinders embedded in infinite media,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 129, no. 2, pp. 691–700, 2011.
- [25] S. Bernard, Q. Grimal, and P. Laugier, “Resonant ultrasound spectroscopy for viscoelastic characterization of anisotropic attenuative solid materials,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 135, no. 5, pp. 2601–2613, 2014.
- [26] S. J. Hill, “Time-frequency localisation of defects using broadband pulsed arrays,” Ph.D. dissertation, University of Warwick, 2014.
- [27] S. Dixon, P. Petcher, Y. Fan, D. Maisey, and P. Nickolds, “Ultrasonic metal sheet thickness measurement without prior wave speed calibration,” *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 46, no. 44, p. 445502, 2013.
- [28] P. Belanger, “High order shear horizontal modes for minimum remnant thickness,” *Ultrasonics*, vol. 54, no. 4, pp. 1078–1087, 2014.
- [29] J. Hua, *Guided wave propagation in single and double layer hollow cylinders embedded in infinite media*. The Pennsylvania State University, 2010.
- [30] S. Choi, H. Cho, M. S. Lindsey, and C. J. Lissenden, “Electromagnetic acoustic transducers for robotic nondestructive inspection in harsh environments,” *Sensors*, vol. 18, no. 1, p. 193, 2018.
- [31] Y. Xu, A. Tagawa, M. Ueda, T. Yamashita, Y. Ohtsuka, K. Osafune, and M. Nishikawa, “A new structure of SH wave electromagnetic acoustic transducer (EMAT),” in *Acoustical Imaging*. Springer, 2004, pp. 175–183.
- [32] S. Shankar and K. Balasubramaniam, “Characterising the beam formation of SH waves using double-row staggered halfbach EMAT configurations,” *NDT & E International*, vol. 121, p. 102465, 2021.
- [33] B. Ren and J. Xin, “In-line inspection of unpiggable buried live gas pipes using circumferential EMAT guided waves,” in *AIP Conference Proceedings*, vol. 1949, no. 1. AIP Publishing, 2018.
- [34] M. Lindsey, E. Khajeh, J. Van Velsor, C. Lissenden, and J. Rose, “In-line corrosion inspection using circumferential and longitudinal ultrasonic guided waves,” in *AIP Conference Proceedings*, vol. 1335, no. 1. American Institute of Physics, 2011, pp. 231–238.
- [35] W. Luo, J. Rose, J. Van Velsor, M. Avioli, and J. Spanner, “Circumferential guided waves for defect detection in coated pipe,” in *AIP Conference Proceedings*, vol. 820, no. 1. American Institute of Physics, 2006, pp. 165–172.

- [36] D. Patterson, S. Ingram, P. Matuszyk, X. Yao, R. Das, and R. Steinsiek, “Enhanced cement bond evaluation in thick casing utilizing guided acoustic modes generated by electromagnetic acoustic transducers,” in *Offshore Technology Conference Brasil*. OTC, 2017, p. D021S017R003.
- [37] A. C. Kubrusly, M. A. Freitas, J. P. von der Weid, and S. Dixon, “Interaction of SH guided waves with wall thinning,” *NDT & E International*, vol. 101, pp. 94–103, 2019.
- [38] P. Petcher and S. Dixon, “Weld defect detection using PPM EMAT generated shear horizontal ultrasound,” *NDT & E International*, vol. 74, pp. 58–65, 2015.
- [39] L. M. Martinho, A. C. Kubrusly, L. Kang, J. P. Von der Weid, and S. Dixon, “Numerical investigation of unidirectional generation of circumferential SH waves applied to defect detection in pipe,” in *2022 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS)*. IEEE, 2022, pp. 1–4.
- [40] A. C. Kubrusly, L. Kang, J. P. von der Weid, and S. Dixon, “Numerical investigation of application of unidirectional generation to improve signal interpretation of circumferential guided waves in pipes for defect detection,” in *European Workshop on Structural Health Monitoring*. Springer, 2022, pp. 61–70.
- [41] D. Jiles, *Introduction to magnetism and magnetic materials*. CRC press, 2015.
- [42] S. M. Wentworth, *Fundamentals of electromagnetics with engineering applications*. John Wiley & Sons Incorporated, 2005.
- [43] J. L. Rose, “Ultrasonic waves in solid media,” 2000.
- [44] A. Demma, P. Cawley, and M. Lowe, “Scattering of the fundamental shear horizontal mode from steps and notches in plates,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 113, no. 4, pp. 1880–1891, 2003.
- [45] R. Carandente, J. Ma, and P. Cawley, “The scattering of the fundamental torsional mode from axi-symmetric defects with varying depth profile in pipes,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 127, no. 6, pp. 3440–3448, 2010.
- [46] I. Bartoli, A. Marzani, F. L. Di Scalea, and E. Viola, “Modeling wave propagation in damped waveguides of arbitrary cross-section,” *Journal of sound and vibration*, vol. 295, no. 3-5, pp. 685–707, 2006.
- [47] T. Hayashi, W.-J. Song, and J. L. Rose, “Guided wave dispersion curves for a bar with an arbitrary cross-section, a rod and rail example,” *Ultrasonics*, vol. 41, no. 3, pp. 175–183, 2003.

- [48] V. Plessky, J. Koskela, and S. Yandrapalli, “Attenuation of Lamb modes and SH waves near cut-off frequencies,” in *2020 Joint Conference of the IEEE International Frequency Control Symposium and International Symposium on Applications of Ferroelectrics (IFCS-ISAF)*. IEEE, 2020, pp. 1–3.
- [49] R. Howard and F. Cegla, “On the probability of detecting wall thinning defects with dispersive circumferential guided waves,” *NDT & E International*, vol. 86, pp. 73–82, 2017.
- [50] Onscale manual. [Online]. Available: <https://support.onscale.com/hc/en-us/categories/360000582112-General-Documentation>
- [51] P. Shorter, “Wave propagation and damping in linear viscoelastic laminates,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 115, no. 5, pp. 1917–1925, 2004.

A Análise completa do método SAFE

Nesse apêndice é descrito o método semi-analítico de elementos finitos, abreviado de SAFE, e a aplicação em ondas CSH. Tal descrição tem como base o trabalho elaborado por Van Velsor em [7].

A.1 Método SAFE para ondas circunferenciais

Na Fig. A.1 é exibido um elemento finito que no plano, $z - \theta$, se estende até o infinito, logo sendo bidimensional, e cuja equação de movimento pode ser descrita pela função $e^{jp\theta - \omega t}$, onde p é o número de onda angular descrito na seção 2.3. Além disso, pode-se ver a discretização em elementos, onde os graus de liberdade são vistos nos nós i e j , sendo l a distância entre dois nós consecutivos. Pode-se escrever, respectivamente, as componentes de deslocamento, tensão e deformação para quaisquer pontos do domínio de interesse:

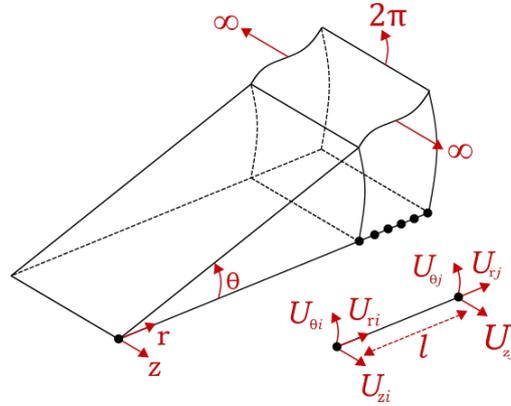


Figura A.1: Modelo usado para o desenvolvimento do método SAFE, os pontos pretos definem a discretização do guia em elementos.

$$\mathbf{u} = [u_r, u_\theta, u_z]^T, \quad (\text{A-1})$$

$$\boldsymbol{\sigma} = [\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z, \sigma_{r\theta}, \sigma_{\theta z}, \sigma_{rz}]^T, \quad (\text{A-2})$$

$$\boldsymbol{\epsilon} = [\epsilon_r, \epsilon_\theta, \epsilon_z, \epsilon_{r\theta}, \epsilon_{\theta z}, \epsilon_{rz}]^T, \quad (\text{A-3})$$

onde T , denota a operação de transposição de vetor/matriz. Assumindo que não há variação na direção z [7, 46, 47], pode-se reescrever o vetor de deslocamento como:

$$\mathbf{u}(r, \theta, t) = \begin{bmatrix} u_r(r, \theta, t) \\ u_\theta(r, \theta, t) \\ u_z(r, \theta, t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_r(r) \\ U_\theta(r) \\ U_z(r) \end{bmatrix} e^{i(p\theta - \omega t)}, \quad (\text{A-4})$$

onde $U_r(r)$ é o deslocamento, dependente na direção r , na direção r , $U_\theta(r)$ é o deslocamento, dependente na direção r , na direção θ e $U_z(r)$ é o deslocamento, dependente na direção r , na direção z . É possível notar que o deslocamento é não dependente da direção z . Além disso, a dependência da direção θ e a temporal estão consideradas na exponencial, modificando apenas a fase do vetor de deslocamento. Portanto, para determinar o vetor de deslocamento se torna necessário descobrir as funções U_m , onde $m = r, \theta$ e z , que são dependentes apenas da direção r . Dessa forma, pode-se escrever o deslocamento de um único elemento utilizando aproximação padrão de elementos finitos [7, 46, 47], com um termo de propagação analítico:

$$\mathbf{u}^{(e)}(r, \theta, t) = \begin{bmatrix} \frac{R_j - r}{l} & 0 & 0 & \frac{r - R_i}{l} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{R_j - r}{l} & 0 & 0 & \frac{r - R_i}{l} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{R_j - r}{l} & 0 & 0 & \frac{r - R_i}{l} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{ri} \\ U_{\theta i} \\ U_{zi} \\ U_{rj} \\ U_{\theta j} \\ U_{zj} \end{bmatrix} e^{i(p\theta - \omega t)}, \quad (\text{A-5})$$

onde R_i e R_j são a posição dos elementos dos nós i e j respectivamente. Pode-se simplificar a Eq. A-5 acima da seguinte forma:

$$\mathbf{u}^{(e)}(r, \theta, t) = [N_i \mathbf{I} \quad N_j \mathbf{I}] \begin{bmatrix} \mathbf{U}_i \\ \mathbf{U}_j \end{bmatrix} e^{i(p\theta - \omega t)}, \quad (\text{A-6})$$

onde \mathbf{I} é a matriz identidade e N_i e N_j são as funções de forma do elemento como vistas abaixo:

$$N_i = \frac{R_j - r}{l}, \quad (\text{A-7})$$

$$N_j = \frac{r - R_i}{l}, \quad (\text{A-8})$$

Então, é possível escrever o vetor de deslocamento para cada elemento do modelo utilizado. Considerando que a deformação é função do deslocamento, escreve-se da seguinte forma:

$$\boldsymbol{\epsilon} = \left[\mathbf{L}_r \frac{\partial}{\partial r} + \mathbf{L}_\theta \frac{\partial}{\partial \theta} + \mathbf{L}_z \frac{\partial}{\partial z} + \mathbf{K} \right] \mathbf{u}, \quad (\text{A-9})$$

onde:

$$\mathbf{L}_r = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{L}_\theta = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{r} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{r} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{r} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{L}_z = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{K} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{r} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-1}{r} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (\text{A-10})$$

Substituindo a versão discretizada do deslocamento da Eq. A-6 na Eq. A-9, obtém-se a versão discretizada da deformação:

$$\boldsymbol{\epsilon}^{(e)}(r, \theta, t) = \left[\mathbf{L}_r \frac{\partial}{\partial r} + \mathbf{L}_\theta \frac{\partial}{\partial \theta} + \mathbf{L}_z \frac{\partial}{\partial z} + \mathbf{K} \right] \mathbf{N}(r) \mathbf{U}^{(e)} e^{i(p\theta - \omega t)}, \quad (\text{A-11})$$

onde:

$$\mathbf{N}(r) = [N_i \mathbf{I} \quad N_j \mathbf{I}], \quad \mathbf{U}^{(e)} = \begin{bmatrix} \mathbf{U}_i \\ \mathbf{U}_j \end{bmatrix}^{(e)}. \quad (\text{A-12})$$

Seguindo [7, 46, 47], a Eq. A-11 pode ser reescrita como

$$\boldsymbol{\epsilon}^{(e)} = (\mathbf{B}_1 + ip\mathbf{B}_2) \mathbf{U}^{(e)} e^{i(p\theta - \omega t)}, \quad (\text{A-13})$$

onde:

$$\mathbf{B}_1 = \mathbf{L}_r \frac{\partial \mathbf{N}}{\partial r} + \mathbf{L}_z \frac{\partial \mathbf{N}}{\partial z} + \mathbf{K} \mathbf{N}, \quad \mathbf{B}_2 = \mathbf{L}_\theta \mathbf{N}. \quad (\text{A-14})$$

Usando as expressões de \mathbf{L}_r , \mathbf{L}_θ , \mathbf{L}_z , \mathbf{K} e \mathbf{N} nas Eqs. A-10 e A-12, respectivamente, para elementos lineares unidimensionais, obtém-se as expressões para \mathbf{B}_1 e \mathbf{B}_2 .

$$\mathbf{B}_1 = \begin{bmatrix} \frac{-1}{l} & 0 & 0 & \frac{1}{l} & 0 & 0 \\ \frac{(R_j - r)}{rl} & 0 & 0 & \frac{(r - R_i)}{rl} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{(r - R_j)}{rl} - \frac{1}{l} & 0 & 0 & \frac{(R_i - r)}{rl} + \frac{1}{l} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-1}{l} & 0 & 0 & \frac{1}{l} \end{bmatrix}, \quad (\text{A-15})$$

$$\mathbf{B}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{(R_j-r)}{rl} & 0 & 0 & \frac{(r-R_i)}{rl} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{(R_j-r)}{rl} & 0 & 0 & \frac{(r-R_i)}{rl} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{(R_j-r)}{rl} & 0 & 0 & \frac{(r-R_i)}{rl} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (\text{A-16})$$

Dessa forma, obtém-se o vetor de deslocamento e a deformação na forma discretizada. Pode-se calcular também, as equações que governam o deslocamento/deformação da onda propagante. Entretanto, ao invés de considerar as equações de movimento, utiliza-se o princípio de Hamilton [1] na formulação do método SAFE. Para sistemas conservativos, o princípio de Hamilton diz que o caminho real seguido por alguma partícula ou um sistema de partículas é aquele que torna a diferença entre as energias cinética e potencial, vista na Eq. A-17, estacionária em relação a todos os caminhos vizinhos possíveis entre dois instantes, chamados de, t_1 e t_2 , desde que as configurações do sistema sejam prescritas [7].

$$\delta \int_{t_1}^{t_2} (T - V) dt = 0, \quad (\text{A-17})$$

onde δ é o operador derivada funcional para se obter a função lagrangiana do sistema, T é a energia cinética do sistema dada por:

$$T = \frac{1}{2} \int_{\Lambda} \dot{\mathbf{u}}^T \rho \dot{\mathbf{u}} d\Lambda, \quad (\text{A-18})$$

e V , a energia potencial, dada por:

$$V = \frac{1}{2} \int_{\Lambda} \epsilon^T \mathbf{C} \epsilon d\Lambda, \quad (\text{A-19})$$

onde Λ representa o volume do sistema e \mathbf{C} o tensor de rigidez como visto na Sec. 2.4, donde para camadas viscoelásticas os elementos do tensor são complexos. Considerando a forma conservativa do princípio de Hamilton, assume-se que o campo de deslocamento ao longo da espessura não é afetado por atenuação. Tal suposição mostrou-se adequada em [5, 7, 51]. Então, pode ser reescrita a equação A-18 da seguinte forma:

$$T = \frac{1}{2} \left[\mathbf{u}^T \rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} \Big|_{\Lambda} + \int_{\Lambda} \mathbf{u}^T \rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} d\Lambda \right]. \quad (\text{A-20})$$

Substituindo a Eq. A-20 na Eq. A-17, o primeiro termo, a saber, $\delta \mathbf{u}$ deverá ser igual a zero no limite da camada dado pela definição de deslocamentos virtuais

[7, 46, 47]. Então, a Eq. A-17 pode ser reescrita como:

$$\int_{t_1}^{t_2} \left[\int_{\Lambda} \delta \boldsymbol{\epsilon}^T \mathbf{C} \boldsymbol{\epsilon} d\Lambda + \int_{\Lambda} \delta \mathbf{u}^T \rho \ddot{\mathbf{u}} d\Lambda \right] = 0. \quad (\text{A-21})$$

Para a forma discreta, tem-se:

$$\int_{t_1}^{t_2} \left\{ \bigcup_{e=1}^{n_e} \left[\int_{\Lambda} \delta (\boldsymbol{\epsilon}^{(e)T}) \mathbf{C}_e \boldsymbol{\epsilon}^{(e)} d\Lambda_e + \int_{\Lambda} \delta (\mathbf{u}^{(e)T}) \rho_e \ddot{\mathbf{u}}^{(e)} d\Lambda_e \right] \right\} = 0, \quad (\text{A-22})$$

onde n_e é o número total de elementos. Ao substituir os resultados obtidos para o deslocamento e deformação, vistos nas Eq. A-6 e A-13 respectivamente, na Eq. A-22, obtém-se o seguinte:

$$\int_{t_1}^{t_2} \left\{ \delta \mathbf{U}^T \left[\mathbf{K}_1 + ip\mathbf{K}_2 + p^2\mathbf{K}_3 - \omega^2\mathbf{M} \right] \mathbf{U} \right\} dt = 0, \quad (\text{A-23})$$

onde:

$$\mathbf{K}_1 = \bigcup_{e=1}^{n_e} \mathbf{k}_1^{(e)}, \quad \mathbf{K}_2 = \bigcup_{e=1}^{n_e} \mathbf{k}_2^{(e)}, \quad \mathbf{K}_3 = \bigcup_{e=1}^{n_e} \mathbf{k}_3^{(e)}, \quad \mathbf{M} = \bigcup_{e=1}^{n_e} \mathbf{m}^{(e)}, \quad (\text{A-24})$$

$$\mathbf{k}_1^{(e)} = \int_{\Lambda} \left[\mathbf{B}_1^T \mathbf{C}_e \mathbf{B}_1 \right] d\Lambda, \quad (\text{A-25})$$

$$\mathbf{k}_2^{(e)} = \int_{\Lambda} \left[\mathbf{B}_1^T \mathbf{C}_e \mathbf{B}_2 - \mathbf{B}_2^T \mathbf{C}_e \mathbf{B}_1 \right] d\Lambda, \quad (\text{A-26})$$

$$\mathbf{k}_3^{(e)} = \int_{\Lambda} \left[\mathbf{B}_2^T \mathbf{C}_e \mathbf{B}_2 \right] d\Lambda, \quad (\text{A-27})$$

$$\mathbf{m} = \int_{\Lambda} \left[\mathbf{N}^T \rho_e \mathbf{N} \right] d\Lambda. \quad (\text{A-28})$$

Tais integrais mostradas não possuem solução analítica, sendo possível utilizar técnicas numéricas para calcular as mesmas, como a regra da quadratura gaussiana [7]. Como $\delta \mathbf{U}^T$ deve ser nulo nos instantes t_1 e t_2 , soluções para a Eq. A-23 acontecem quando:

$$\left[\mathbf{K}_1 + ip\mathbf{K}_2 + p^2\mathbf{K}_3 - \omega^2\mathbf{M} \right]_D \mathbf{U} = 0, \quad (\text{A-29})$$

onde D é o número de graus de liberdade do sistema, que será igual a 3 vezes o número de nós na região discretizada. Então, para facilitar as soluções da equação A-29, transforma-se em um sistema de autovalores de primeira ordem de p , como mostrado a seguir:

$$[\mathbf{A} - p\mathbf{B}]_{2D} \mathbf{Q} = 0, \quad (\text{A-30})$$

onde:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & \mathbf{K}_1 - \omega^2 \mathbf{M} \\ \mathbf{K}_1 \omega^2 \mathbf{M} & i\mathbf{K}_2 \end{bmatrix}, \quad (\text{A-31})$$

$$B = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_1 - \omega^2 \mathbf{M} & 0 \\ 0 & \mathbf{K}_3 \end{bmatrix}, \quad (\text{A-32})$$

$$Q = \begin{bmatrix} \mathbf{U} \\ p\mathbf{U} \end{bmatrix}. \quad (\text{A-33})$$

Os valores de p e ω que satisfazem a Eq. A-30 são os autovalores do sistema e resultam nas curvas de dispersão. Além disso, como indicado pelo subscrito $2D$, o número total de raízes será o dobro do número de graus de liberdade, donde metade para as ondas propagando para frente e a outra metade para as ondas propagando para trás. Para um sistema de multicamadas, o método SAFE calcula os autovalores da Eq. A-30 considerando que as matrizes K_1 , K_2 , K_3 e M se utilizam das condições de contorno entre os materiais elásticos e viscoelásticos para a análise entre as interfaces das camadas [47]. A seguir foi feita a abordagem para ondas CSH.

A.2

Abordagem para ondas CSH

Já para ondas CSH, o deslocamento tem única componente não-nula na direção z , reduzindo a equação do deslocamento discretizado, a saber, Eq. A-6 para:

$$\mathbf{u}^{(e)}(r, \theta, t) = \begin{bmatrix} \frac{R_j - r}{l} & \frac{r - R_i}{l} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{zi} \\ U_{zj} \end{bmatrix}^{(e)} e^{i(p\theta - \omega t)}. \quad (\text{A-34})$$

Além disso, as componentes de deformação diferentes de zero são $\epsilon_{\theta z}$ e ϵ_{rz} , com isso é possível simplificar as matrizes \mathbf{B}_1 e \mathbf{B}_2 da seguinte forma:

$$\mathbf{B}_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{-1}{l} & \frac{-1}{l} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_2 = \begin{bmatrix} \frac{R_j - r}{rl} & \frac{r - R_i}{rl} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (\text{A-35})$$

Outra simplificação possível é na matriz de rigidez, que, para materiais isotrópicos, pode ser reescrita como:

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \mu & 0 \\ 0 & \mu \end{bmatrix}. \quad (\text{A-36})$$

É válido ressaltar, novamente, que para materiais viscoelásticos, tal matriz é complexa, pois, como visto no Cap. 2, para materiais viscoelásticos a segunda

constante de Lamé μ é complexa, o que ocasionará atenuação. Com isso, é possível obter as componentes do tensor de tensão como está escrito abaixo:

$$\sigma_{rz}^{(e)} = \frac{\mu}{l} (U_{zj} - U_{zi}), \quad (\text{A-37})$$

$$\sigma_{\theta z}^{(e)} = \frac{ip\mu}{rl} [(R_j - r) U_{zi} - (r - R_i) U_{zj}] \text{ para: } R_i \leq r \leq R_j. \quad (\text{A-38})$$

Por fim, é possível encontrar o vetor de Poynting, cuja componente na direção θ é dada por:

$$S_\theta = -\frac{1}{2} \dot{u}_z \sigma_{\theta z} \quad (\text{A-39})$$

A seguir, foi visto o estudo de mudança de constantes para as demais porcentagens.

B Alteração nas constantes do material

Nesse apêndice é mostrada a continuação do estudo de alteração nas constantes do material visto no Cap. 3.

B.1 Alteração na constante de atenuação - Redução de 25 %

Já para redução de 25 % no valor de atenuação foi obtida a Fig. B.1, e mais uma vez, observa-se semelhanças nos gráficos em relação aos vistos na Fig. 3.56, com nova divergência nas amplitudes, nesse caso ainda menores. A Tab. B.1 compara os valores obtidos para o novo valor da constante de atenuação.

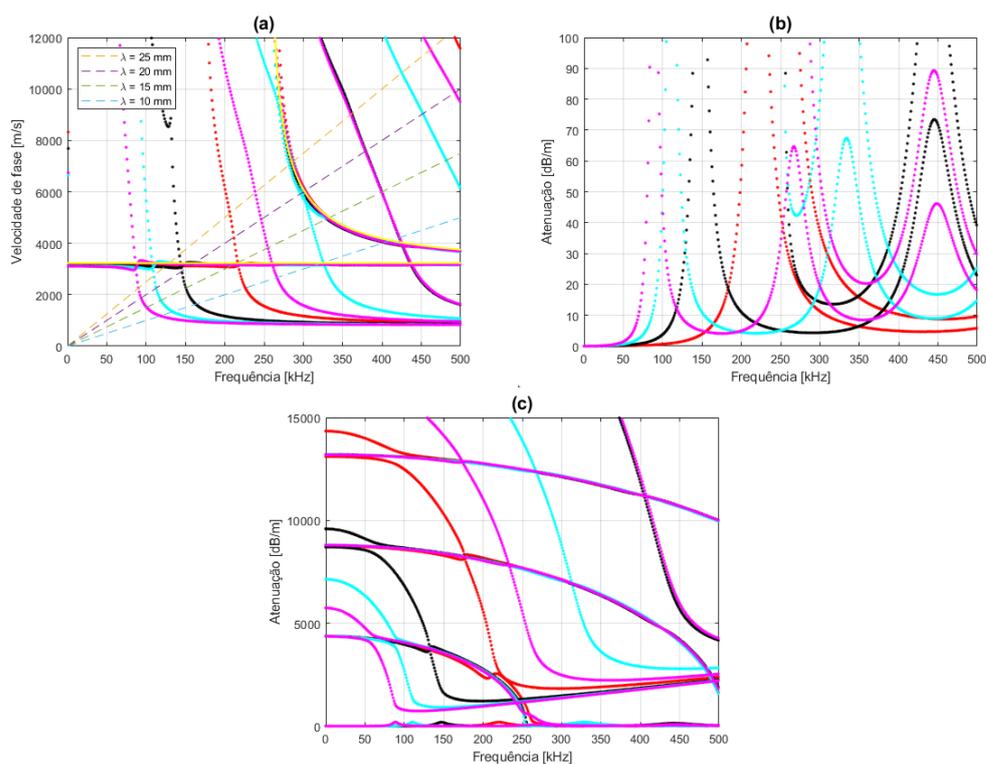


Figura B.1: Curvas de dispersão para ondas CSH em um duto com uma camada de aço de 6.35 mm e uma camada revestimento de epóxi com constante de atenuação reduzida em 25 % de seu valor original e de diferentes espessuras, a saber, 1.0 mm em pontos vermelhos, 1.5 mm em pontos pretos, 2.0 mm em pontos cianos e 2.5 mm em pontos rosas. As curvas em amarelo denotam a velocidade de fase para uma placa de aço de mesma espessura sem revestimento. Em (a) temos a curva de velocidade de fase, onde as linhas tracejadas mostram a relação entre frequência e velocidade para diferentes comprimentos de onda, a saber, 1.0 mm, 1.5 mm, 2.0 mm e 2.5 mm. Em (b) e (c) tem-se as curvas de atenuação.

Assim como nos casos anteriores a média encontrada foi próxima ao esperado, onde foi encontrado aproximadamente 23 % muito próximo aos 25 % a menos

Ponto de operação	Atenuação no epóxi original (dB/m)	Atenuação no epóxi em 75% (dB/m)	Diferença (%)
25mm - 125 kHz (a)	2.0768	1.5979	23.06
25 mm - 125 kHz (b)	24.7102	18.2476	26.15
25 mm - 125 kHz (c)	36.6578	28.7984	21.44
25 mm - 125 kHz (d)	10.4067	8.0844	22.32
25 mm - 285 kHz (a)	67.7926	53.6478	20.86
25 mm - 285 kHz (b)	22.3371	16.9948	23.92
25 mm - 285 kHz (c)	58.4725	46.8322	19.91
25 mm - 285 kHz (d)	110.1878	87.1056	20.95
20 mm - 160 kHz (a)	6.4971	4.9713	23.48
20 mm - 160 kHz (b)	66.7902	49.3176	26.16
20 mm - 160 kHz (c)	10.6663	8.2903	22.28
20 mm - 160 kHz (d)	5.8651	4.4282	24.50
20 mm - 300 kHz (a)	45.2717	35.3891	21.83
20 mm - 300 kHz (b)	18.8492	14.341	23.92
20 mm - 300 kHz (c)	81.685	65.6265	19.66
20 mm - 300 kHz (d)	62.512	49.2354	21.24
15 mm - 210 kHz (a)	4200.3495	3191.53	24.02
15 mm - 210 kHz (b)	10.6983	8.3082	22.34
15 mm - 210 kHz (c)	5.5484	4.2242	23.87
15 mm - 210 kHz (d)	7.8822	6.1124	22.45
15 mm - 330 kHz (a)	25.8151	19.9138	22.86
15 mm - 330 kHz (b)	18.2566	13.9791	23.43
15 mm - 330 kHz (c)	126.907	91.6015	27.82
15 mm - 330 kHz (d)	31.4717	24.9541	20.71
10 mm - 310 kHz (a)	11.3185	8.7864	22.37
10 mm - 310 kHz (b)	6.063	4.6204	23.79
10 mm - 310 kHz (c)	37.0653	30.2705	18.33
10 mm - 310 kHz (d)	14.8148	12.1983	17.66
10 mm - 400 kHz (a)	13.049	9.9427	23.80
10 mm - 400 kHz (b)	55.9178	46.1557	17.46
10 mm - 400 kHz (c)	27.8437	22.3793	19.63
10 mm - 400 kHz (d)	40.4883	31.53	22.13

Média:	22.32
---------------	-------

Tabela B.1: Comparação dos valores de atenuação dos modos estudados para as diferentes espessuras de revestimento de epóxi para constante de atenuação reduzida de 25 % de seu valor original.

esperados. Novamente, a distinção dos valores é dada pela formatação do próprio método SAFE, como dito anteriormente. A seguir foi estudada a mudança do valor da constante para 50 % do valor original.

B.2

Alteração na constante de atenuação - Redução de 50 %

Também foi estudado para 50 % de redução no valor de atenuação, e foi obtida a Fig. B.2, onde também se observa semelhanças nos gráficos em relação aos vistos na Fig. 3.56, com outra divergência nas amplitudes, mais uma vez menores. A Tab. B.2 compara os valores obtidos para o novo valor da constante de atenuação.

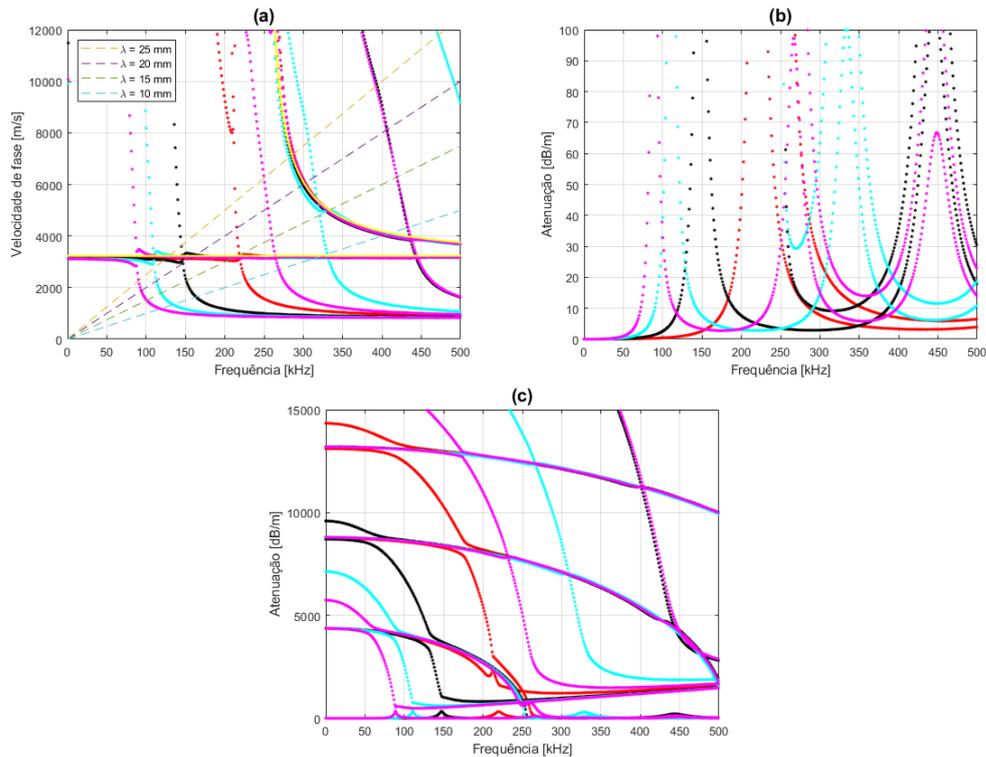


Figura B.2: Curvas de dispersão para ondas CSH em um duto com uma camada de aço de 6.35 mm e uma camada revestimento de epóxi com constante de atenuação reduzida em 50 % de seu valor original e de diferentes espessuras, a saber, 1.0 mm em pontos vermelhos, 1.5 mm em pontos pretos, 2.0 mm em pontos cianos e 2.5 mm em pontos rosas. As curvas em amarelo denotam a velocidade de fase para uma placa de aço de mesma espessura sem revestimento. Em (a) temos a curva de velocidade de fase, onde as linhas tracejadas mostram a relação entre frequência e velocidade para diferentes comprimentos de onda, a saber, 1.0 mm, 1.5 mm, 2.0 mm e 2.5 mm. Em (b) e (c) tem-se as curvas de atenuação.

Novamente, semelhante aos casos anteriores, a média encontrada foi próxima ao esperado, onde foi encontrado aproximadamente 46 % muito próximo aos 50 % a menos esperados. A distinção dos valores é dada pela formatação do próprio método SAFE, como dito anteriormente. A seguir foi estudada a mudança do valor da constante reduzida de 75 % do valor original.

Ponto de operação	Atenuação no epóxi original (dB/m)	Atenuação no epóxi em 50% (dB/m)	Diferença (%)
25 mm - 125 kHz (a)	2.0768	1.0503	49.43
25 mm - 125 kHz (b)	24.7102	14.2298	42.41
25 mm - 125 kHz (c)	36.6578	19.3805	47.13
25 mm - 125 kHz (d)	10.4067	5.5312	46.85
25 mm - 285 kHz (a)	67.7926	37.2287	45.08
25 mm - 285 kHz (b)	22.3371	11.4478	48.75
25 mm - 285 kHz (c)	58.4725	34.1085	41.67
25 mm - 285 kHz (d)	110.1878	60.9503	44.69
20 mm - 160 kHz (a)	6.4971	3.3628	48.24
20 mm - 160 kHz (b)	66.7902	29.8143	55.36
20 mm - 160 kHz (c)	10.6663	5.6742	46.80
20 mm - 160 kHz (d)	5.8651	3.0211	48.49
20 mm - 300 kHz (a)	45.2717	24.3263	46.27
20 mm - 300 kHz (b)	18.8492	9.6602	48.75
20 mm - 300 kHz (c)	81.685	47.7227	41.58
20 mm - 300 kHz (d)	62.512	31.9809	48.84
15 mm - 210 kHz (a)	4200.3495	2606.58	37.94
15 mm - 210 kHz (b)	10.6983	5.6829	46.88
15 mm - 210 kHz (c)	5.5484	2.8469	48.69
15 mm - 210 kHz (d)	7.8822	4.1778	47.00
15 mm - 330 kHz (a)	25.8151	13.552	47.50
15 mm - 330 kHz (b)	18.2566	9.4617	48.17
15 mm - 330 kHz (c)	126.907	52.489	58.64
15 mm - 330 kHz (d)	31.4717	17.3587	44.84
10 mm - 310 kHz (a)	11.3185	6.0081	46.92
10 mm - 310 kHz (b)	6.063	3.1162	48.60
10 mm - 310 kHz (c)	37.0653	18.765	49.37
10 mm - 310 kHz (d)	14.8148	8.7644	40.84
10 mm - 400 kHz (a)	13.049	6.7048	48.62
10 mm - 400 kHz (b)	55.9178	33.0776	40.85
10 mm - 400 kHz (c)	27.8437	15.7453	43.45
10 mm - 400 kHz (b)	40.4883	22.2831	44.96

Média:	46.68
---------------	-------

Tabela B.2: Comparação dos valores de atenuação dos modos estudados para as diferentes espessuras de revestimento de epóxi para constante de atenuação reduzida de 50 % de seu valor original.

B.3

Alteração na constante de atenuação - Redução de 75 %

Por fim, foi estudado para 75 % de redução no valor de atenuação, e foi obtida a Fig. B.3, onde, mais uma vez, também se observa semelhanças nos gráficos em relação aos vistos na Fig. 3.56, com outra divergência nas amplitudes, mais uma vez menores. A Tab. B.3 compara os valores obtidos para o novo valor da constante de atenuação.

Mais uma vez, semelhante aos casos anteriores, a média encontrada foi próxima

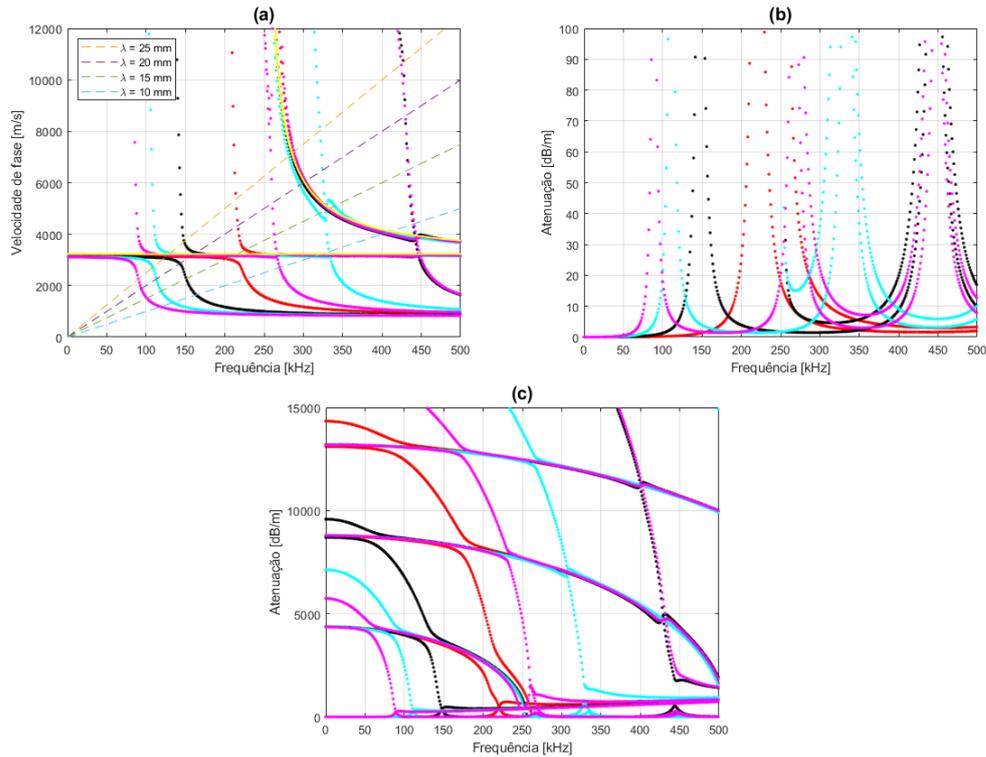


Figura B.3: Curvas de dispersão para ondas CSH em um duto com uma camada de aço de 6.35 mm e uma camada revestimento de epóxi com constante de atenuação reduzida de 75 % de seu valor original e de diferentes espessuras, a saber, 1.0 mm em pontos vermelhos, 1.5 mm em pontos pretos, 2.0 mm em pontos cianos e 2.5 mm em pontos rosas. As curvas em amarelo denotam a relação entre frequência e velocidade para uma placa de aço de mesma espessura sem revestimento. Em (a) temos a curva de velocidade de fase, onde as linhas tracejadas mostram a relação entre frequência e velocidade para diferentes comprimentos de onda, a saber, 1.0 mm, 1.5 mm, 2.0 mm e 2.5 mm. Em (b) e (c) tem-se as curvas de atenuação.

ao esperado, onde foi encontrado aproximadamente 72 % muito próximo aos 75 % a menos esperados. A distinção dos valores é dada pela formatação do próprio método SAFE, como dito anteriormente. A seguir foi estudada a mudança do valor da constante de velocidade de fase.

Ponto de operação	Atenuação no epóxi original (dB/m)	Atenuação no epóxi em 25% (dB/m)	Diferença (%)
25 mm - 125 kHz (a)	2.0768	0.5266	74.64
25 mm - 125 kHz (b)	24.7102	7.3938	70.08
25 mm - 125 kHz (c)	36.6578	9.4229	74.29
25 mm - 125 kHz (d)	10.4067	2.8099	73.00
25 mm - 285 kHz (a)	67.7926	19.0822	71.85
25 mm - 285 kHz (b)	22.3371	5.7599	74.21
25 mm - 285 kHz (c)	58.4725	15.6622	73.21
25 mm - 285 kHz (d)	110.1878	31.7226	71.21
20 mm - 160 kHz (a)	6.4971	1.6963	73.89
20 mm - 160 kHz (b)	66.7902	17.6741	73.54
20 mm - 160 kHz (c)	10.6663	2.8833	72.97
20 mm - 160 kHz (d)	5.8651	1.5055	74.33
20 mm - 300 kHz (a)	45.2717	12.3942	72.62
20 mm - 300 kHz (b)	18.8492	4.8604	74.21
20 mm - 300 kHz (c)	81.685	25.9092	68.28
20 mm - 300 kHz (d)	62.512	17.6704	71.73
15 mm - 210 kHz (a)	4200.3495	2299.78	45.25
15 mm - 210 kHz (b)	10.6983	2.8865	73.02
15 mm - 210 kHz (c)	5.5484	1.4328	74.18
15 mm - 210 kHz (d)	7.8822	2.1214	73.09
15 mm - 330 kHz (a)	25.8151	6.8616	73.42
15 mm - 330 kHz (b)	18.2566	4.7748	73.85
15 mm - 330 kHz (c)	126.907	32.260	74.58
15 mm - 330 kHz (d)	31.4717	8.9147	71.67
10 mm - 310 kHz (a)	11.3185	3.0511	73.04
10 mm - 310 kHz (b)	6.063	1.5691	74.12
10 mm - 310 kHz (c)	37.0653	10.7107	71.10
10 mm - 310 kHz (d)	14.8148	4.6016	68.94
10 mm - 400 kHz (a)	13.049	3.3757	74.13
10 mm - 400 kHz (b)	55.9178	16.0219	71.35
10 mm - 400 kHz (c)	27.8437	8.1478	70.74
10 mm - 400 kHz (b)	40.4883	11.2543	72.20

Média:	71.84
---------------	-------

Tabela B.3: Comparação dos valores de atenuação dos modos estudados para as diferentes espessuras de revestimento de epóxi para constante de atenuação reduzida de 75 % de seu valor original.

B.4

Alteração na constante de velocidade de fase - Redução de 25 %

Já para uma redução de 25 % do valor da constante de velocidade de fase foi obtida a Fig. B.4 onde se pode ver que as curvas dos modos pertencentes ao revestimento se encontram ainda mais a esquerda em relação as curvas vistas na Fig. 3.56 o que ocasiona, novamente, em mudanças nos valores de atenuação, tais valores podem ser vistos na Tab. B.4.

Como se pode ver, novamente, vários modos sofreram alterações de valor devido

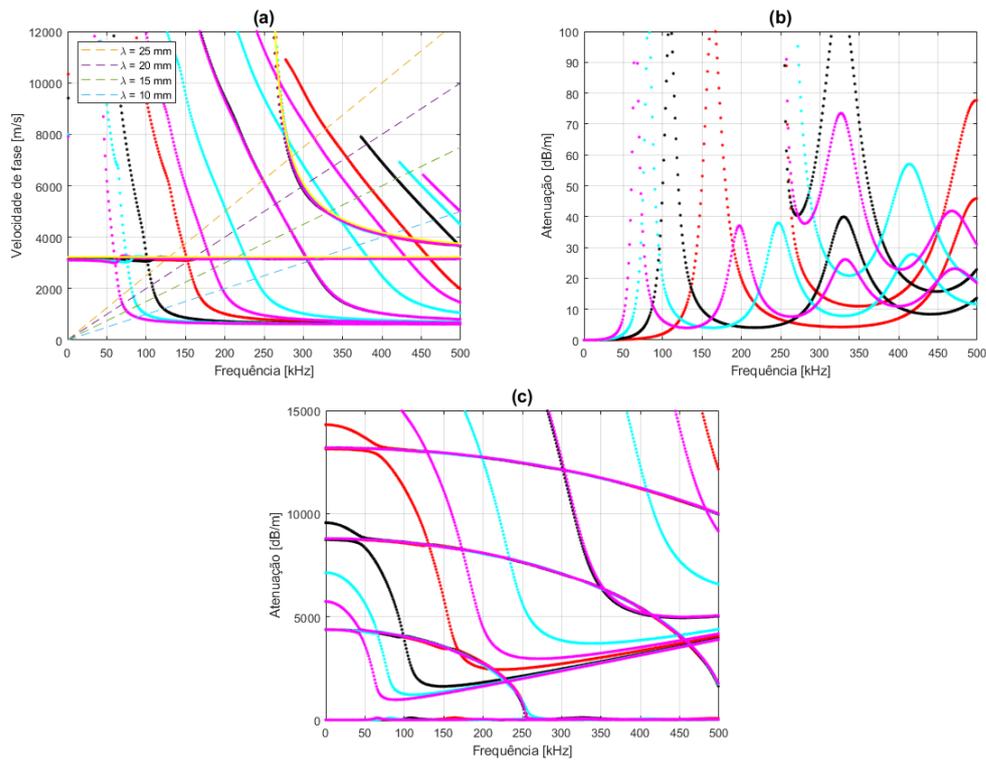


Figura B.4: Curvas de dispersão para ondas CSH em um duto com uma camada de aço de 6.35 mm e uma camada revestimento de epóxi com constante de velocidade de fase reduzida de 25 % de seu valor original e de diferentes espessuras, a saber, 1.0 mm em pontos vermelhos, 1.5 mm em pontos pretos, 2.0 mm em pontos cianos e 2.5 mm em pontos rosas. As curvas em amarelo denotam a velocidade de fase para uma placa de aço de mesma espessura sem revestimento. Em (a) temos a curva de velocidade de fase, onde as linhas tracejadas mostram a relação entre frequência e velocidade para diferentes comprimentos de onda, a saber, 1.0 mm, 1.5 mm, 2.0 mm e 2.5 mm. Em (b) e (c) tem-se as curvas de atenuação.

à(ao) nova(o) aproximação/afastamento com uma variação em torno de 142 % com alguns modos que antes possuíam atenuação baixa ou moderada e, com a mudança no valor da constante, agora possuem alta atenuação, como por exemplo o modo com comprimento de onda de 20 mm - 160 kHz com espessura de 1.0 mm, onde, como se pode ver nos seus perfis denotados em Fig. B.5, a energia dada pelo seu vetor de Poynting se concentra um pouco mais na energia em relação ao caso anterior.

Assim como o estudo anteriormente, alguns modos sofreram poucas alterações no seu valor de atenuação. Para 1.0 mm de espessura de revestimento tem-se o modo 10 mm - 405 kHz, já para 1.5 mm de espessura de revestimento, observa-se o modo 15 mm - 210 kHz, para 2.0 mm tem-se os modos 20 mm - 160 kHz e 15 mm - 210 kHz, por fim para 2.5 mm observa-se os modos 25 mm - 125 kHz e 20 mm - 160 kHz.

A seguir, foi estudado também a variação da velocidade de fase para 50 % do seu valor original.

Ponto de operação	Atenuação no epóxi original (dB/m)	Atenuação com epóxi em 75% (dB/m)	Diferença (%)
25 mm - 125kHz (a)	2.0768	8.492	308.9
25mm - 125kHz (b)	24.7102	37.0322	49.87
25mm - 125kHz (c)	36.6578	5.7825	84.23
25mm - 125kHz (d)	10.4067	3.953	62.01
25mm - 285kHz (a)	67.7926	17.9905	73.46
25mm - 285kHz (b)	22.3371	45.9995	105.93
25mm - 285kHz (c)	58.4725	159.7739	173.25
25mm - 285kHz (d)	110.1878	45.3895	58.81
20mm - 160kHz (a)	6.4971	12.9217	98.88
20mm - 160kHz (b)	66.7902	23.1082	65.40
20mm - 160kHz (c)	10.6663	6.6062	38.06
20mm - 160kHz (d)	5.8651	4.800	18.16
20mm - 300kHz (a)	45.2717	26.5405	41.38
20mm - 300kHz (b)	18.8492	20.7043	9.84
20mm - 300kHz (c)	81.685	163.8008	100.53
20mm - 300kHz (d)	62.512	32.5982	47.85
15mm - 210kHz (a)	4200.3495	73.9458	98.24
15mm - 210kHz (b)	10.6983	6.6683	37.67
15mm - 210kHz (c)	5.5484	5.0834	8.38
15mm - 210kHz (d)	7.8822	15.5401	97.15
15mm - 330kHz (a)	25.8151	16.9973	34.16
15mm - 330kHz (b)	18.2566	27.9675	53.19
15mm - 330kHz (c)	146.907	55.2883	62.37
15mm - 330kHz (d)	31.4717	27.1267	13.81
10mm - 310kHz (a)	11.3185	7.0599	37.63
10mm - 310kHz (b)	6.063	7.6436	26.07
10mm - 310kHz (c)	37.0653	34.885	5.88
10mm - 310kHz (d)	14.8148	9.4547	36.18
10mm - 405kHz (a)	13.049	11.1208	14.78
10mm - 405kHz (b)	55.9178	102.5033	83.31
10mm - 405kHz (c)	27.8437	20.7084	25.63
10mm - 405kHz (d)	40.4883	67.3129	66.25

Média:	142.27
---------------	--------

Tabela B.4: Comparação dos valores de atenuação dos modos estudados para as diferentes espessuras de revestimento de epóxi para constante de velocidade de fase reduzida de 25 % de seu valor original.

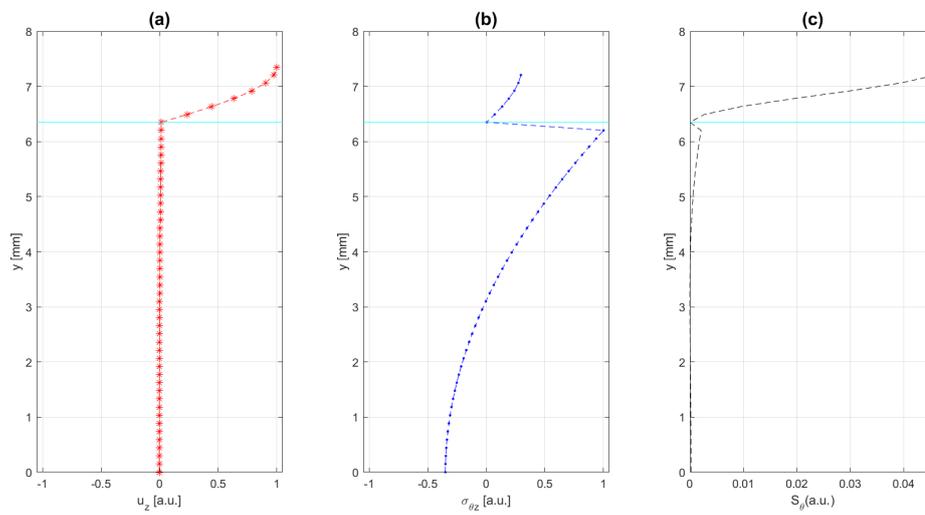


Figura B.5: Perfis do modo em 160 kHz com comprimento de onda de 25 mm para uma espessura de revestimento de epóxi de 1.0 mm, com atenuação de 80 dB/m com constante de velocidade de fase em 75 % do seu valor original. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento.

B.5

Alteração na constante de velocidade de fase - Redução de 50 %

Para uma alteração de 50 % do valor da constante de velocidade de fase obteve-se a Fig. B.6 onde se pode ver que as curvas dos modos pertencentes ao revestimento se encontram, novamente, ainda mais a esquerda em relação as curvas vistas na Fig. 3.56 acarretando mudanças nos valores de atenuação, tais valores podem ser vistos na Tab. B.5.

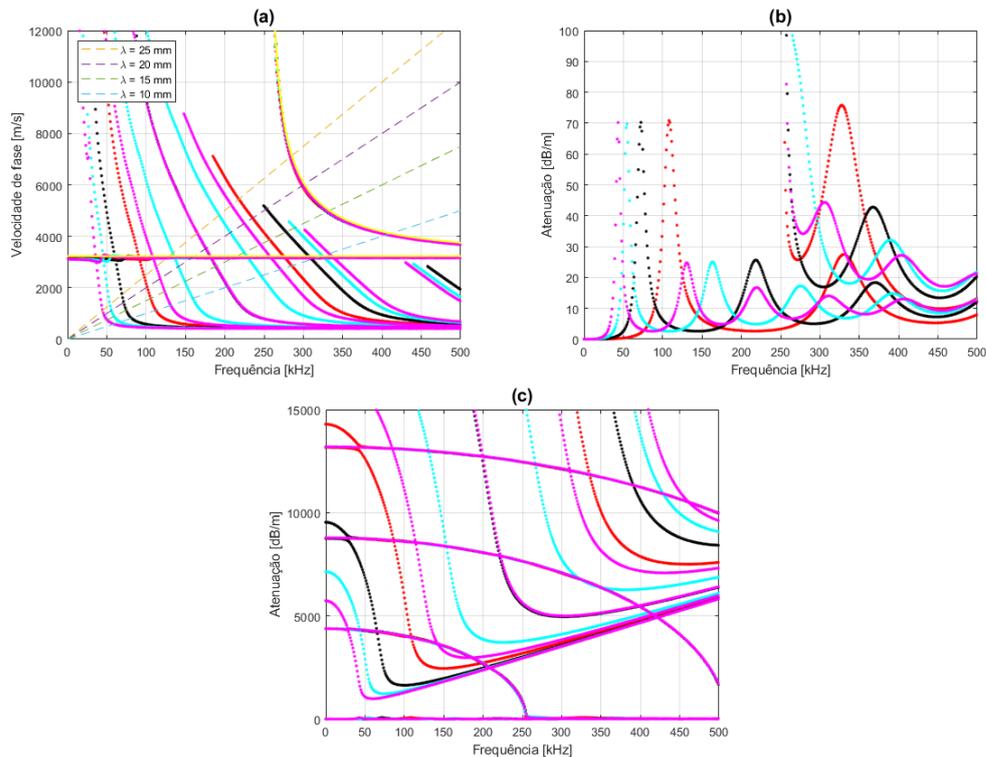


Figura B.6: Curvas de dispersão para ondas CSH em um duto com uma camada de aço de 6.35 mm e uma camada revestimento de epóxi com constante de velocidade de fase reduzida de 50 % de seu valor original e de diferentes espessuras, a saber, 1.0 mm em pontos vermelhos, 1.5 mm em pontos pretos, 2.0 mm em pontos cianos e 2.5 mm em pontos rosas. As curvas em amarelo denotam a velocidade de fase para uma placa de aço de mesma espessura sem revestimento. Em (a) temos a curva de velocidade de fase, onde as linhas tracejadas mostram a relação entre frequência e velocidade para diferentes comprimentos de onda, a saber, 1.0 mm, 1.5 mm, 2.0 mm e 2.5 mm. Em (b) e (c) tem-se as curvas de atenuação.

Como se pode ver, novamente, vários modos sofreram alterações de valor devido à(o) nova(o) aproximação/afastamento com uma variação em torno de 79 % com alguns modos que antes possuíam atenuação baixa ou moderada e, com a mudança no valor da constante, agora possuem maior atenuação, como por exemplo o modo com comprimento de onda de 15 mm - 330 kHz com espessura de 1.0 mm, onde, como se pode ver nos seus perfis denotados em Fig. B.7, devido a uma aproximação do segundo modo do revestimento, há uma quantidade de energia, denotada pelo vetor de Poynting, que se encontra no revestimento ocasionando um aumento na atenuação.

Novamente, alguns modos sofreram poucas alterações no seu valor de atenuação. Para 1.0 mm de espessura de revestimento tem-se os modos 20 mm - 160 kHz e 10

Ponto de operação	Atenuação no epóxi original (dB/m)	Atenuação com epóxi em 50% (dB/m)	Diferença (%)
25mm - 125 kHz (a)	2.0768	19.7539	851.17
25mm - 125 kHz (b)	24.7102	3.106	87.43
25mm - 125 kHz (c)	36.6578	3.7611	89.74
25mm - 125 kHz (d)	10.4067	23.7249	127.98
25mm - 285 kHz (a)	67.7926	30.8529	54.49
25mm - 285 kHz (b)	22.3371	20.5129	8.17
25mm - 285 kHz (c)	58.4725	67.8146	15.98
25mm - 285 kHz (d)	110.1878	35.9244	67.40
20mm - 160 kHz (a)	6.4971	5.3602	17.50
20mm - 160 kHz (b)	66.7902	2.968	95.56
20mm - 160 kHz (c)	10.6663	23.1784	117.30
20mm - 160 kHz (d)	5.8651	6.0347	2.89
20mm - 300 kHz (a)	45.2717	44.7011	1.26
20mm - 300 kHz (b)	18.8492	17.0741	9.42
20mm - 300 kHz (c)	81.685	37.519	54.07
20mm - 300 kHz (d)	62.512	43.3184	30.70
15mm - 210 kHz (a)	4200.3495	2.644	99.94
15mm - 210 kHz (b)	10.6983	23.6513	121.08
15mm - 210 kHz (c)	5.5484	5.0816	8.41
15mm - 210 kHz (d)	7.8822	14.0767	78.59
15mm - 330 kHz (a)	25.8151	74.2455	187.60
15mm - 330 kHz (b)	18.2566	21.8393	19.62
15mm - 330 kHz (c)	146.907	18.5488	87.37
15mm - 330 kHz (d)	31.4717	28.7279	8.72
10mm - 310 kHz (a)	11.3185	22.8038	101.47
10mm - 310 kHz (b)	6.063	6.0258	0.61
10mm - 310 kHz (c)	37.0653	7.7185	79.18
10mm - 310 kHz (d)	14.8148	13.495	8.91
10mm - 405 kHz (a)	13.049	13.4878	3.36
10mm - 405 kHz (b)	55.9178	23.0755	58.73
10mm - 405 kHz (c)	27.8437	27.356	1.75
10mm - 405 kHz (d)	40.4883	27.9238	31.03

Média:	78.98
---------------	-------

Tabela B.5: Comparação dos valores de atenuação dos modos estudados para as diferentes espessuras de revestimento de epóxi para constante de velocidade de fase reduzida de 50 % de seu valor original.

mm - 405 kHz, já para 1.5 mm de espessura de revestimento, observa-se o modo 10 mm - 310 kHz, para 2.0 mm tem-se o modo 15 mm - 210 kHz, por fim para 2.5 mm observa-se os modos 20 mm - 160 kHz e 10 mm - 310 kHz.

A seguir, foi estudado também a redução da velocidade de fase em 75 % do seu valor original.

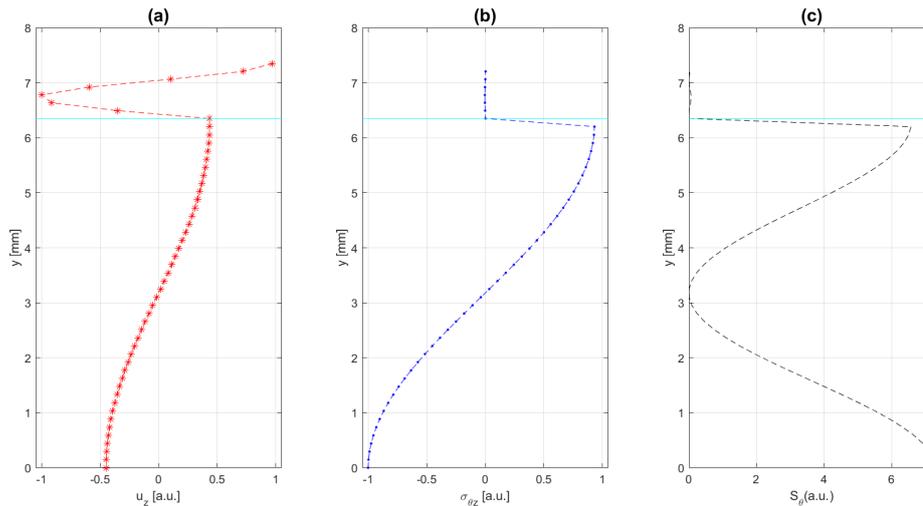


Figura B.7: Perfis do modo em 330 kHz com comprimento de onda de 15 mm para uma espessura de revestimento de epóxi de 1.0 mm, com atenuação de 75 dB/m com constante de velocidade de fase em 50 % do seu valor original. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento.

B.6

Alteração na constante de velocidade de fase - Redução de 75 %

Por fim, para uma redução de 75 % do valor da constante de velocidade de fase obteve-se a Fig. B.8 onde se pode ver que as curvas dos modos pertencentes ao revestimento se encontram, novamente, consideravelmente mais à esquerda em relação as curvas vistas na Fig. 3.56 acarretando mudanças nos valores de atenuação, tais valores podem ser vistos na Tab. B.6.

Como se pode ver, novamente, vários modos sofreram alterações de valor devido à(ao) nova(o) aproximação/afastamento com uma variação em torno de 112 % com alguns modos que antes possuíam atenuação baixa ou moderada e, com a mudança no valor da constante, agora possuem maior atenuação, como por exemplo o modo com comprimento de onda de 10 mm - 405 kHz com espessura de 1.0 mm, onde, como se pode ver nos seus perfis denotados em Fig. B.9, há uma quantidade de energia, mostrada pelo vetor de Poynting, presente no revestimento, ocasionando aumento de atenuação.

Novamente, alguns modos sofreram poucas alterações no seu valor de atenuação. Para 1.0 mm de espessura de revestimento tem-se os modos 10 mm - 310 kHz e 10 mm - 405 kHz, já para 1.5 mm de espessura de revestimento, observa-se o modo 15 mm - 210 kHz, para 2.0 mm tem-se os modos 20 mm - 160 kHz e 15 mm - 210 kHz, por fim para 2.5 mm observa-se os modos 25 mm - 125 kHz e 20 mm - 160 kHz.

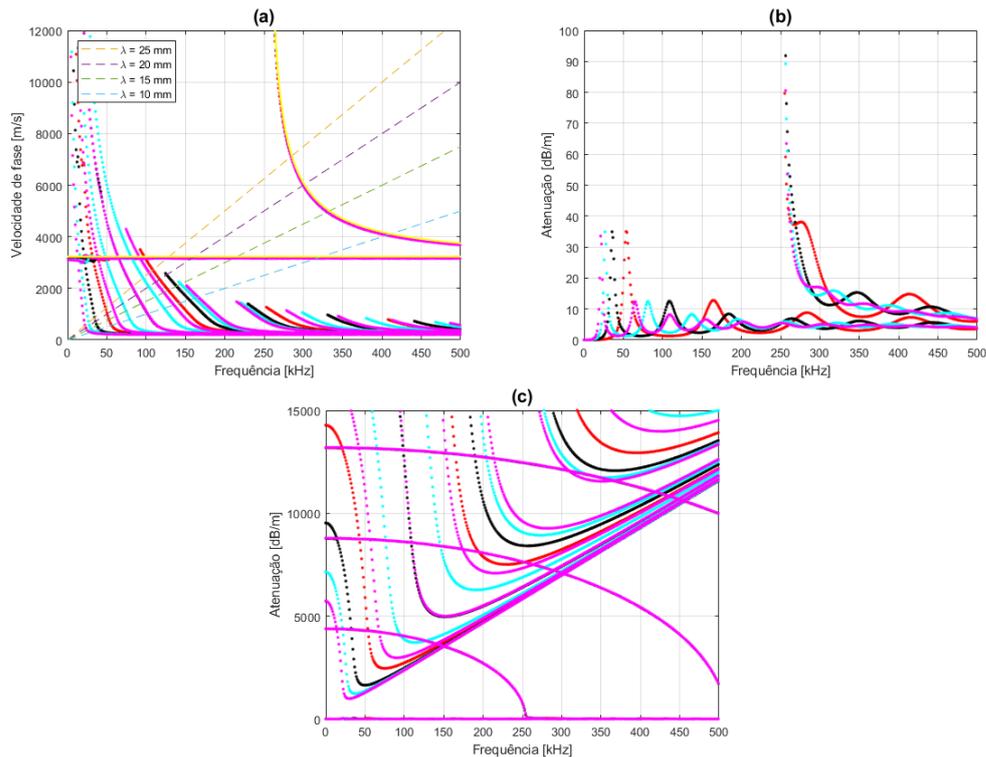


Figura B.8: Curvas de dispersão para ondas CSH em um duto com uma camada de aço de 6.35 mm e uma camada revestimento de epóxi com constante de velocidade de fase reduzida de 75 % de seu valor original e de diferentes espessuras, a saber, 1.0 mm em pontos vermelhos, 1.5 mm em pontos pretos, 2.0 mm em pontos cianos e 2.5 mm em pontos rosas. As curvas em amarelo denotam a velocidade de fase para uma placa de aço de mesma espessura sem revestimento. Em (a) temos a curva de velocidade de fase, onde as linhas tracejadas mostram a relação entre frequência e velocidade para diferentes comprimentos de onda, a saber, 1.0 mm, 1.5 mm, 2.0 mm e 2.5 mm. Em (b) e (c) tem-se as curvas de atenuação.

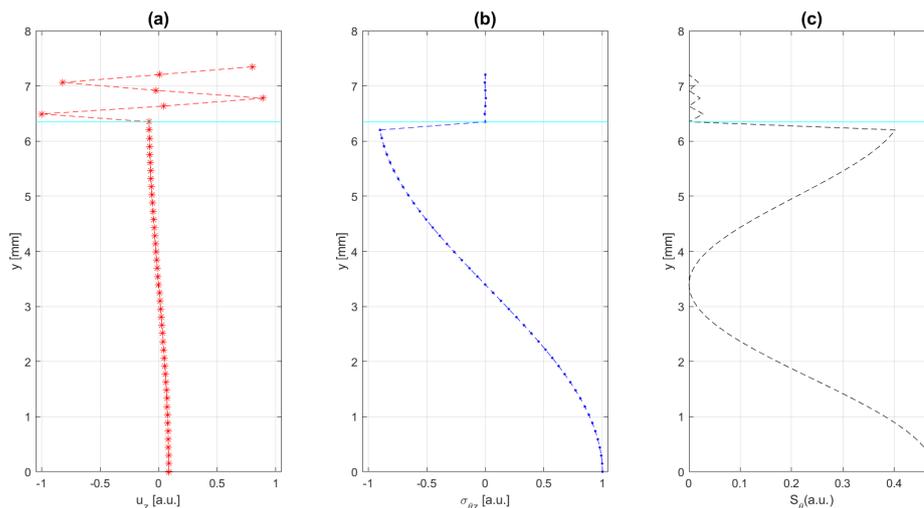


Figura B.9: Perfis do modo em 405 kHz com comprimento de onda de 10 mm para uma espessura de revestimento de epóxi de 1.0 mm, com atenuação de 115 dB/m com constante de velocidade de fase em 25 % do seu valor original. As curvas em vermelho em (a) mostram a distribuição da componente z do vetor de deslocamento normalizado, em (b) em azul o tem-se a distribuição da componente θz do tensor de tensão normalizado, e em (c) tem-se a componente θ do fluxo de potência do vetor de Poynting em preto. A linha em ciano mostra a interface entre a camada de metal e a camada de revestimento.

Ponto de operação	Atenuação no epóxi original (dB/m)	Atenuação com epóxi em 25% (dB/m)	Diferença (%)
25mm - 125 kHz (a)	2.0768	1.6104	22.46
25mm - 125 kHz (b)	24.7102	4.6898	81.02
25mm - 125 kHz (c)	36.6578	5.9428	83.79
25mm - 125 kHz (d)	10.4067	3.2641	68.63
25mm - 285 kHz (a)	67.7926	33.3144	50.86
25mm - 285 kHz (b)	22.3371	19.3444	13.40
25mm - 285 kHz (c)	58.4725	17.1598	70.65
25mm - 285 kHz (d)	110.1878	17.1816	84.41
20mm - 160 kHz (a)	6.4971	9.3294	43.59
20mm - 160 kHz (b)	66.7902	3.2272	95.17
20mm - 160 kHz (c)	10.6663	3.3623	68.48
20mm - 160 kHz (d)	5.8651	66.095	1026.92
20mm - 300 kHz (a)	45.2717	20.6119	54.47
20mm - 300 kHz (b)	18.8492	12.5383	33.48
20mm - 300 kHz (c)	81.685	14.3844	82.39
20mm - 300 kHz (d)	62.512	16.91932	72.93
15mm - 210 kHz (a)	4200.3495	2.429	99.94
15mm - 210 kHz (b)	10.6983	3.4622	67.64
15mm - 210 kHz (c)	5.5484	4.6133	16.85
15mm - 210 kHz (d)	7.8822	5.1732	34.37
15mm - 330 kHz (a)	25.8151	8.9394	65.37
15mm - 330 kHz (b)	18.2566	13.0265	28.65
15mm - 330 kHz (c)	146.907	144.3124	1.77
15mm - 330 kHz (d)	31.4717	11.6143	63.10
10mm - 310 kHz (a)	11.3185	4.2161	62.75
10mm - 310 kHz (b)	6.063	3.8425	36.62
10mm - 310 kHz (c)	37.0653	5.3189	85.65
10mm - 310 kHz (d)	14.8148	4.7023	68.26
10mm - 405 kHz (a)	13.049	114.3644	776.42
10mm - 405 kHz (b)	55.9178	8.4143	84.95
10mm - 405 kHz (c)	27.8437	9.8232	64.72
10mm - 405 kHz (d)	40.4883	9.2063	77.26

Média:	78.98
---------------	-------

Tabela B.6: Comparação dos valores de atenuação dos modos estudados para as diferentes espessuras de revestimento de epóxi para constante de velocidade de fase reduzida de 75 % de seu valor original.

C Processamento de dados do modelo analítico

Nesse apêndice apresenta-se o processamento dos dados obtidos no modelo analítico criado por Van Velsor em [7] com alterações pertinentes, onde foi utilizado o software comercial Matlab[®] para obter as características dos modos estudados.

O diagrama de blocos exibido na Fig. C.1, denota o procedimento para obter os gráficos de dispersão e os perfis de modo através do modelo semi-analítico. Como se pode ver na Fig. C.1, primeiramente são inseridas as entradas do código, a saber, as constantes dos materiais, raio interno, raio interno, densidade, velocidade da onda de corpo longitudinal, constante de atenuação longitudinal, velocidade da onda de corpo transversal e constante de atenuação transversal através de uma planilha ilustrada na Fig. C.2, vale ressaltar que os valores de atenuação estão em unidade de Np/mm em função da frequência, diferente de dB/m , sendo necessário fazer a conversão durante o processo, tal conversão pode ser vista conforme Eq. C-1.

$$1 \frac{Np/mm}{\omega} = 20 \log_{10}(e) \frac{dB/mm}{\omega} \approx 8685.89 \frac{dB/m}{\omega}, \quad (C-1)$$

Após isso, insere-se as velocidades de fase e as frequências de excitação dos modos a serem estudados no código de Matlab e com isso aplica-se o método descrito no apêndice A. Ao terminar de aplicar, plota-se os gráficos de dispersão, a saber, velocidade de fase e atenuação em função da frequência. Por fim, calcula-se os perfis de modo para analisar o comportamento dos mesmos ao longo da espessura do duto a ser analisado. As principais alterações do código original [7] são exibidos a seguir.

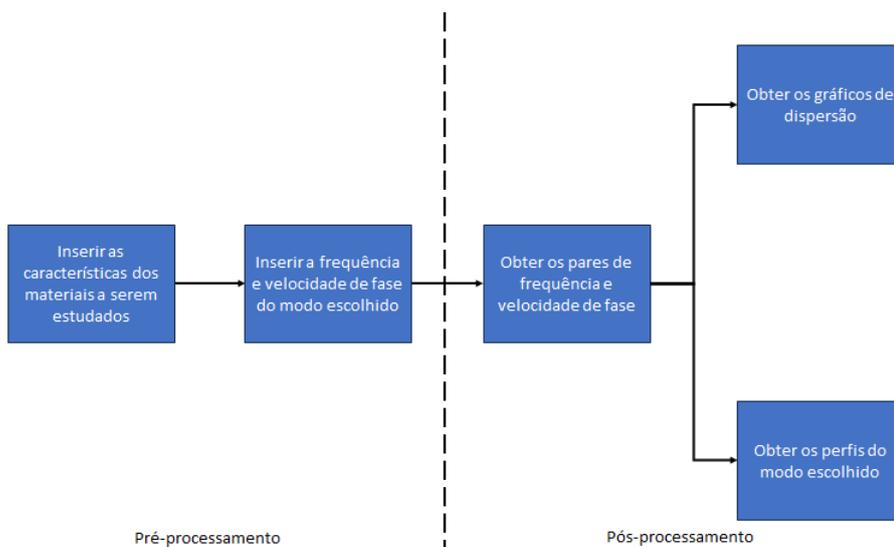


Figura C.1: Diagrama de blocos para o modelo analítico.

	Layer 1	Layer 2	Layer 3
Inner Radius (m)	0.15555	0.1619	
Outer Radius (m)	0.1619	0.1629	
Density (kg/m ³)	7850	953	
CL (m/s)	5850	2344	
alphaL (Np/mm)/omega	0	0.0117	
CS (m/s)	3230	953	
alphaS (Np/mm)/omega	0	0.0478	

Figura C.2: Planilha das características dos materiais a serem inseridas.

```

clc
clear
close all;

colorsVec = ["r.", "k.", "c.", "m.", "g."];

folderName = % Inserir pasta
inputFileName = 'teste';
numVec = 0:3;
fInt = [406.6, 403.3, 406.6, 404.4]*1e-3; %Frequencias
      dos modos estudados
cInt = [4068, 4039, 4073, 4053]*1e-3; %Velocidade de fase
      dos modos estudados

.
.
.

% ----- Matrizes elementais
% ----- %
display('Calculando as matrizes elementais...')

start = 1;
for ff = 1:1:NoL

    % Velocidade de fase e atenuacao calculadas com
    modelo de Bartoli, explicado em [1,7].
    % Existem outros modelos para tais calculos
    [1,7], mas faz-se necessario adapta-los ao
    codigo.
    CSi(ff) = CS(ff) / ( 1 - 1i*AS(ff) ); %

```

```

    Velocidade de fase
    mu(ff) = rho(ff)*CSi(ff)^2; % Segunda constante
        de Lamé

    C = [mu(ff) 0; 0 mu(ff)]; % Matriz de rigidez
.
.
.
end

.
.
.

%
-----
%
% ----- Calculando os perfis do modo
----- %
wInt = 2*pi*fInt(aaaa);
[~,idxWInt] = min(abs(wVec- wInt));
wInt = wVec(idxWInt);
fInt(aaaa) = wInt/2/pi;
[~,idxCInt] = min(abs(c(:,idxWInt)- cInt(aaaa)));
cInt(aaaa) = c(idxCInt,idxWInt);
atdBInt = atdBperm(idxCInt,idxWInt);

.
.
.

Uz = real(V(NoN+1:1:2*NoN,rac)) / max(abs(real((V(NoN
+1:1:2*NoN,rac))))));
start = 1;
for ii = 1:1:NoL
    for jj = start:1:sum(rNoE(1:1:ii))
        trz(jj) = real(mu(ii)/L(jj) * (Uz(jj+1)-Uz(jj)
            ));
        toz(jj) = imag( 1i*mu(ii)*D(rac,rac)/N(jj)*Uz
            (jj) );
        S(jj) = -1/2*(conj(1i*wInt*Uz(jj))*toz(jj));
    end
end

```

```
start = sum(rNoE(1:1:ii))+1;  
end  
  
.  
.  
.  
  
end
```

D

Processamento de dados do modelo numérico

Nesse apêndice apresenta-se o processamento dos dados obtidos no modelo numérico, onde foi utilizado o software comercial OnScale[®] para simular a propagação dos modos em uma placa revestida, e também foi utilizado um outro software comercial, Matlab[®], para processar os dados obtidos.

D.1

Introdução

Para o código utilizado nesta dissertação, mostrado no final dessa seção, é necessário uma série de processamentos no modelo numérico a fim de obter os resultados reportados nesta dissertação, mais precisamente os resultados do cálculo de atenuação e análise de defeitos. Os trechos principais do código OnScale[®] utilizados é exibido a seguir.

```
/* Atenuacao da onda S em Np/mm/omega
symb att_s = /* Attenuation s-wave (Np/mm/omega)

/* Atenuacao da onda P em Np/mm/omega
symb att_p = /* Attenuation p-wave (Np/mm/omega)

/* Atenuacao da onda S convertido para dB/m/Hz
e multiplicado pela freq de excitacao
symb att_VDMP_s = $att_s * 8.686 / ( 1e6 / ( 2 * $pi ) ) * $freqint

/* Atenuacao da onda P convertido para dB/m/Hz
e multiplicado pela freq de excitacao
symb att_VDMP_p = $att_s * 8.686 / ( 1e6 / ( 2 * $pi ) ) * $freqint

.
.
.

matr
    type elas
    wvsp on
    prop coa $rho_coat $cL_coat $cT_coat
```

```

/* Comando de atenuacao inserido , necessario passo anterior .
Para melhor entedimento do comando, acesso o manual do software .
Caso queira remover o efeito de atenuacao , retire esse comando .

    vdm p coa $freqint dB $att_VDMP_p $att_VDMP_s $freqint 1 1e-3 1
.
.
.

pout
    form matlab h1 /* MatLab format
    hist zvel $i0 $iend $iRes $j0 $jend_coat
$jRes $kprobeCentre $kprobeCentre *
    end

```

D.2

Cálculo de atenuação

O diagrama de blocos exibido na Fig. C.1, denota o procedimento para calcular a atenuação e os perfis do modo. Como se pode ver na Fig. D.1, primeiramente é inserido as constantes dos materiais, a saber, espessura, densidade, velocidade da onda de corpo transversal e constante de atenuação transversal no software de elementos finitos OnScale[®]. Neste software faz-se necessário fazer a conversão do valor para dB/m e multiplicar pela frequência de excitação, conforme Eq. D-1, para que tal software consiga calcular o valor de atenuação de cada modo. A explicação de como esse cálculo é feito encontra-se no manual do software [50].

$$att_{Input} = Att \left[\frac{Np/mm}{\omega} \right] \frac{20 \log_{10}(e)}{10^6/2\pi} f_{int}, \quad (D-1)$$

onde f_{int} é a frequência de excitação do modo e att_{Input} é o valor a ser inserido no valor de atenuação. Após isso, define-se o comprimento de onda a ser estudado e a sua frequência de excitação e a geometria da placa, que deverá possuir espessura equivalente ao inserido no modelo analítico. A seguir, são retiradas as constantes de atenuação para calcular os efeitos de difração da onda, sendo que para retirar basta apenas apagar o comando *vdm p* do código. Em seguida, são reinseridas as constantes de atenuação dos materiais viscoelásticos ao recolocar o comando *vdm p* e calcula-se os efeitos de dispersão e atenuação em conjunto. A partir disso, ambos os valores são aplicados no código em Matlab denominado "cálculo de atenuação" a fim de obter o valor de atenuação do modo escolhido e o código "Perfis dos modos" para obter os perfis dos modos.

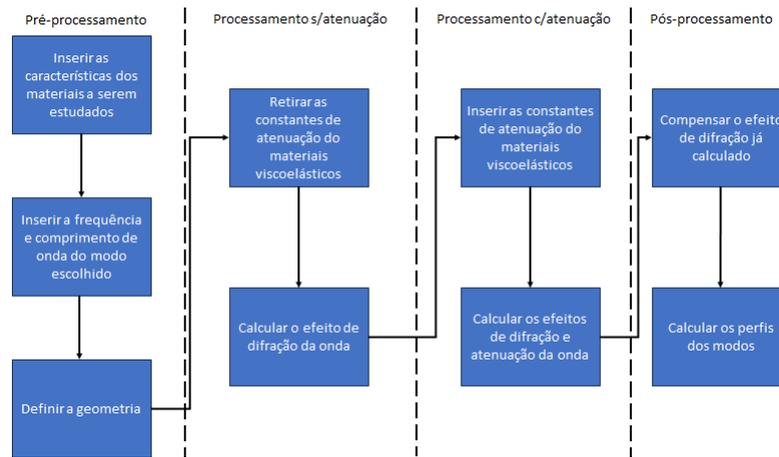


Figura D.1: Diagrama de blocos para o cálculo de atenuação do modelo numérico.

D.2.1 Análise de defeitos

O diagrama de blocos visto na Fig. D.2, denota o procedimento para análise de defeitos. Semelhante ao caso anterior, primeiramente insere-se as constantes dos materiais, a saber, espessura, densidade e velocidade da onda de corpo transversal. Após isso, define-se o comprimento de onda a ser estudado e a sua frequência de excitação e a geometria da placa, que deverá possuir espessura equivalente ao inserido no modelo analítico. A seguir, insere-se as constantes de atenuação no comando *vdmp* para obter os efeitos de atenuação da onda. Após, ainda sem modelar o defeito, o modelo calcula o campo de velocidade no ponto (300,0,100) mm, para obter uma comparação da placa sem defeitos. A seguir, modela-se o defeito centrado em (500,100) mm no plano *xz* e espessura de 3 mm na parte inferior da placa e se calcula novamente o campo de velocidade, a partir do campo de velocidade obtido nessa segunda etapa, calcula-se o mapa de cores. Por fim, faz-se uma comparação gráfica entre os dois campos de velocidades calculados.

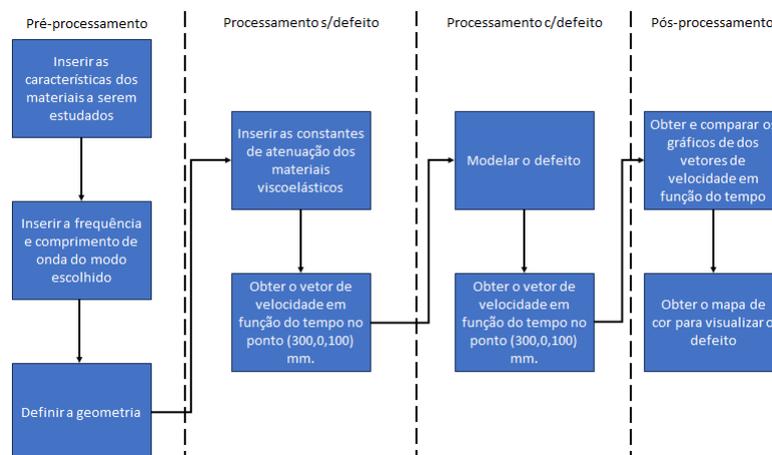


Figura D.2: Diagrama de blocos para a análise de defeitos.