Pontifícia Universidade Católica
do Rio de Janeiro

Luis Paulo Brasil de Souza

Modelo Numérico Semi-Analítico para a Propagação de Ondas Acústicas Guiadas em Tubulares Excêntricos com Aplicações na Perfilagem de Poços de Petróleo

Tese de Doutorado

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor pelo Programa de Engenharia Mecânica da PUC-Rio.

Orientador : Prof. Dr. Arthur Martins Barbosa Braga
Coorientador: Prof. Dr. Alan Conci Kubrusly

Rio de Janeiro
Maio de 2024

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

Luis Paulo Brasil de Souza

Modelo Numérico Semi-Analítico para a Propagação de Ondas Acústicas Guiadas em Tubulares Excêntricos com Aplicações na Perfilagem de Poços de Petróleo

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor pelo Programa de Engenharia Mecânica da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo:

Prof. Dr. Arthur Martins Barbosa Braga
Orientador
Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. Dr. Alan Conci Kubrusly
Coorientador
Centro de Estudos em Telecomunicações - CETUC – PUC-Rio

Prof. Dr. Leonardo Dantas Rodrigues
Departamento de Engenharia Mecânica - UFPA

Prof. Dr. Daniel Alves Castello
Departamento de Engenharia Mecânica - UFRJ

Prof. Dr. Ivan Fabio Mota de Menezes
Departamento de Engenharia Mecânica - PUC-Rio

Dr. Roberth Waldo Ângulo Llerena
Ouronova

Rio de Janeiro, 03 de Maio de 2024

Luis Paulo Brasil de Souza

Graduou-se em Engenharia Elétrica pelo Instituto de Estudos Superiores da Amazônia, na área de Qualidade de Energia Elétrica. Graduou-se e fez Mestrado em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Pará, na área de Vibrações e Acústica.

Ficha Catalográfica

Souza, Luis Paulo Brasil

Modelo Numérico Semi-Analítico para a Propagação de Ondas Acústicas Guiadas em Tubulares Excêntricos com Aplicações na Perfilagem de Poços de Petróleo / Luis Paulo Brasil de Souza; orientador: Arthur Martins Barbosa Braga; coorientador: Alan Conci Kubrusly. – 2024.

213 f: il. color. ; 30 cm

Tese (doutorado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, 2024.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Mecânica – Teses. 2. P&A, Método dos Elementos Finitos Semi-Analíticos, Defeitos na Camada de Cimento, Excentricidade do Tubo de Produção.. I. Braga, Arthur Martins Barbosa. II. Kubrusly, Alan Conci. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDD: 004

À minha família.

Agradecimentos

Ao meu orientador Professor Dr. Arthur Martins Barbosa Braga e ao meu coorientador Alan Conci Kubrusly.

À minha família, Juliana, Jurandir, Celina, Joana, Sandra, Victor, Mauricio, Erika, Isaias, Manuella, Beatriz e Heitor.

Aos companheiros de laboratório, Sávio, Isabel, Tiago, Mateus, Juan, Guilherme, Dario, Leonardo, Roney, Luiz Fabiano, Aldo, Thiagão, Alexandre, Luiz Américo, Hugo, André e Paula.

Ao Belchior e Jorel.

À PUC-Rio pela bolsa de isenção de mensalidades do doutorado e estrutura acadêmica.

À REPSOL SINOPEC Brasil pelo apoio financeiro do projeto TTiLT.

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

Resumo

Souza, Luis Paulo Brasil; Braga, Arthur Martins Barbosa; Kubrusly, Alan Conci. **Modelo Numérico Semi-Analítico para a Propagação de Ondas Acústicas Guiadas em Tubulares Excêntricos com Aplicações na Perfilagem de Poços de Petróleo**. Rio de Janeiro, 2024. 213p. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Com o aumento das campanhas de tamponamento e abandono de poços de petróleo maduros pelo mundo, vários centros de pesquisa têm investido em ferramentas de inspeções acústicas e técnicas mais robustas para analisar a integridade do poço de petróleo através do tubo de produção. As análises através do tubo de produção proporcionam uma economia significativa na etapa de abandono, porém as análises são complexas devido à baixa energia recebida e por eventuais excentricidades. O objetivo deste trabalho é analisar as características dos defeitos aplicados na camada de revestimento de cimento de um poço de petróleo com e sem excentricidade do tubo de produção, através de curvas de dispersão e por curvas de coerência de tempo-vagarosidade; e comparar estas curvas com os dados obtidos por simulações pelos métodos de elementos finitos, semi-analíticos e experimentos realizados em escala. Os experimentos realizados incluíram os defeitos mais comuns encontrados, como canalização de fluido na camada de cimento, excentricidade do tubo de produção e baixa impedância de cimento. Os modelos semi-analíticos quando comparados com o método dos elementos finitos apresentaram boa coerência e menor custo computacional. Os experimentos foram realizados em uma bancada experimental dedicada, instrumentada e controlada por um complexo sistema de controle e aquisição de sinais. Para todos os casos com o tubo de produção, notou-se um menor número de modos de onda e menor amplitude de sinal em comparação aos casos sem o tubo de produção. Os resultados do método de tempo e coerência lenta mostraram-se ineficazes na análise de defeitos. Concluiu-se que o método semi-analítico, validado através de diversos modelos analíticos, simulações utilizando o método dos elementos finitos e com diversos experimentos, é uma ferramenta valiosa na análise de defeitos e na verificação da variação dos modos de onda com a excentricidade aplicada.

Palavras-chave

P&A, Método dos Elementos Finitos Semi-Analíticos, Defeitos na Camada de Cimento, Excentricidade do Tubo de Produção.

Abstract

Souza, Luis Paulo Brasil; Braga, Arthur Martins Barbosa (Advisor); Kubrusly, Alan Conci (Co-Advisor). **Semi-analytical numerical model for the propagation of guided acoustic waves in eccentric tubulars with applications in well logging**. Rio de Janeiro, 2024. 213p. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

With the increase in plugging and abandonment campaigns for mature oil wells around the world, several research centers have invested in acoustic inspection tools and more robust techniques to analyze the integrity of the oil well through the production tubing. Analyzes through the production tubing provide significant savings in the abandonment stage, however their analysis is complex due to the low energy received and possible eccentricities. The objective of this work is to analyze the characteristics of defects applied to the cement casing layer of an oil well with and without production tubing eccentricity, through dispersion curves and slowness-time coherence curves; and compare these curves with data obtained by simulations using finite element methods, semi-analytical methods and experiments carried out at scale. The experiments carried out included the most common defects found, such as fluid channeling in the cement layer, eccentricity of the production tubing and low cement impedance. The semi-analytical models when compared with the finite element method showed good coherence. For all cases with the production tubing, a smaller number of wave modes and lower signal amplitude were noted compared to cases without the production tube. The results of the slowness-time coherence method proved to be ineffective in defect analysis. It was concluded that the semi-analytical method, validated through several analytical models, simulations using the finite element method and with several experiments, is a valuable tool in analyzing defects and verifying the variation of wave modes with the applied eccentricity.

Keywords

P&A, Semi-Analytical Finite Element Method, Defects in the Cement Layer, Eccentricity of the Production Tubing.

Sumário

Lista de figuras

Lista de tabelas

Lista de algoritmos

Lista de abreviaturas

FEM – Método de elementos finitos

SAFE – Método de elementos finitos semi-analíticos

NT – Sem tubo de produção (*No Tubing*)

NE – Com tubo de produção e sem excentricidade (*No Eccentricity*)

E – Com tubo de produção e com excentricidade (*Eccentricity*)

F – Caso da região após o revestimento é composta por água

C – Caso da região após o revestimento é composta por cimento e sem defeito

CH – Caso da região após o revestimento é composta por cimento com defeito tipo canais de fluido

CL – Caso da região após o revestimento é composta por cimento de vedação com o defeito do tipo baixa impedância acústica

2DFT – Transformada de Fourier bidimensional

DAQ – Aquisição digital (*Digital Acquisition*)

STC – Curva tempo-vagarosidade (*Slowness-Time Coherence*)

NIK – Módulos de aquisição digital de sinais elétricos

Lista de símbolos

Z – Impedância acústica

v – Velocidade

ρ – Densidade

R – Coeficiente de reflexão

T – Coeficiente de transmissão

D_t – Diâmetro do tubo de produção

D_{ic} – Diâmetro do interno do revestimento interno

D_c – Diâmetro da camada de vedação de cimento

D_{oc} – Diâmetro do revestimento externo

d_{tc} – Distância entre os eixos do tubo de produção e da camada de revestimento interna

d_{tc} – Deslocamento do tubo de produção

d_e – Relação entre os diâmetros D_{ic}, D_t e th_{ic}

ecc – Nível de excentricidade

V – Volume

x, y e z – Eixos de coordenadas cartesianas

$\boldsymbol{e}_x$, $\boldsymbol{e}_y$ e $\boldsymbol{e}_z$ – Versores dos eixos de coordenadas cartesianas

$\boldsymbol{u}$ – Deslocamento

$\boldsymbol{\nabla}$ – Operador nabla

$\boldsymbol{\sigma}$ – Tensão mecânica

$\boldsymbol{b}$ – Força de corpo

$\boldsymbol{\varepsilon}$ – Deformação

^{T} – Operação de transposição

C – Matriz de rigidez

λ, μ – Constantes de Lamé

p – Pressão

I – Matriz identidade

$\boldsymbol{\tau}$ – Tensão deviatória

m – Massa

$\boldsymbol{\phi}$ – campo de velocidade potencial

i – Unidade imaginária

k – Número de onda

λ_{wl} – Comprimento de onda

t – Tempo

ω – Frequência angular

f – Frequência

t_p – Período

v_p – Velocidade de fase

s – Vagarosidade

φ – Campo potencial escalar

$\boldsymbol{\psi}$ – Campo potencial vetorial

v_L – Velocidade de corpo longitudinal

v_T – Velocidade de corpo Transversal

h – Espessura

J_n – Funções de Bessel de primeiro tipo

Y_n – Funções de Bessel de segundo tipo

h_n são as funções de Bessel do terceiro tipo

$\boldsymbol{G}$ – Tensor de impedância superficial

Z – Impedância escalar do fluido interno

$\otimes$ – Produto tensorial

$\mathcal{G}$ – Impedância escalar local

$\mathcal{Z}$ – Impedância escalar do fluido externo

$\boldsymbol{H}(r)$ – Tensor de reflexão generalizado

$\boldsymbol{R}$ – Tensor de reflexão

$\mathcal{H}(r)$ – Reflexão generalizada escalar

$\mathcal{R}$ – Reflexão escalar

$\boldsymbol{t}$ – Vetor de tensão u_x, u_y, u_z – Componentes do deslocamento em coordenadas cartesianas

η – nó

$\boldsymbol{N}$ – Função de forma

$\boldsymbol{u}^e$ – Deslocamento nodal

j – Quantidade de elementos

ε^e – Deformação nodal

$\boldsymbol{L}_x$, $\boldsymbol{L}_y$, $\boldsymbol{L}_z$ – Matrizes auxiliares para a deformação nodal para coordenadas cartesianas

$\boldsymbol{B}_1$, $\boldsymbol{B}_2$, $\boldsymbol{B}_3$ – Matrizes auxiliares para cálculo da deformação nodal

δ – Variacional

A – Área

$\hat{\boldsymbol{n}}$ – Vetor normal à superfície

$\boldsymbol{k}^e$ – Matriz elementar de rigidez

$\boldsymbol{m}^e$ – Matriz elementar de inércia

$\boldsymbol{K}$ – Matriz global de rigidez

$\boldsymbol{M}$ – Matriz global de rigidez

$\mathbb{U}$ – Matriz global de deslocamento

$\boldsymbol{T}$ – Matriz de transformação

$\hat{\boldsymbol{K}}$ – Matriz de rigidez transformada

ϕ_x, ϕ_y, ϕ_z – Componentes do campo potencial de velocidade em coordenadas cartesianas

$\boldsymbol{\phi}^e$ – Campo potencial de velocidade nodal

$\boldsymbol{v}^e$ – Velocidade nodal

$\boldsymbol{\Phi}$ – Matriz global de deslocamento

$\boldsymbol{H}$ – Submatriz de acoplamento

$\boldsymbol{K}_c$ – Matriz de acoplamento

^{s} – Matrizes referentes ao material sólido

^{f} – Matrizes referentes ao material fluido

$\overline{\boldsymbol{K}}$ – União da matrizes de rigidez

$\overline{\boldsymbol{M}}$ – União da matrizes de inércia

$\boldsymbol{\Psi}$ – União das matrizes de deslocamento e campo potencial de velocidade

$\overline{\boldsymbol{\Psi}}$ – União das matrizes $\boldsymbol{\Psi}$ reais e complexas

$\boldsymbol{A}$ – Matriz auxiliar para o cálculo dos autovalores e autovetores sem k

$\boldsymbol{B}$ – Matriz auxiliar para o cálculo dos autovalores e autovetores com k

r, θ e z – Eixos de coordenadas cilíndricas

$\boldsymbol{e}_r$, $\boldsymbol{e}_\theta$ $\boldsymbol{e}_z$– Versores dos eixos de coordenadas cilíndricas

u_r, u_θ, u_z – Componentes do deslocamento em coordenadas cilíndricas

n – modo circunferencial

$\boldsymbol{L}_c$, $\boldsymbol{L}_r$, $\boldsymbol{L}_\theta$, $\boldsymbol{L}_z$ – Matrizes auxiliares para a deformação nodal para coordenadas cilíndricas

N_u – Função de forma para elemento sólido

N_ϕ – Função de forma para elemento fluido

f_{band} – Banda em frequência

$2D - SIM$ – Simulações 2D axissimétricas para casos concêntricos

$3D - SIM$ – Simulações 3D para casos excêntricos

r_b – Raio da fonte de pressão acústica

h_b – Distância do início do modelo à fonte de pressão acústica

h_p – Distância entre o primeiro e o último ponto de aquisição

Δx – Comprimento mínimo do elemento

cL_{min} – Velocidade mínima da onda longitudinal no modelo

$n_e lem$ – Número inteiro usado na convergência de malha

Δt – Incremento de tempo para as simulações

S – Sinais no domínio do tempo

R – Sinais no domínio da frequência

ST – Valor de coerência

z_w – Altura do receptor em relação ao primeiro receptor

w – Número do receptor

W – Número total de receptores

a_i – Tempo de chegada da onda

s_j – Vagarosidade da onda

T_w – Janela de tempo de análise da coerência

D – Diâmetro

d – Distância

Dh – Relação diâmetro espessura

th – Espessura dos tubos utilizados nos experimentos

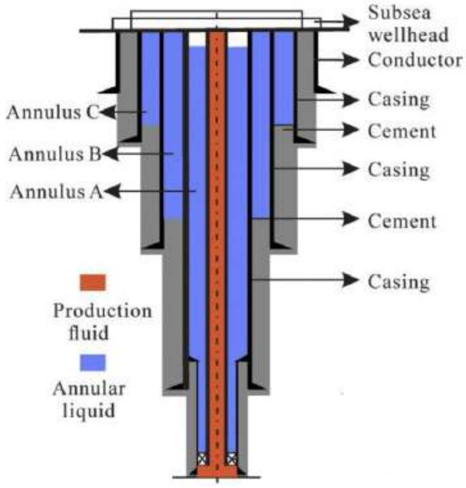
α^{Wang} – Relação entre velocidades

Antônio Carlos Gomes Belchior, *Musica: Tudo Outra Vez*
Álbum: Era uma vez um homem e seu tempo, 1979.

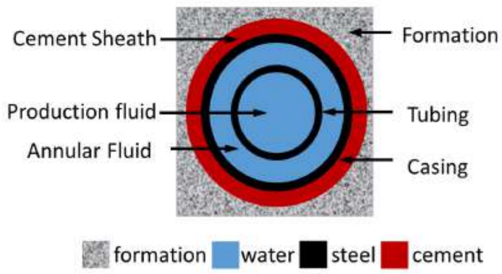
1
Introdução

Com o fim da vida útil ou econômica de um poço de petróleo, tipicamente entre 15 a 20 anos, este deve ser inspecionado, analisado, tamponado e então abandonado [1] [2]. Esta operação crítica é conhecida como tamponamento e abandono, que abrevia-se como P&A (em inglês, *Plug and Abandonment*) e visa assegurar a estanqueidade dos fluidos contidos no poço e a integridade estrutural do poço [3] [4], para que não hajam danos ao meio ambiente [1]. Segundo Khalifeh *et al.* [2], as operações de P&A podem facilmente contribuir com 25 % do custo total da perfuração de poços de exploração ou até ter o custo semelhante ao custo da operação de perfuração original. Entretanto, atualmente se formam mercados de serviços e inovações tecnológicas aplicadas ao P&A, pois há, segundo a Associação da Indústria de Petróleo e Gás do Reino Unido (OGUK) [5], *apud* Chukwuemeka *et al.* [6], uma estimativa de que sejam gastos aproximadamente 16.57 bilhões de libras em atividades de descomissionamento, somente no Reino Unido até 2030, e que cerca de 50 % deste total está ligado ao encerramento e abandono de poços. Um correto entendimento sobre as condições do poço de petróleo e sua análise, diminui os riscos eminentes da etapa de P&A [7], porém as analises estão ligadas a ferramentas ou equipamentos instalados nos poços, e que por sua vez, enfrentam condições adversas nos poços como impacto mecânico, altas temperaturas e pressões.

As Figuras 1.1 (a) e (b) mostram um esquemático simplificado de um poço de petróleo sendo as camadas: formação (em inglês, *Formation*), camada no qual o poço está inserido; revestimento de cimento (em inglês, *Cement Sheath* ou *Casing Cement*), revestimento responsável pelo isolamento entre a formação e o revestimento de aço; revestimento de aço (em inglês, *Casing*), responsável pelo isolamento entre o revestimento de cimento e o fluido de completação; fluido de completação (em inglês, *Completion Fluid*), responsável por proteger os componentes metálicos e manter a pressão interna para garantir a integridade do poço; o tubo de produção (em inglês, *Tubing*), responsável por transportar o petróleo através do fluido de produção (em inglês, *Production Fluid*) até a superfície.



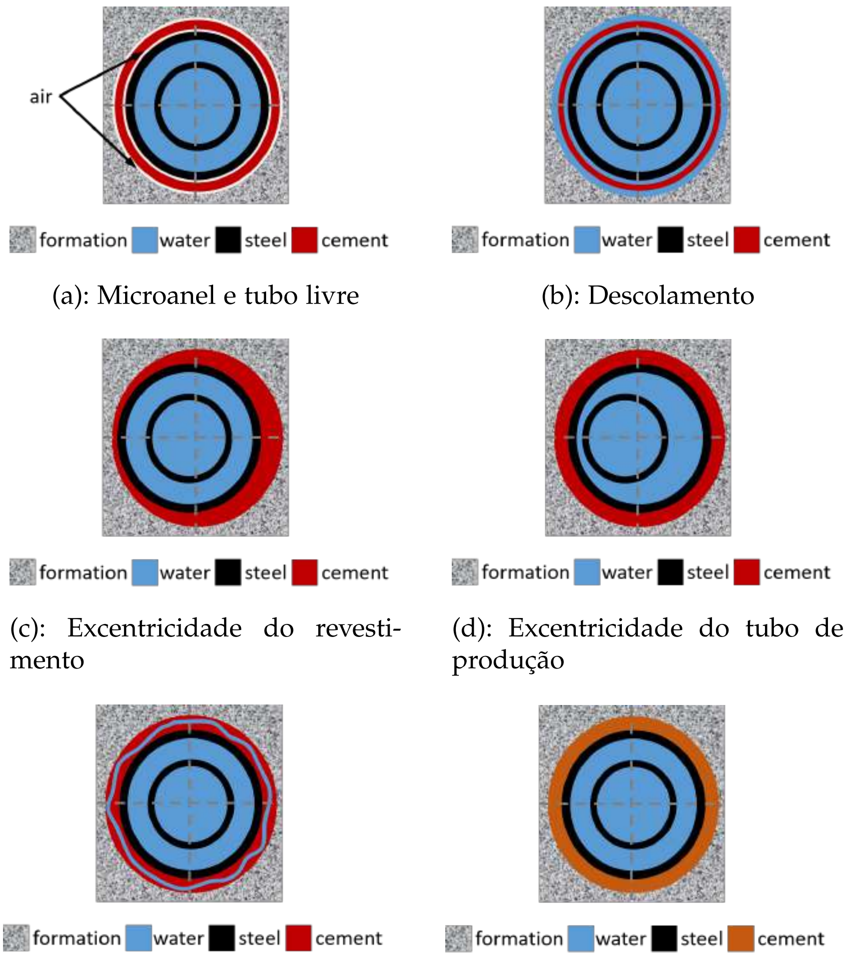
(a): Diagrama de um poço de petróleo, adaptado de [8].



(b): Detalhes das camadas existentes em um poço de petróleo.

Figura 1.1: Esquemático das camadas de um poço de petróleo. (a) Diagrama de um poço de petróleo, adaptado de [8] e (b) Detalhes das camadas existentes em um poço de petróleo.

Segundo Kiran *et al.* [4], os problemas de integridade do poço são comumente associados à qualidade do cimento, corrosão do revestimento, pressões dinâmicas e complexidades na fase de abandono. Estes problemas são ocasionados devido ao acúmulo de dano ao longo da vida do poço de petróleo. Para o proprietário do poço é importante saber se há vazamentos ou defeitos, uma vez que estes problemas deverão ser corrigidos para poder dar prosseguimento ao processo de P&A [9]. A Figura 1.1 mostra um esquemático das camadas de um poço de petróleo. Dentre as camadas citadas na Figura 1.1, a mais preocupante é a de revestimento de cimento, pois esta deve assegurar a vedação independentemente das condições ambientais [9] [4]. O revestimento de cimento é um material à base de sílica utilizado com a função de isolar hidraulicamente e evitar o fluxo de fluidos não intencionais entre o poço e a formação [9] [4] [10]. As mudanças das propriedades mecânicas podem causar defeitos na camada de cimento, e esses defeitos têm o potencial de atuar como caminhos para a migração de fluidos ou levar a instabilidade estrutural [11] [4], [9]. Correia [12] listou os defeitos mais comuns presentes em poços de petróleo, sendo eles: microanel (em inglês, *microannulus*), tubo livre (em inglês, *free pipe*), descolamento interno ou externo (em inglês, *inner or outer debonding*), excentricidade do revestimento (em inglês, *casing eccentricity*), excentricidade do tubo de produção (em inglês, *tubing eccentricity*), canalização do cimento (em inglês, *cement channeling*) e baixa impedância do cimento (em inglês, *low impedance cement*). O defeito microanel é descrito como o desacoplamento parcial (perda do acoplamento de cisalhamento) entre as camadas e seu tamanho é da ordem de um milésimo de polegada [13] [14]. O defeito de tubo livre é descrito como um desacoplamento total entre as camadas sólidas devido a um fluido inserido entre as camadas [12]. O defeito de descolamento interno ou externo é definido como um descolamento entre o cimento e as camadas próximas, além de que, há uma perda na espessura da camada de cimento [15]. O defeito excentricidade do revestimento é descrito como o deslocamento da camada de revestimento de cimento [16]. O defeito excentricidade do tubo de produção é descrito como o desalinhamento do centro do tubo de produção com o resto das camadas [17] [12]. O defeito de canalização é descrito como um ou mais canais de fluido presentes dentro da camada de cimento [12].



(a): Microanel e tubo livre

(b): Descolamento

(c): Excentricidade do revestimento

(d): Excentricidade do tubo de produção

(e): Canalização

(f): Baixa impedância

Figura 1.2: Esquemático dos defeitos mais comuns em poços de petróleo, adaptado de Correia [12].

As ferramentas utilizadas na verificação da integridade na camada de cimento, chamadas de CBLT (em inglês, *Cement Bond Logging Tools*), utilizam, tradicionalmente, princípios acústicos, cuja ação é chamada de perfilagem acústica [18] [19]. As ferramentas acústicas podem ser divididas em ferramentas sônicas e ultrassônicas [20]. O uso de ferramentas sônicas para avaliação da integridade da camada de cimento remonta à década de 1950, no qual foi notada a ocorrência de ciclos ignorados (em inglês, *cycle skipping*) devido a uma elevada atenuação em receptores a 3 pés da fonte de pressão acústica, chamada apenas de fonte [21]. Em ferramentas sônicas comerciais atuais este canal é chamado de CBL (*Cement Bond Log*) [20] [22]. Adicionalmente ao CBL, as ferramentas sônicas também possuem receptores a 5 pés da fonte, cujo canal é chamado de VDL (em inglês, *Variable Density Log*), cujo objetivo é investigar o acoplamento da camada de cimento com a formação rochosa [21]. A Figura 1.3 ilustra uma ferramenta sônica convencional em um poço de petróleo realizando uma perfilagem, onde a fonte é simbolizada pelo *Transmitter* e os canais CBL e VDL são simbolizados pelos receptores a 3 e 5 pés (3-ft *receiver* e 5-ft *receiver*).

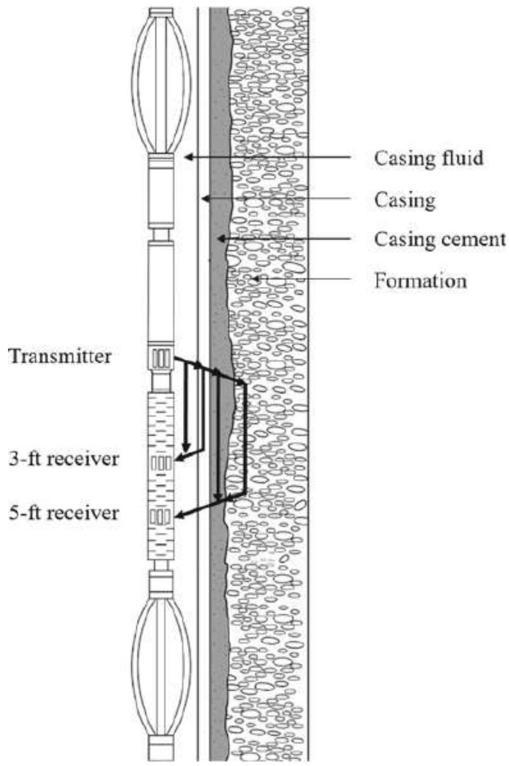


Figura 1.3: Esquemático de uma perfilagem de um poço de petróleo com uma ferramenta sônica com os canais CBL(3 pés) e VDL(5 pés) adaptado de Khalifeh *et al.* [2].

Segundo Wilson [20], as ferramentas ultrassônicas de pulso-eco, chamadas de USIT (em inglês, *Ultrasonic Imager Tool*), foram introduzidas na indústria para avaliação de cimento no início da década de 1980. Segundo Viggen *et al.* [23], atualmente a taxa de amostragem dessas ferramentas é na faixa de frequência de 2 MHz. Estas ferramentas são construídas com um transdutor que gira no eixo da ferramenta, pode assumir geralmente de 36 a 72 posições, e para cada posição aplica um pulso para estimar a impedância acústica da camada de cimento através dos múltiplos ecos recebidos pelo mesmo transdutor [23] [24]. Sendo a impedância acústica definida como

$$Z = v\rho, \tag{1-1}$$

onde Z é a impedância acústica, v a velocidade da onda de corpo e ρ é a densidade. Na Figura 1.4 é ilustrado o transdutor da ferramenta ultrassônica que apresenta a mudança na amplitude do sinal para diferentes materiais e, por consequência, gera mapas de impedância distintos.

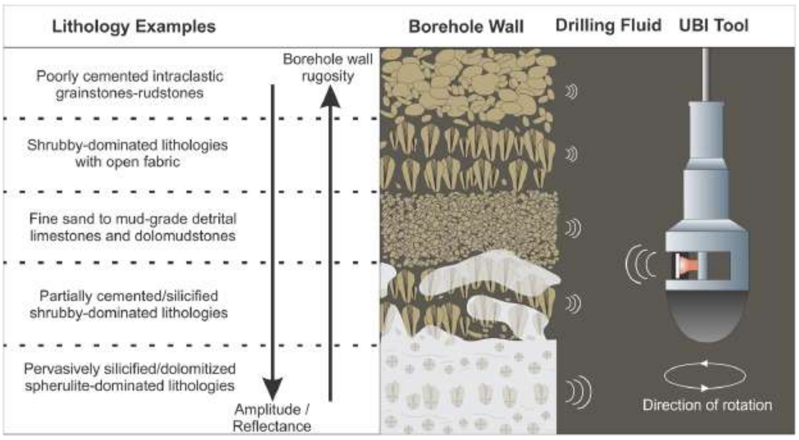


Figura 1.4: Esquemático de uma perfilagem de um poço de petróleo aberto com uma ferramenta ultrassônica, extraído de Basso *et al.* [25].

Para tentar diminuir o custo das operações de P&A sem comprometer a segurança das campanhas de abandono, cientistas estudam atualmente meios eficientes para fazer a medição da integridade da camada de cimento sem a retirada do tubo de produção [26] [27]. As medições realizadas com o tubo de produção (em inglês, *Through-tubing logging*) são complexas, devido ao baixo nível de energia que retorna para a ferramenta. O baixo nivel de energia que retorna é explicado por Zhang *et al.* [27] através dos coeficientes de reflexão $\boldsymbol{R}$ e transmissão $\boldsymbol{T}$ calculados para todas as camadas do poço de petróleo, sendo os coeficientes de reflexão e transmissão obtidos pelas equações mostradas na Figura 1.5. Zhang *et al.* [27] ainda explica que a perda de energia, calculada pelos coeficientes de reflexão e transmissão, pode chegar a 95 %.

$$\begin{cases} R = \dfrac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \\ T = \dfrac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \end{cases}$$

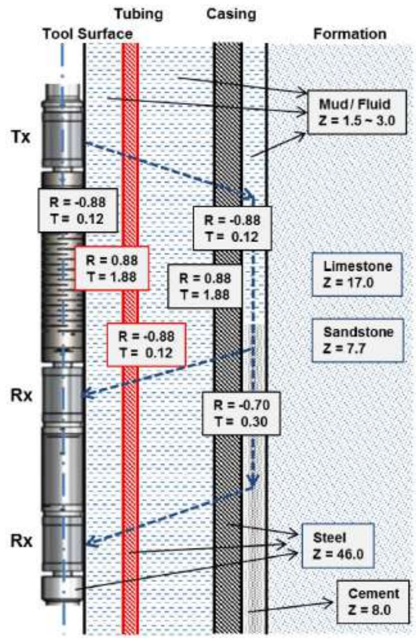


Figura 1.5: Esquemático de uma perfilagem de um poço de petróleo com uma ferramenta sônica *Through-tubing logging*) e os resultados dos cálculos dos coeficientes de reflexão ***R*** e transmissão ***T*** através da impedância ***Z*** em MRayl, extraído de Zhang *et al.* [27].

Um problema recorrente nas medições através do tubo de produção é a excentricidade, geralmente do tubo de produção em relação ao poço [28] [29], e como a as ferramentas ficam no centro do tubo de produção, a excentricidade pode mascarar defeitos ou confundir o especialista de perfilagem acústica quanto a qualidade da camada de revestimento de cimento do poço [27]. Para atestar excentricidades e evitar analises errôneas, cientistas têm desenvolvido técnicas de processamento dos sinais obtidos nas perfilagens (*Logs*) [30] [31] [32] [33]. Alternativamente, as fabricantes de ferramentas de perfilagem acústica e cientistas têm procurado desenvolver melhorias nas ferramentas, métodos analíticos e numéricos para entender o comportamento das ondas que são guiadas pelas camadas do poço de petróleo através da inserção de vários receptores verticais ou o tipo de excitação da fonte [34] [35] [36] [37] [38].

Dentre os métodos disponíveis mais utilizados na análise de defeitos nas camadas de cimento, estão os métodos analíticos, métodos de elementos finitos e o método de elementos finitos semi-analíticos. Diversas contribuições foram feitas para o uso dos métodos analíticos para propagação de ondas em cilindros para simular poços de petróleo nas últimas décadas, como Braga *et al.* [39], Braga e Aroni [40], Correia [12], Correia *et al.* [41] e Junqueira *et al.* [42]. Entretanto, os modelos analíticos não são tão versáteis para aplicações de defeitos não simétricos ou excêntricos. Os métodos de elementos finitos são amplamente utilizados para diversas áreas da indústria do petróleo e gás [43] [44] [45], porém para simulações de propagação de ondas seu custo computacional é diretamente ligado ao comprimento de onda analisado, e pode ter um custo computacional considerável. Já o método dos elementos finitos semi-analíticos, considera soluções harmônicas da propagação de ondas na direção perpendicular a seção discretizada, e permite maior flexibilidade do que os métodos analíticos e menor custo computacional do que o método dos elementos finitos [46] [29] [47].

Os avanços consideráveis dos modelos de elementos finitos semi-analíticos para ondas guiadas em poços de petróleo foram obtidos nos artigos de Liu *et al.* através de seus vários trabalhos [47] [28] [29], os quais realizaram várias simulações de modelos de elementos finitos semi-analíticos em coordenadas cartesianas para casos excêntricos e validou a aplicação do método de elementos finitos semi-analíticos através de dados reais de campo e vários experimentos; além disso conseguiu testar e atestar as varições dos modos das curvas de dispersão mais sensíveis à excentricidade. As curvas de dispersão para três casos excêntricos obtidas por Liu *et al.* [29] é apresentada na Figura 1.6, onde vê-se alterações nos modos de onda nomeados $M3_1$ e $M3_2$. A curva de dispersão representa os modos de onda propagante para cada frequência analisada, neste caso através da vagarosidade (em inglês, *slowness*) e frequência (em inglês, *frequency*).

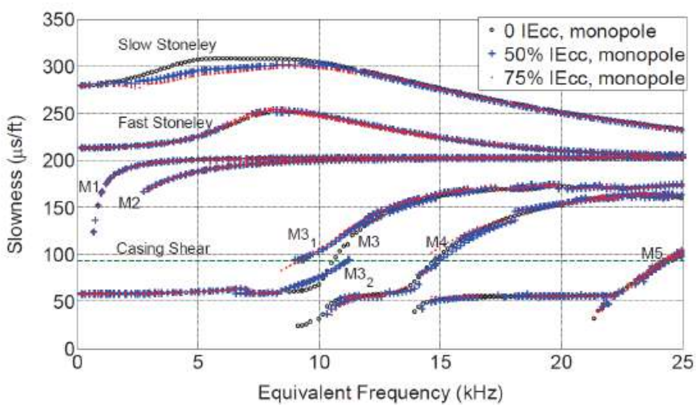


Figura 1.6: Curva de dispersão obtida em Liu *et al.* [29] para casos concêntricos e excêntricos.

Adotou-se a metodologia de Liu *et al.* [47] ilustrada na Figura 1.7, mas com coordenadas cilíndricas como descrito Kalkowski *et al.* [48] e por Van Valsor [49]. O item (a) da Figura 1.7 representa o caso do modelo de estudo, podendo ser simulação ou experimento, no item (b) representa os sinais no domínio do tempo, no item (c) representa a curva de vagarosidade e (d) representa a curva de dispersão. As curvas dos sinais no domínio do tempo são apresentadas através do tempo, posição e amplitude para cada receptor; as curvas de vagarosidade por tempo são as curvas que correspondem a energia de cada tipo de onda, compressional, flexural ou torcional, pelo tempo em que cada onda chega aos receptores, chamado de tempo de chegada, já a curva de dispersão representa os propagantes para cada frequência analisada por vagarosidade.

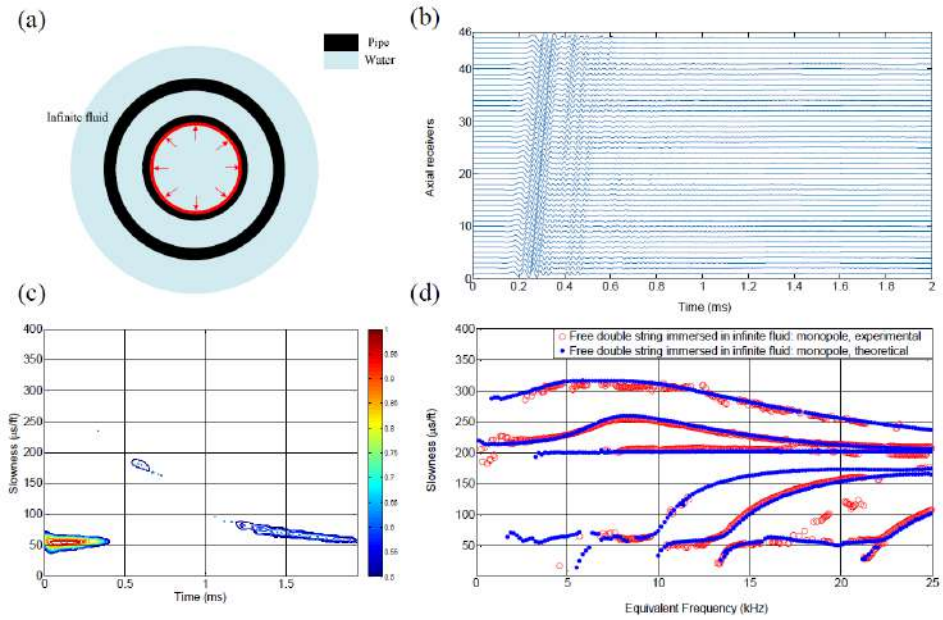
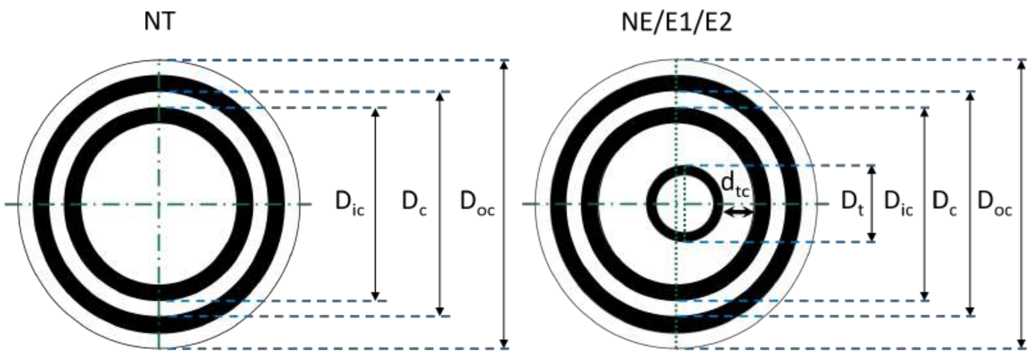


Figura 1.7: Esquemático do procedimento realizado nos artigos de Liu *et al.* [47] [28] [29], extraído de Liu *et al.* [47].

No contexto de inspeção da camada de cimento de poços de petróleo, os ensaios realizados por ferramentas sônicas e ultrassônicas têm por finalidade extrair respostas das múltiplas camadas analisadas, através dos sinais que carregam as características dos materiais, e que chegam ao centro do poço. Para conseguir criar modelos e experimentos mais facilmente dos casos da Figura 1.2, foi necessário considerar cuidadosamente algumas restrições, e que são discutidas na próxima seção.

1.1 Geometria dos Modelos

As geometrias dos modelos foram baseadas nos tipos de defeitos ilustrados na Figura 1.2, e consistem em círculos concêntricos e excêntricos de diversos materiais. Portanto, pode-se separar as geometrias em três grandes grupos, são eles: NT, que representa os casos concêntricos sem tubo de produção (*No Tubing*); NE, que representa os casos concêntricos com tubo de produção (*No Eccentricity*); E, que representa os casos excêntricos com tubo de produção (*Eccentricity*). Esses são subdivididos em dois subgrupos; E1, que representa um nível de excentricidade moderada de 48.79 % e E2, que representa um nível de excentricidade máxima de 100 %. A Figura 1.8 mostra a geometria dos modelos, sendo D_t o diâmetro do tubo de produção, D_{ic} o diâmetro do revestimento interno, D_c o diâmetro da camada de vedação de cimento, D_{oc} o diâmetro do revestimento externo e d_{tc} a distância entre o tubo de produção e da camada de revestimento interna. É importante notar que a camada da formação rochosa foi substituída por uma camada de fluido e uma de aço para atenuar suficientemente os sinais lidos no centro do modelo, esta remoção da camada de formação rochosa foi motivada pela realização dos experimentos, uma vez que para a mudança dos casos propostos seria muito custoso.



(a): Caso NT
(b): Casos NE ou E1 ou E2

Figura 1.8: Geometria dos modelos. (a) Caso NT, (b) Casos NE ou E1 ou E2.

Para cada grupo (NT, NE e E) são aplicadas as condições F (*Fluid*), que representa a região após o revestimento, sendo composta por água; C, que representa a região após o revestimento, sendo composta por cimento de vedação e sem defeito (*Cement*); CH que representa a região após o revestimento, sendo composta por cimento de vedação com o defeito do tipo canais de fluido (*Channeling*) e CL, que representa a região após o revestimento, sendo composta por cimento de vedação com o defeito do tipo baixa impedância acústica (*Cement Low-Quality*). A geometria para os casos NT é mostrada na Figura 1.9.

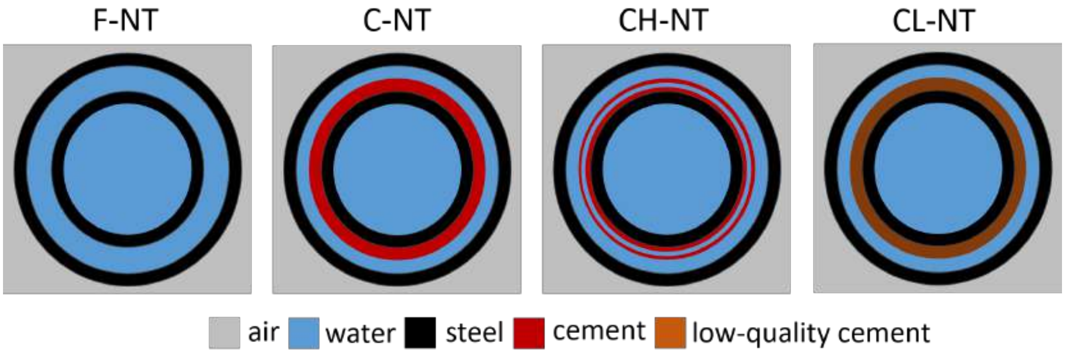


Figura 1.9: Modelos para o caso NT.

A geometria para os casos NE é mostrada na Figura 1.10 e a geometria para os casos E é mostrada na Figura 1.11, sendo a diferença entre os modelos NE e E apenas o nível de excentricidade *ecc*. O *ecc* é definido neste trabalho como a distância entre os eixos do revestimento interno e do tubo de produção. O *ecc* varia de 0 a 100 %, sendo 0 uma condição concêntrica e 100 % uma condição em que o tubo de produção entra em contato com a camada de revestimento. O *ecc* é definido como

$$ecc = \frac{|d_{tc}|}{d_e} 100, \tag{1-2}$$

onde d_{tc} é o deslocamento do centro do *tubing*, d_e é a relação $d_e = (\frac{D_{ic}}{2} - \frac{D_t}{2}) - th_{ic}$ e th_{ic} é a espessura da camada de revestimento interna.

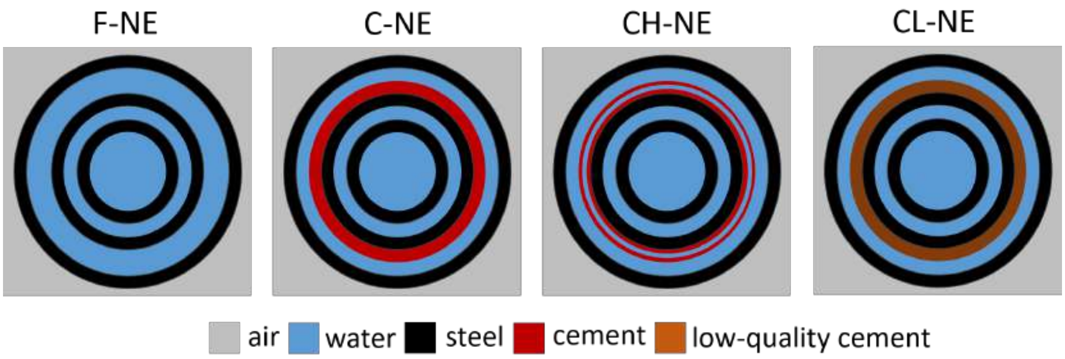
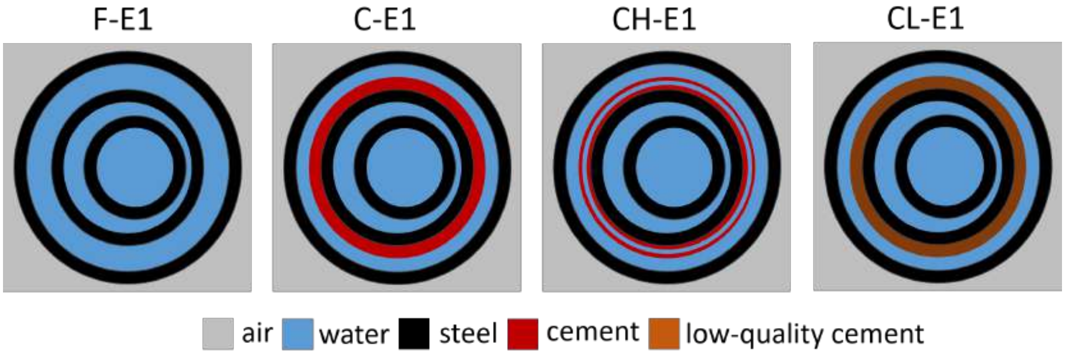
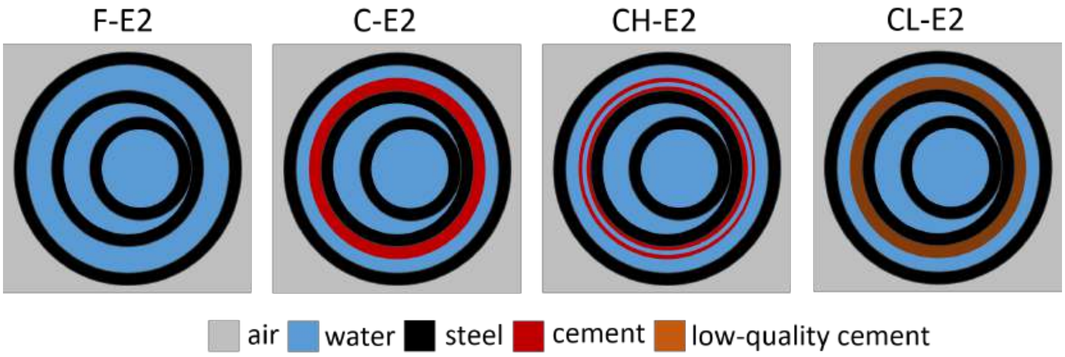


Figura 1.10: Modelos para caso NE.



(a): Caso E1, com 48.79 % de excentricidade



(b): E2, caso com 100 % de excentricidade

Figura 1.11: Modelos para caso E. (a) Caso E1, com 48.79 % de excentricidade e (b) E2, caso com 100 % de excentricidade.

Todos os modelos numéricos citados neste trabalho e a bancada experimental construída, instrumentalizada e controlada, utilizam as geometrias mostradas nas Figuras 1.9, 1.10 e 1.11.

1.2 Objetivo Geral

O objetivo geral dessa tese é comparar os resultados dos modelos semi-analíticos, numéricos e experimentais para análise de defeitos na camada de revestimento de cimento em poços de petróleo e sua utilização na interpretação de perfilagens acústicas em casos com ou sem tubo de produção.

1.3 Objetivos Específicos

- Comparar os resultados do modelo semi-analítico com os resultados de modelos numéricos;
- Comparar os resultados do modelo semi-analítico com os resultados de experimentos em escala;
- Analisar o efeito da excentricidade do tubo de produção pelas curvas de dispersão;
- Analisar o efeito da excentricidade do tubo de produção pelo método de vagarosidade-tempo de chegada;

1.4 Contribuições

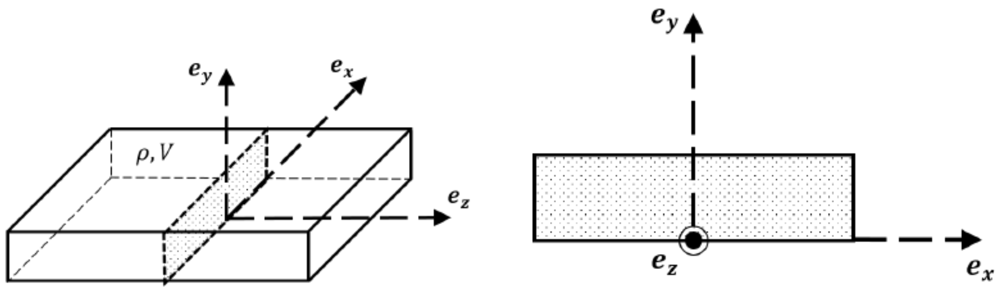
- Aplicou-se um modelo semi-analítico em coordenadas cilíndricas para simulação de defeitos concêntricos na camada de revestimento de cimento de um poço de petróleo;
- Descreveu-se um procedimento para construção de uma bancada experimental para testes de integridade na camada de revestimento de cimento de um poço de petróleo;
- Analisou-se resultados experimentais e numéricos de modelos analíticos, modelos de elementos finitos semi-analíticos e modelos de elementos finitos no domínio da frequência.

1.5 Organização da Tese

Este documento está estruturado da seguinte forma, no Capítulo 2, são apresentados os conceitos necessários sobre propagação de ondas em placas e em cilindros; além de modelos analíticos para placas e cilindros. No Capítulo 3, é desenvolvido o equacionamento para o método semi-analítico para placas e cilindros. No Capítulo 4, são mostradas as validações para modelos simples de placas e cilindros. No Capítulo 5, é mostrado o modelo numérico pelo método de elementos finitos, para obter-se as curvas de dispersão e as curvas de tempo de chegada por vagarosidade. No Capítulo 6, é descrita a bancada experimental e testes experimentais realizados. No Capítulo 7, são mostrados os resultados FEM, experimentais e SAFE obtidos. No Capítulo 8, é apresentada a conclusão e recomendação geral. Finalmente, nos Apêndices são apresentados os resultados brutos e comparações complementares.

2
Propagação de Ondas

Neste capítulo é descrito o equacionamento da propagação de ondas em meios sólidos e fluidos. Primeiramente, considera-se um corpo de volume V, densidade ρ, de material linear-elástico e isotrópico, descrito em coordenadas cartesianas, sendo $\boldsymbol{e}_x$, $\boldsymbol{e}_y$ e $\boldsymbol{e}_z$ os versores de cada eixo x, y e z, respectivamente, como mostrado na Figura 2.1.



(a): Modelo de um cilindro em coordenadas cartesianas

(b): Seção de um cilindro em coordenadas cartesianas

Figura 2.1: Corpo em coordenadas cartesianas. (a) Modelo de um corpo em coordenadas cartesianas e (b) seção de um corpo em coordenadas cartesianas.

2.1
Propagação de Ondas em Meios Sólidos

O deslocamento de um corpo sólido, cuja geometria é mostrada na Figura 2.1, pode ser descrito através do vetor de deslocamento $\boldsymbol{u}$. O vetor de deslocamento é definido para cada coordenada e tempo. Como o corpo sólido é linear-elástico e isotrópico, a tensão $\boldsymbol{\sigma}$ por volume, em notação de Voigt, tem seus componentes simétricos e portanto, o movimento do corpo sólido é descrito como

$$\rho \ddot{\mathbf{u}} = \boldsymbol{\nabla} \cdot \boldsymbol{\sigma} + \boldsymbol{b}, \tag{2-1}$$

onde $\ddot{\boldsymbol{u}}$ é a segunda derivada do deslocamento por volume, $\boldsymbol{\nabla}$ é o operador nabla e $\boldsymbol{b}$ é o vetor de força de corpo [50] por volume.

A deformação do corpo sólido $\boldsymbol{\varepsilon}$, em notação de Voigt, é descrita como

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \frac{1}{2}[\boldsymbol{\nabla u} + (\boldsymbol{\nabla u})^T], \tag{2-2}$$

onde T representa uma operação de transposição [50].

Utilizando a notação de Voigt para $\boldsymbol{\sigma}$ e $\boldsymbol{\varepsilon}$, a relação constitutiva em um corpo sólido é descrita como

$$\boldsymbol{\sigma} = C\boldsymbol{\varepsilon}, \tag{2-3}$$

sendo C a matriz constitutiva, e que dependente de duas constantes elásticas, λ e μ, chamadas constantes de Lamé [50]. Portanto C é definida como

$$C = \begin{bmatrix} \lambda + 2\mu & \lambda & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda + 2\mu & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda & \lambda + 2\mu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu \end{bmatrix}. \tag{2-4}$$

Por fim, combinando as Equações 2-1, 2-2 e 2-3 e considerando as forças de corpo nulas, obtém-se a equação de Navier para ondas em corpos sólidos [50], definida como

$$\ddot{\boldsymbol{u}} = \frac{\lambda + \mu}{\rho}\boldsymbol{\nabla}(\boldsymbol{\nabla} \cdot \boldsymbol{u}) + \frac{\mu}{\rho}\boldsymbol{\nabla}^2\boldsymbol{u}. \tag{2-5}$$

2.2 Propagação de Ondas em Meios Fluidos

O corpo fluido, cuja geometria é mostrada na Figura 2.1, tem o balanço da quantidade de movimento [51], definida como

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \boldsymbol{v}) + \boldsymbol{\nabla} \cdot (\rho \boldsymbol{v} \otimes \boldsymbol{v}) + \boldsymbol{\nabla} p I - \boldsymbol{\nabla} \cdot \boldsymbol{\tau} = \dot{\boldsymbol{m}} \boldsymbol{v} + \boldsymbol{f} \tag{2-6}$$

onde $\boldsymbol{v}$ é a velocidade de partícula, $\dot{\boldsymbol{m}}$ é o fluxo mássico por unidade de volume, p é a pressão hidrostática, I é a matriz identidade e $\boldsymbol{\tau}$ é a tensão deviatória.

A equação da conservação de massa [51] é definida como

$$\dot{\rho} + \boldsymbol{\nabla} \cdot (\rho \boldsymbol{v}) = \dot{\boldsymbol{m}}. \tag{2-7}$$

A Equação constitutiva para fluidos [52] pode ser descrita como

$$\dot{\rho} = \left(\frac{\rho}{\lambda + (2/3)\mu} \right) \dot{p}. \tag{2-8}$$

Combinando as Equações 2-7 e 2-8, têm-se

$$\dot{p} + \left(\lambda + \frac{2}{3}\mu \right) \boldsymbol{\nabla} \cdot \boldsymbol{v} = 0, \tag{2-9}$$

e considera-se o fluxo irrotacional $\boldsymbol{\nabla} \times \boldsymbol{v} = 0$, fluxo mássico nulo $\dot{\boldsymbol{m}} = 0$, invíscido $\mu = 0$ e $\boldsymbol{\tau} = 0$, sem forças de corpo $\boldsymbol{b} = 0$, e descrevendo apenas pequenas translações $\dot{\boldsymbol{v}} \gg (\boldsymbol{v} \cdot \nabla) \boldsymbol{v}$ [51], pode-se reescrever a Equação 2-6 como

$$\rho \dot{\boldsymbol{v}} + \boldsymbol{\nabla} p = 0, \tag{2-10}$$

e por fim combinando as Equações 2-9 e 2-10, têm-se a equação de onda para corpos fluidos [53], definida como

$$\ddot{p} = \frac{\lambda}{\rho} \boldsymbol{\nabla}^2 p. \tag{2-11}$$

Para calcular a velocidade e pressão de partícula do fluido mais facilmente, utiliza-se o campo de velocidade potencial $\boldsymbol{\phi}$ [54]. Portanto, a velocidade $\boldsymbol{v}$ e pressão p podem ser descritas como

$$\boldsymbol{v} = \nabla \boldsymbol{\phi}, \tag{2-12}$$

$$p = -\rho \dot{\boldsymbol{\phi}}. \tag{2-13}$$

Com base nas Equações 2-12 e 2-13, pode-se reescrever a equação de onda em corpos em fluidos através do campo potencial de velocidade [54], definido como

$$\ddot{\boldsymbol{\phi}} = \frac{\lambda}{\rho} \boldsymbol{\nabla}^2 \boldsymbol{\phi}. \tag{2-14}$$

Utilizando as equações acima para meios sólidos e fluidos, na próxima seção são apresentadas soluções harmônicas das equações de onda para meios sólidos e fluidos.

2.3 Equação da Onda para Meios Sólios e Fluidos

Uma vez definidas as equações de propagação em meios sólidos e fluidos, nas Equações 2-5 e 2-14, respectivamente, considera-se que o deslocamento e velocidade potencial são harmônicos e descritos como

$$\begin{aligned} \boldsymbol{u} &= u e^{i(-kz+\omega t)}, \\ \boldsymbol{\phi} &= \phi e^{i(-kz+\omega t)}, \end{aligned} \tag{2-15}$$

onde os termos da exponencial complexa $e^{i(-kz+\omega t)}$ são: i é a unidade imaginária de $\sqrt{-1}$, k é o número de onda, que corresponde a relação $k = 2\pi/\lambda_{wl}$, sendo λ_{wl} o comprimento de onda, z é a direção de propagação de onda, ω é a frequência angular de onda, que corresponde a relação $\omega = 2\pi f$, sendo f frequência da onda e igual a $f = 1/t_p$, sendo t_p o período da onda e, por fim, t é o tempo [55].

Além disso, pode-se determinar o número de onda através de

$$k = 2\pi/\lambda_{wl} = \omega/v_p = \omega s, \tag{2-16}$$

sendo v_p a velocidade de fase da onda e s a vagarosidade da onda, sendo s definida como o inverso da velocidade de fase.

Para meios sólidos, utiliza-se o método da decomposição de Helmholtz, como descrito por Rose [56] e Schmerr [57], e portanto, o deslocamento pode ser descrito como

$$\boldsymbol{u} = \boldsymbol{\nabla}\varphi + \boldsymbol{\nabla} \times \boldsymbol{\psi}, \tag{2-17}$$

sendo o vetor de deslocamento $\boldsymbol{u}$ descrito como a soma de um gradiente de um campo potencial escalar φ e o rotacional de um campo potencial vetorial $\boldsymbol{\psi}$. Após utilizar o método da decomposição de Helmholtz encontra-se duas equações de onda desacopladas, sendo

$$\begin{aligned} \ddot{\varphi} &= v_L^2 \boldsymbol{\nabla}^2 \varphi \\ \ddot{\boldsymbol{\psi}} &= v_T^2 \boldsymbol{\nabla}^2 \boldsymbol{\psi} \end{aligned} \tag{2-18}$$

onde v_L é a velocidade de onda de corpo longitudinal e v_T é a velocidade de corpo transversal, encontradas através das constantes de Lamé, mostradas em

$$\begin{aligned} v_L^2 &= (\lambda + 2\mu)/\rho, \\ v_T^2 &= \mu/\rho, \end{aligned} \tag{2-19}$$

Para meios fluidos pode-se resolver a equação da velocidade potencial considerando o termo harmônico, obtendo a equação da onda como

$$\ddot{\boldsymbol{\phi}} = v_L^2 \boldsymbol{\nabla}^2 \boldsymbol{\phi}, \tag{2-20}$$

ao se observar a equação para a velocidade potencial, tem-se apenas uma velocidade de onda de corpo, a velocidade longitudinal, sendo v_L definida como

$$v_L^2 = \lambda/\rho. \tag{2-21}$$

Utilizando uma geometria de placa com as equações acima para coordenadas cartesianas e aplicando condições de contorno adequadas, obtêm-se o modelo analítico de ondas guiadas em placas, mostrado na próxima seção.

2.4
Modelo Analítico de Placas de Meio Sólido

O modelo de analítico de placas de meios sólidos considera uma placa simples com $2h$ de espessura, livre de tensões em suas superfícies $y = \pm h$ e que as ondas se propagam e sofrem reflexões em $y = \pm h$ e se deslocam na direção de $\boldsymbol{e}_z$, como mostrado na Figura 2.2, onde $\boldsymbol{e}_z$ e $\boldsymbol{e}_y$ são os versores dos eixos z e y do sistema de coordenadas cartesianas com origem no centro da placa.

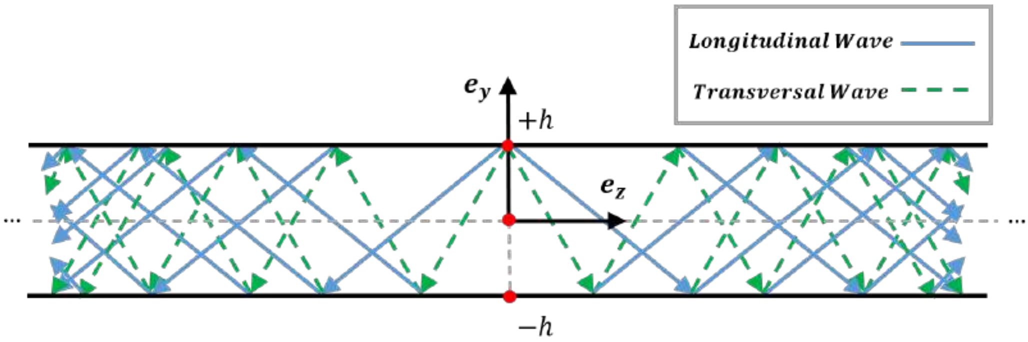


Figura 2.2: Modelo de placa de meio sólido ilustrando a propagação de ondas através de inúmeras reflexões.

Considerando o método da decomposição de Helmholtz descrito em Rose [56] e Schmerr [57], φ e $\boldsymbol{\psi}$ podem ser definidos como

$$\begin{aligned} \varphi(y) &= c_1 cos(py) + c_2 sen(py), \\ \boldsymbol{\psi}(y) &= c_3 cos(qy) + c_4 sen(qy), \end{aligned} \tag{2-22}$$

sendo p a relação $p^2 = \frac{\omega^2}{v_L^2} - k^2$, q a relação $q^2 = \frac{\omega^2}{v_T^2} - k^2$ e por fim, c_1, c_2, c_3 e c_4 são constantes.

Após considerar as condições de contorno na placa, de tração nula, pode-se determinar a solução dos modos guiados em placas, definidos como ondas de Rayleigh-Lamb. As ondas de Rayleigh são ondas de superfície entre um sólido e vácuo, e já as ondas de Lamb são ondas de deformação plana que ocorrem em uma placa decorrente das várias reflexões [56]. As ondas de Lamb podem ser divididas em dois grandes grupos quanto a simetria dos modos refentes ao meio da placa, são eles os modos simétricos (sim) e os modos antissimétricos (antisim), como descrito em

$$\begin{aligned} \frac{tan(qh)}{tan(ph)} &= -\frac{(4k^2pq)}{(q^2-k^2)^2} \quad sim, \\ \frac{tan(qh)}{tan(ph)} &= -\frac{(q^2-k^2)^2}{(4k^2ph)} \quad antissim, \end{aligned} \tag{2-23}$$

sendo as soluções da Equação 2-23 complexas. Porém apenas há interesse nos modos números de onda reais, que são os modos que se propagam [56], portanto fazem-se algumas alterações na Equação 2-23 e obtém-se

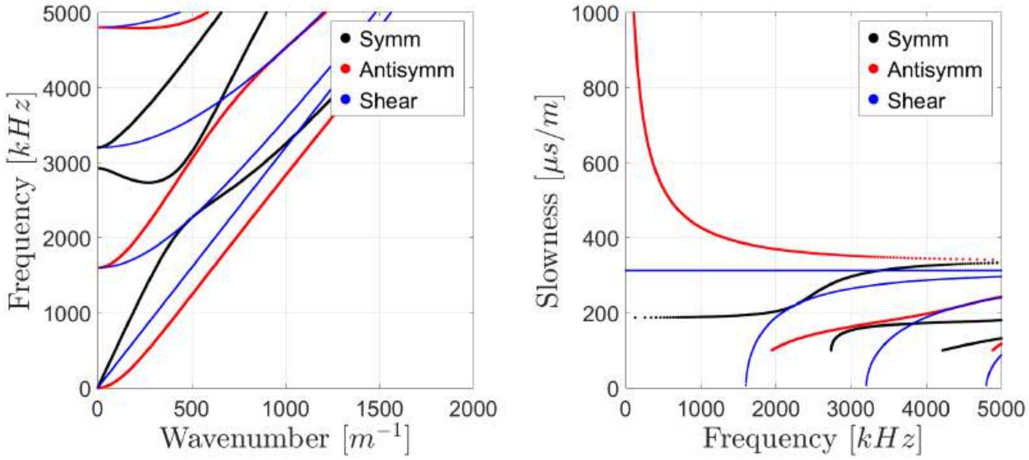
$$\begin{aligned} \frac{tan(qh)}{q} + \frac{(4k^2p)tan(ph)}{(q^2-k^2)^2} &= 0 \quad sim, \\ qtan(qh) + \frac{(q^2-k^2)^2 tan(ph)}{(4k^2p)} &= 0 \quad antissim. \end{aligned} \tag{2-24}$$

Além das ondas de Lamb, podem aparecer outras ondas de caráter cisalhante na direção horizontal, chamados de modos de cisalhamento horizontal (SH), os quais tem a mesma velocidade de corpo transversal em placas, e são obtidos através de

$$(n_{SH}\pi)^2 = (\omega h/v_T)^2 - (kh)^2 \quad SH, \tag{2-25}$$

onde n_{SH} é um número inteiro.

Como referência de material sólido, utilizaram-se as propriedades do aço (*steel*), mostradas na Tabela 6.5, sendo as velocidades de corpo $v_L = 5850$ m/s, $v_T = 3200$ m/s e densidade $\rho = 7850$ kg/m^3, e com uma espessura de 1 mm, sendo os resultados obtidos para a faixa de frequência (em inglês, *frequency*) de 0 a 5000 kHz para número de onda (em inglês, *wavenumber*) e vagarosidade (em inglês, *slowness*). A Figura 2.3 mostra os resultados analíticos dos modos guiados de Lamb simétricos (em inglês, *symmetrical*), Lamb antissimétrico (em inglês, *antisymmetrical*) e cisalhante horizontal (em inglês, *Shear Horizontal*).



(a): Número de onda (b): Vagarosidade

Figura 2.3: Resultados analíticos para uma placa de aço de 1 mm de espessura. Resultado Analítico dos modos guiados de Lamb simétricos (em inglês, *symmetrical*), antissimétrico (em inglês, Lamb *antisymmetrical*) e cisalhante horizontal (em inglês, *Shear Horizontal*).

2.5 Modelo Analítico de Placas de Meio Fluido

O modelo de analítico de placas de meios fluidos, de maneira análoga ao modelo analítico de placas de meios sólidos, considera uma placa simples com $2h$ de espessura, livre de tensões em suas superfícies $y = \pm h$ e que as ondas se propagam e sofrem reflexões em $y = \pm h$ e se deslocam na direção de $\boldsymbol{e}_z$, como mostrado na Figura 2.4, onde $\boldsymbol{e}_z$ e $\boldsymbol{e}_y$ são os versores dos eixos z e y do sistema de coordenadas cartesianas com origem no centro da placa.

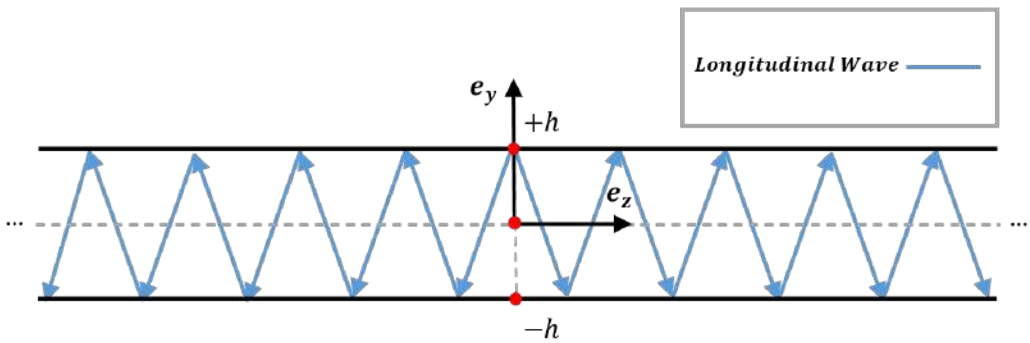


Figura 2.4: Modelo de placa de meio fluido ilustrando a propagação de ondas através de inúmeras reflexões.

Para encontrar os modos de propagação em placas de material fluido isotrópico e elástico, como descrito por Royer *et. al* [58] *apud* Groth *et. al* [59], considera-se a pressão p definida como

$$p(y) = c_1 cos(k_y y) + c_2 sen(k_y y), \tag{2-26}$$

sendo c_1 e c_2 constantes. Portanto as pressões nas superfícies da placa são definidas como

$$\begin{aligned} p(+h) = c_1 cos(+k_y h) + c_2 sen(+k_y h), \\ p(-h) = c_1 cos(-k_y h) + c_2 sen(-k_y h), \end{aligned} \tag{2-27}$$

considerando que ambas as superfícies da placa, em ± h, são livres de tensões, têm-se

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} = c_1 c_2 \begin{bmatrix} cos(+k_y h) & sen(+k_y h) \\ cos(-k_y h) & sen(-k_y h) \end{bmatrix}, \tag{2-28}$$

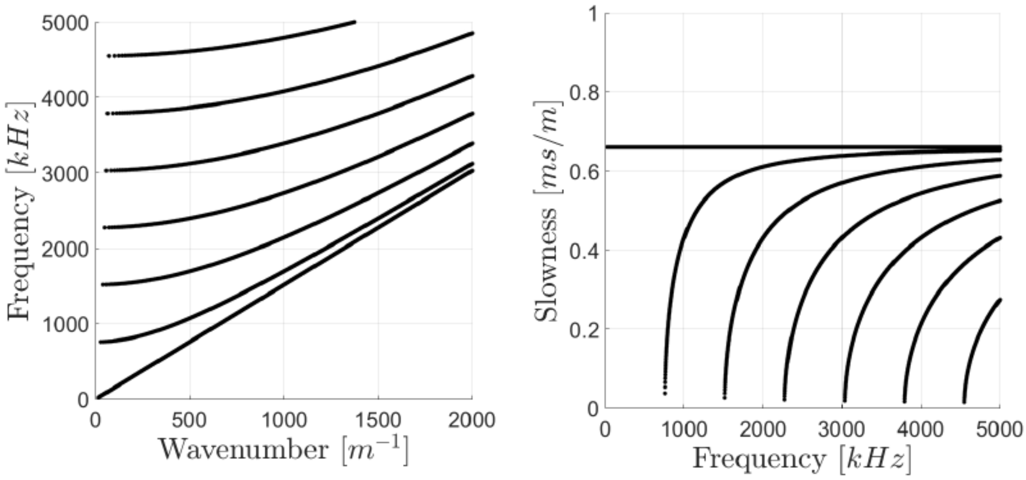
assim,

$$\begin{gathered} cos(+k_y h)sen(-kh) - cos(-k_y h)sen(+k_y h) = 0, \\ sen(k_y 2h) = 0, \\ k_y 2h = n\pi, \\ k_y = \tfrac{n\pi}{2h}, \end{gathered} \tag{2-29}$$

logo, considerando as Equações 2-16 e 2-29, além disso, que o número de onda $\boldsymbol{k}$ pode ser decomposto para $\boldsymbol{e}_y$ e $\boldsymbol{e}_z$, têm-se a equação do número de onda para camada de fluido, como mostra

$$\begin{gathered} k^2 = k_z^2 + k_y^2, \\ k_z = \sqrt{(\tfrac{\omega}{v_p})^2 - (\tfrac{n\pi}{2h})^2}. \end{gathered} \tag{2-30}$$

Como referência de material fluido, utilizaram-se as propriedades da água (*water*) mostradas na Tabela 6.5, sendo a velocidade de corpo $v_L = 1515$ m/s e densidade $\rho = 1049$ kg/m^3, e uma espessura de 1 mm, sendo os resultados obtidos para a faixa de frequência de 0 a 5000 kHz para número de onda e vagarosidade. A Figura 2.5 mostra o resultado analítico.



(a): Número de onda (b): Vagarosidade

Figura 2.5: Resultados analíticos para uma lâmina de água de 1 mm de espessura.

Para casos multicamadas utilizaram-se os resultados de trabalhos isolados para devida comparação.

2.6 Modelo Analítico de Cilindros

Para o modelo analítico concêntrico de cilindros multicamadas recursivo, foi utilizado o modelo descrito por Correia [12], cuja formulação foi baseada no método descrito por Braga *et al.*. [39] e [40]. O método foi desenvolvido com o objetivo de encontrar as raízes das funções de impedância superficiais $\boldsymbol{G}$ para cada par (k,ω) e assim encontrar as curvas de dispersão. Os dados de entrada para o modelos são a frequência angular, o número de onda na direção axial do cilindro, o modo circunferencial, dimensões e propriedades dos materiais. A Figura 2.6 ilustra as camadas e impedâncias superficiais $\boldsymbol{G}_0$ a $\boldsymbol{G}_n$.

A primeira parte desta técnica consiste na utilização do tensor de impedância superficial na interface interna, $\boldsymbol{G}_0$, então, um algoritmo recursivo calcula o tensor de impedância acústica nas interfaces. Para calcular o $\boldsymbol{G}_0$, utiliza-se a equação de onda através do campo de pressão $p(r)$ [39, 40], que é dado por

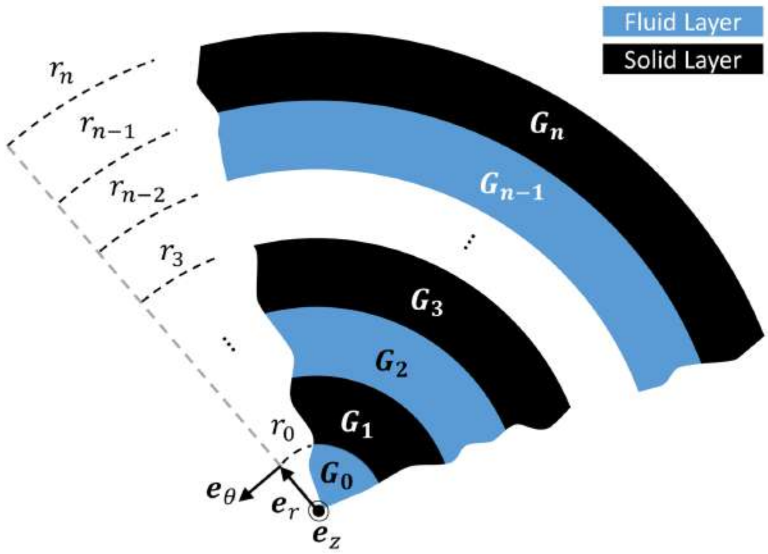


Figura 2.6: Ilustração das impedâncias superficiais em coordenadas cilíndricas para um caso multicamadas.

$$p(r) = c_1 J_n(kr) + c_2 Y_n(kr), \tag{2-31}$$

J_n e Y_n são as funções de Bessel de primeiro e segundo tipo, respectivamente, e de ordem n, enquanto c_1 e c_2 são constantes. Usando a relação entre o campo de pressão e a velocidade da partícula no meio interno, o campo de pressão pode ser escrito como uma função do vetor velocidade da partícula. Além disso, considerando que a componente radial do vetor de tensão nas interfaces é contínua, o tensor de impedância superficial [39, 40], é

$$\boldsymbol{G}_0 = -Z_f^0(r_0)\boldsymbol{e}_r \otimes \boldsymbol{e}_r, \tag{2-32}$$

onde o operador $\otimes$ é o produto externo e $Z_f^0(r_0)$ é a impedância das ondas que se propagam através do fluido no meio interno. Se não houver fluido, ou seja, o meio interno é vácuo, então $\boldsymbol{G}_0 = \boldsymbol{0}$.

Se as camadas internas forem compostas por sólidos, a formulação recursiva proposta por Braga *et al.* [39, 40] é suficiente para calcular $\boldsymbol{G}_j$ a partir de um $\boldsymbol{G}_{j-1}$ previamente calculado. No entanto, se houver uma camada anular fluida presente entre as camadas sólidas, o cálculo de $\boldsymbol{G}_j$ deve ser adaptado. Neste caso, primeiramente, calcula-se o tensor de impedância superficial no raio interno do anel $\boldsymbol{G}_{j-1}$ utilizando o método proposto por Braga *et al*. [39, 40]. Então, o tensor de impedância é reduzido a uma impedância escalar local $\mathcal{G}_{j-1}$:

$$\mathcal{G}_{j-1} = -(\boldsymbol{e}_r \cdot \boldsymbol{G}_{j-1}^{-1} \cdot \boldsymbol{e}_r)^{-1}. \tag{2-33}$$

Com a expressão que relaciona a pressão p e a velocidade da partícula $\boldsymbol{v}$ no fluido [39, 40] pode-se escrever como

$$p(r_{j-1}) = \mathcal{G}_{j-1} \cdot \boldsymbol{v}(r_{j-1}) \cdot \boldsymbol{e}_r, \tag{2-34}$$

considerando as ondas de saída e de entrada, a velocidade da partícula na direção radial pode ser escrita como

$$\boldsymbol{v}(r_{j-1}) \cdot \boldsymbol{e}_r = \boldsymbol{v}_1(r_{j-1}) \cdot \boldsymbol{e}_r + \boldsymbol{v}_2(r_{j-1}) \cdot \boldsymbol{e}_r, \tag{2-35}$$

substituir a Equação 2-35 na Equação 2-34 produz a Equação 2-36.

$$p(r_{j-1}) = \mathcal{Z}_1^j(r_{j-1})\boldsymbol{v}_1(r_{j-1}) \cdot \boldsymbol{e}_r + \mathcal{Z}_2^j(r_{j-1})\boldsymbol{v}_2(r_{j-1}) \cdot \boldsymbol{e}_r. \tag{2-36}$$

sendo $\mathcal{Z}$ impedância do fluido considerando nas camadas posteriores a primeira camada.

Análogo ao tensor de reflexão generalizado, $\boldsymbol{H}(r)$, e ao tensor de reflexão, $\boldsymbol{R}$, obtido por Braga *et al*. [39, 40], o escalar de reflexão generalizada, $\mathcal{H}(r)$, e o escalar de reflexão $\mathcal{R}$, podem ser definidos. A partir do escalar de reflexão, pode-se escrever a velocidade da partícula na direção radial como

$$\boldsymbol{v}_1(r_{j-1}) \cdot \boldsymbol{e}_r = (\mathcal{R}_{j-1})\boldsymbol{v}_2(r_{j-1}) \cdot \boldsymbol{e}_r. \tag{2-37}$$

das Equações 2-34, 2-36 e 2-37 obtém-se a Equação 2-38.

$$\mathcal{G}_{j-1}(1+\mathcal{R}_{j-1}) = \mathcal{Z}_1^j(r_{j-1})(\mathcal{R}_{j-1})\mathcal{Z}_2^j(r_{j-1}), \tag{2-38}$$

então, o escalar de reflexão pode ser calculado por

$$\mathcal{R}_{j-1} = \frac{\mathcal{G}_{j-1} - \mathcal{Z}_2^j(r_{j-1})}{\mathcal{Z}_1^j(r_{j-1}) - \mathcal{G}_{j-1}}, \tag{2-39}$$

onde $\mathcal{Z}_\alpha$ pode ser obtido por

$$\mathcal{Z}_\alpha^j(r) = \frac{i\rho\omega}{k}\frac{h_n^\alpha(k\cdot r)}{h_{n-1}^\alpha(k\cdot r) - \frac{n}{k\cdot r}h_n^\alpha(k\cdot r)}, \tag{2-40}$$

onde $\boldsymbol{h}_n^\alpha$ são as funções de Bessel do terceiro tipo (funções de Hankel) e α a divisão do tipo de onda de entrada e de saida.

O escalar de reflexão generalizada pode ser calculado por

$$\mathcal{H}(r_j) = \mathcal{M}_1^j(r_j, r_{j-1})(\mathcal{R}_{j-1})\mathcal{M}_2^j(r_{j-1}, r_j), \tag{2-41}$$

onde $\mathcal{M}_\alpha$ é

$$\mathcal{M}_1^j(r_1, r_2) = \frac{h_{n-1}^1(k\cdot r_1) - \frac{n}{k\cdot r_1}h_n^1(k\cdot r_1)}{h_{n-1}^1(k\cdot r_2) - \frac{n}{k\cdot r_2}h_n^1(k\cdot r_2)} \cdot e^{ik(r_1-r_2)}, \tag{2-42}$$

e

$$\mathcal{M}_2^j(r_1, r_2) = \frac{h_{n-1}^2(k\cdot r_1) - \frac{n}{k\cdot r_1}h_n^2(k\cdot r_1)}{h_{n-1}^2(k\cdot r_2) - \frac{n}{k\cdot r_2}h_n^2(k\cdot r_2)} \cdot e^{-ik(r_1-r_2)}. \tag{2-43}$$

Analogamente às Equações 2-34, 2-35 e 2-36, também se pode escrever as mesmas equações no raio externo como

$$p(r_j) = \mathcal{G}_j(r_j)\boldsymbol{v}(r_j) \cdot \boldsymbol{e}_r, \tag{2-44}$$

$$p(r_j) = \mathcal{Z}_1^j(r_j)\boldsymbol{v}_1(r_j) \cdot \boldsymbol{e}_r + \mathcal{Z}_2^j(r_j)\boldsymbol{v}_2(r_j) \cdot \boldsymbol{e}_r, \tag{2-45}$$

$$\boldsymbol{v}_1(r_j) \cdot \boldsymbol{e}_r = \mathcal{H}(r_j)\boldsymbol{v}_2(r_j) \cdot \boldsymbol{e}_r. \tag{2-46}$$

Manipulando Eqs. 2-44, 2-45 e 2-46, produz

$$\mathcal{G}_j = \frac{\mathcal{Z}_1^j(r_j)\mathcal{H}(r_j) + \mathcal{Z}_2^j(r_j)}{1 + \mathcal{H}(r_j)}, \tag{2-47}$$

e é então usado para calcular o tensor de impedância $\boldsymbol{G}_j$:

$$\boldsymbol{G}_j = -\mathcal{G}_j \boldsymbol{e}_r \otimes \boldsymbol{e}_r. \tag{2-48}$$

A última parte do método consiste em encontrar e resolver a equação de dispersão, que é função do tensor de impedância superficial na interface externa do cilindro, $\boldsymbol{G}_n$. Esta equação é obtida aplicando as condições de contorno e continuidade na interface externa. A equação de dispersão para um meio cilíndrico multicamadas é determinada a partir da continuidade do vetor de tensão na direção radial e do deslocamento na interface da nth camada com o meio externo semi-infinito. A partir de [39, 40, 12], pode-se escrever até a última camada

$$\boldsymbol{t}^r(r_n^-) = -i\omega \boldsymbol{G}_n u(r_n^+), \tag{2-49}$$

onde $\boldsymbol{t}$ é o vetor de tensão.

Sabendo que o meio externo é semi-infinito, existem apenas ondas que saem. O vetor de tensão pode ser escrito como

$$\boldsymbol{t}^r(r_n^+) = -i\omega \boldsymbol{Z}_1^{n+1}(r_n^+)\boldsymbol{u}(r_n^+), \tag{2-50}$$

Das Eqs. 2-49 e 2-50, tem-se

$$-i\omega[\boldsymbol{Z}_1^{n+1}(r_n) - \boldsymbol{G}_n]\boldsymbol{u}(r_n) = 0, \tag{2-51}$$

que é um problema de autovalor, que pode ser resolvido por

$$det(\boldsymbol{Z}_1^{n+1}(r_n) - \boldsymbol{G}_n) = 0. \tag{2-52}$$

onde *det* significa o determinante. A equação 2-52 é a equação de dispersão.

Uma observação interessante é quando o meio externo é o vácuo, pois, como nenhuma onda pode nele se propagar, tem-se:

$$\boldsymbol{Z}_1^{n+1}(r_n) = 0, \tag{2-53}$$

e neste caso, a equação de dispersão é simplesmente

$$det(\boldsymbol{G}_n) = 0. \tag{2-54}$$

Como exemplo, utilizou-se um cilindro de aço com raio interno igual a 1 m e espessura de 1 mm, com as propriedades de velocidade de corpo $v_L = 5850$ m/s, $v_T = 3200$ m/s e densidade $\rho = 7850$ kg/m^3.

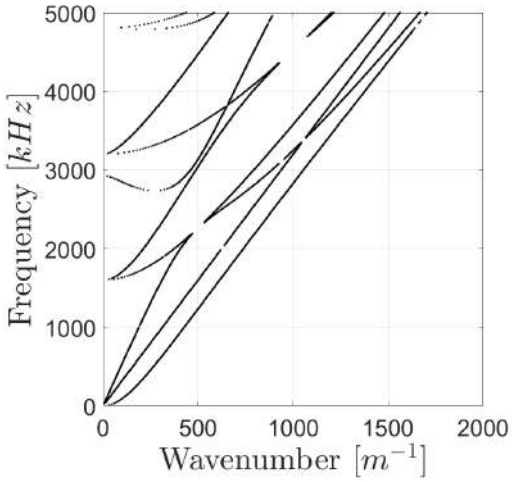


Figura 2.7: Resultados analíticos em um cilíndrico com raio interno de 1 m e espessura de 1 mm.

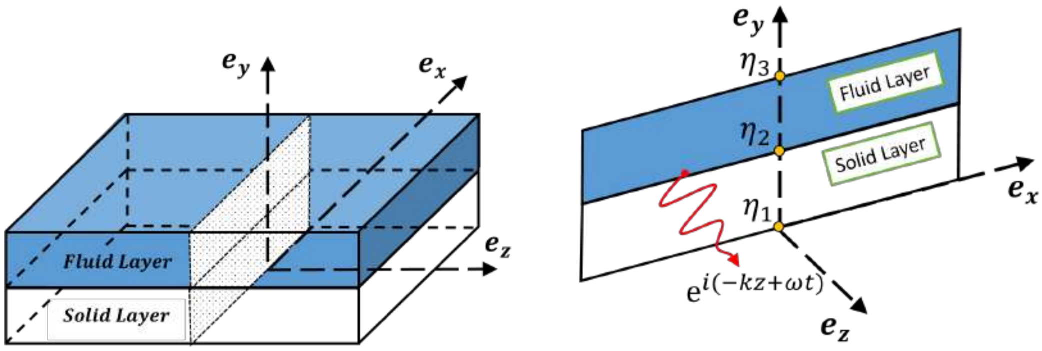
Nota-se, na Figura 2.7, que no número de onda 500 m^{-1} entre as frequências 2000 e 2500 kHz e no número de onda 1000 m^{-1} entre as frequências 4000 e 5000 kHz, não foram encontrados os pontos das soluções esperados, devido a rotina para encontrar as raízes não ser eficaz perto de singularidades.

3
Modelagem do Método de Elementos Semi-Analíticos

Neste capítulo fez-se o equacionamento do Método dos Elementos Finitos Semi-Analíticos SAFE (em inglês, *Semi-Analytical Finite Element*) para placas e cilindros. O SAFE tem o objetivo, no campo da ondas guiadas, de solucionar problemas de propagação de ondas guiadas em seções arbitrárias multicamadas, cuja simulação por métodos analíticos ou por métodos de elementos finitos convencionais poderiam ter um alto custo computacional. Primeiramente, construiu-se o SAFE para o caso de placas, pois serviu como ponto de partida para os códigos de sub-rotinas e também como validação para o SAFE cilíndrico; após concluído o SAFE para placas, construiu-se o SAFE para o caso de cilindros. Após construídos os modelos simples com SAFE, estes foram validados no Capítulo 4 com os modelos analíticos para placas, para cilindros e comparados com resultados de artigos e posteriormente comparados com os resultados experimentais.

3.1
Modelagem SAFE Placas

A Figura 3.1 mostra um corpo sólido e um corpo fluido empilhados, que ilustram duas placas de materiais diferentes, sólidos e fluidos. A Figura (b) mostra a discretização do domínio de maneira unidimensional na direção y, cuja discretização é obtida através de elementos, chamados de elementos finitos, e que se conectam por nós, dados por η.



(a): Modelo com materiais sólido e fluido em coordenadas cartesianas

(b): Seção discretizada do modelo em coordenadas cartesianas

Figura 3.1: Discretização da seção transversal do modelo de placa. (a) Modelo com meio sólido e fluido em coordenadas cartesianas e (b) seção discretizada do modelo, cuja direção de propagação de ondas se sentido de z.

3.1.1
Modelagem SAFE Placas, sólidos

Para a propagação de ondas harmônicas em materiais sólidos, como explicado no Capítulo 2, o deslocamento harmônico em qualquer ponto pode ser descrito como

$$\boldsymbol{u} = \begin{bmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \end{bmatrix} e^{i(-kz+\omega t)}, \tag{3-1}$$

onde $\boldsymbol{u}$ representa o deslocamento harmônico, u_x, u_y e u_z representam os componentes do deslocamento, já os termos da exponencial complexa $e^{i(-kz+\omega t)}$ são: i é a unidade imaginária de $\sqrt{-1}$, k é o número de onda, z é a direção de propagação de onda, ω é a frequência angular de onda e t é o tempo [55].

Segundo Nielsen [55] e Viola *et. al* [50], com base na Equação 3-1, os deslocamentos dos elementos podem ser obtidos como

$$\boldsymbol{u} = \sum_{e=1}^{j} \boldsymbol{N}(x,y)\boldsymbol{u}^e e^{i(-kz+\omega t)}, \tag{3-2}$$

onde e é o número do elemento, j o número total de elementos, $\boldsymbol{N}(x, y)$ é a função de forma do elemento, que são funções de interpolação para cada elemento, para calcular as variáveis do elemento [56], porém como há apenas discretização em y, $\boldsymbol{N}(x, y) = \boldsymbol{N}(y)$, e u^e é o vetor de deslocamento nodal, definidos como

$$\begin{aligned} \boldsymbol{N}(y) &= \begin{bmatrix} N_1 & & & & N_j & & \\ & N_1 & & \cdots & & N_j & \\ & & N_1 & & & & N_j \end{bmatrix}, \\ \boldsymbol{u}^e &= \begin{bmatrix} u_{x1} & u_{y1} & u_{z1} & \cdots & u_{xj} & u_{yj} & u_{zj} \end{bmatrix}^T, \end{aligned} \tag{3-3}$$

Com base na Equação 3-2 e 2-2, pode-se escrever a deformação nodal como

$$\boldsymbol{\varepsilon}^e = \left(\boldsymbol{L}_x \frac{\partial}{\partial x} \boldsymbol{N} + \boldsymbol{L}_y \frac{\partial}{\partial y} \boldsymbol{N} - ik \boldsymbol{L}_z \boldsymbol{N} \right) \boldsymbol{u}^e e^{i(-kz+\omega t)}, \tag{3-4}$$

sendo

$$\boldsymbol{L}_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{L}_y = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{L}_z = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \tag{3-5}$$

considerando $\boldsymbol{L}_x \frac{\partial}{\partial x} \boldsymbol{N} = 0$, uma vez que apenas considera-se a discretização em y e agrupando $\boldsymbol{L}_y \frac{\partial}{\partial y} \boldsymbol{N}$ em $\boldsymbol{B}_1$ e $\boldsymbol{L}_z \boldsymbol{N}$ em $\boldsymbol{B}_2$, têm-se

$$\boldsymbol{\varepsilon}^e = (\boldsymbol{B}_1 - ik\boldsymbol{B}_2) \boldsymbol{u}^e e^{i(-kz+\omega t)}. \tag{3-6}$$

Segundo Nilsson *et. al* [60] *apud* Kalkowski *et. al* [48], as equações para o movimento de sólidos podem ser obtidas através do princípio dos trabalhos virtuais, definida como

$$\int_V \delta(\boldsymbol{\varepsilon})^T C\boldsymbol{\varepsilon} dV + \int_V \delta(\boldsymbol{u})^T \rho\ddot{\boldsymbol{u}} dV = \int_A \delta(\boldsymbol{u})^T \boldsymbol{\sigma}\hat{\boldsymbol{n}} dA, \tag{3-7}$$

onde A é a área e $\hat{\boldsymbol{n}}$ é o vetor normal à superfície para material sólido $\hat{\boldsymbol{n}} = [0\ 1\ 0]^T$.

Desenvolvendo apenas a parte esquerda da Equação 3-7, têm-se as expressões das matrizes de rigidez e massa, descritas como

$$\begin{aligned} \boldsymbol{k}_1^e &= \textstyle\int_y \boldsymbol{B}_1^T C \boldsymbol{B}_1\, dy, \\ \boldsymbol{k}_2^e &= \textstyle\int_y \left(\boldsymbol{B}_1^T C \boldsymbol{B}_2 - \boldsymbol{B}_2^T C \boldsymbol{B}_1\right)\, dy, \\ \boldsymbol{k}_3^e &= \textstyle\int_y \boldsymbol{B}_2^T C \boldsymbol{B}_2\, dy, \end{aligned} \tag{3-8}$$

$$\boldsymbol{m}^e = \int_y \boldsymbol{N}^T \rho \boldsymbol{N}\, dy, \tag{3-9}$$

a parte da direita da Equação 3-7, associada ao acoplamento entre materiais sólidos e fluidos, será abordada posteriormente.

O problema pode ser montado com uma metodologia padrão de elementos finitos e tendo como resultado as matrizes globais de rigidez e inércia do sistema [56], sendo

$$\boldsymbol{K}_{1,\ldots,3} = \bigcup_{e=1}^{j} \boldsymbol{k}_{1,\ldots,3}^e \quad \boldsymbol{M} = \bigcup_{e=1}^{j} \boldsymbol{m}^e \quad \boldsymbol{U} = \bigcup_{e=1}^{j} \boldsymbol{u}^e. \tag{3-10}$$

A Equação 3-11 mostra a equação característica do problema de autovalor utilizando as Equações 3-8, 3-9 e 3-10.

$$(\boldsymbol{K}_1 + ik\boldsymbol{K}_2 + k^2\boldsymbol{K}_3 - \omega^2\boldsymbol{M})\boldsymbol{U} = \boldsymbol{0}. \tag{3-11}$$

Segundo Viola *et. al* [61], todas as matrizes são simétricas com exceção da matriz de rigidez $\boldsymbol{K}_2$, que é antissimétrica. Segundo Rose [56], a antissimetria da matriz $\boldsymbol{K}_2$ é devido ao acoplamento de $\boldsymbol{B}_1$ e $\boldsymbol{B}_2$, por isso propõe uma transformação diagonal através da matriz $\boldsymbol{T}$:

$$\boldsymbol{T} = \begin{bmatrix} 1 & & & & & & \\ & 1 & & & & & \\ & & i & & & & \\ & & & \ddots & & & \\ & & & & 1 & & \\ & & & & & 1 & \\ & & & & & & i \end{bmatrix}. \tag{3-12}$$

A matriz de transformação diagonal tem como propriedades: elementos nulos, exceto na diagonal principal; os valores da diagonal obedecem à regra de serem 1 na direção de $\boldsymbol{e}_x$ e $\boldsymbol{e}_y$; e i para a direção $\boldsymbol{e}_z$, e por fim a multiplicação da matriz de transformação conjugada pela matriz de transformação é igual a matriz identidade $\boldsymbol{T}^*\boldsymbol{T} = \boldsymbol{T}\boldsymbol{T}^* = I$ e $\boldsymbol{T}^* = \boldsymbol{T}^T$ [56, 62]. A matriz $\boldsymbol{K}_2$ depois da transformação, $\hat{\boldsymbol{K}}_2$, é definida como

$$\hat{\boldsymbol{K}}_2 = -i\boldsymbol{T}^T\boldsymbol{K}_2\boldsymbol{T}, \tag{3-13}$$

portanto,

$$(\boldsymbol{K}_1 + k\hat{\boldsymbol{K}}_2 + k^2\boldsymbol{K}_3 - \omega^2\boldsymbol{M})\boldsymbol{T}\boldsymbol{U} = 0, \tag{3-14}$$

onde a Equação 3-14 pode ser interpretada como um problema de autovalor e autovetor para um valor de frequência, onde os autovalores são os pares número de onda e seu conjugado, e os autovetores são os deslocamentos nodais [56, 62].

Segundo Viola *et. al* [61], devido a ordem da Equação 3-14 ser quadrática para k, reordena-se a Equação 3-14 como

$$\begin{aligned} &\left(\begin{bmatrix} \boldsymbol{K}_3 & \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{0} & -\left(\boldsymbol{K}_1 - \omega^2\boldsymbol{M}\right) \end{bmatrix} - \right. \\ &\left. k \begin{bmatrix} \boldsymbol{0} & \boldsymbol{K}_3 \\ \boldsymbol{K}_3 & \hat{\boldsymbol{K}}_2 \end{bmatrix} \right) \begin{Bmatrix} k\boldsymbol{T}\boldsymbol{U} \\ \boldsymbol{T}\boldsymbol{U} \end{Bmatrix} = \boldsymbol{0}. \end{aligned} \tag{3-15}$$

3.1.2
Modelagem SAFE Placas, fluidos

Segundo Kalkowski *et. al* [48], a propagação de ondas harmônicas em materiais fluidos, como explicado no Capítulo 2, pode ser descrita através do campo de velocidade potencial $\boldsymbol{\phi}$ em coordenadas cartesianas, descrito como

$$\boldsymbol{\phi} = \begin{bmatrix} \phi_x \\ \phi_y \\ \phi_z \end{bmatrix} e^{i(-kz+\omega t)}. \tag{3-16}$$

Com base na Equação 3-16, a velocidade potencial em um ponto (x,y) qualquer pode ser descrita como mostrado

$$\boldsymbol{\phi} = \sum_{e=1}^{j} \boldsymbol{N}(x,y)\boldsymbol{\phi}^e e^{i(-kz+\omega t)}, \tag{3-17}$$

onde $\boldsymbol{\phi}$ representa a velocidade potencial harmônica em qualquer ponto do material fluido; $\boldsymbol{N}(x,y)$ é a função de forma, $\boldsymbol{\phi}^e$ é o vetor de deslocamentos nodais.

Com base na Equação 2-12 e 3-17, pode-se escrever a velocidade como

$$\boldsymbol{v}^e = \boldsymbol{\nabla}\boldsymbol{\phi}^e = \begin{bmatrix} \frac{\partial \boldsymbol{\phi}}{\partial x} & \frac{\partial \boldsymbol{\phi}}{\partial y} & \frac{\partial \boldsymbol{\phi}}{\partial z} \end{bmatrix}^T. \tag{3-18}$$

Segundo Kalkowski *et. al* [48], as equações para a solução do problema de fluidos podem ser obtidas através do princípio dos trabalhos virtuais, como

$$\int_V \delta\left(\boldsymbol{\nabla}\boldsymbol{\phi}\right)^T \rho \boldsymbol{\nabla}\boldsymbol{\phi} dV + \int_V \delta\left(\boldsymbol{\phi}\right)^T \frac{\rho^2}{\lambda} \ddot{\boldsymbol{\phi}} dV = \int_A \delta\left(\boldsymbol{\phi}\right)^T \rho \boldsymbol{\nabla}\boldsymbol{\phi}(-\hat{\boldsymbol{n}}) dA, \tag{3-19}$$

sendo definido o vetor normal à superfície do material fluido como o oposto ao vetor normal à superfície do material sólido $-\hat{\boldsymbol{n}}$, devido à condição de continuidade na interface entre sólido e fluido.

Desenvolvendo apenas a parte esquerda da Equação 3-19, têm-se as expressões das matrizes de rigidez e inércia, sendo

$$\begin{aligned} \boldsymbol{k}_1^e &= \int_y \frac{\partial \boldsymbol{N}}{\partial y}^T \rho \frac{\partial \boldsymbol{N}}{\partial y}\, dy, \\ \boldsymbol{k}_3^e &= \int_y \boldsymbol{N}^T \rho \boldsymbol{N} dy, \end{aligned} \tag{3-20}$$

$$\boldsymbol{m}^e = \int_y \boldsymbol{N}^T \frac{\rho^2}{\lambda} \boldsymbol{N}\, dy, \tag{3-21}$$

a parte da direita da Equação 3-19, associada ao acoplamento entre materiais sólidos-fluidos, será abordada posteriormente.

O problema pode ser montado com uma metodologia padrão de elementos finitos e tendo como resultado as matrizes globais de rigidez e inércia do sistema, como descrito

$$\boldsymbol{K}_{1,3} = \bigcup_{e=1}^{j} \boldsymbol{k}_{1,3}^e, \quad \boldsymbol{M} = \bigcup_{e=1}^{j} \boldsymbol{m}^e, \quad \boldsymbol{\Phi} = \bigcup_{e=1}^{j} \boldsymbol{\phi}^e. \tag{3-22}$$

Segundo Kalkowski et. al [48], todas as matrizes são simétricas para o material fluido, e portanto não há necessidade do uso da matriz de transformação, como no caso de materiais sólidos. A Equação 3-23, do mesmo modo como foi para o caso de materiais sólidos, pode ser entendida como um problema de autovalor e autovetor para cada frequência, onde os autovalores são os pares número de onda e seu conjugado, e os autovetores são os deslocamentos nodais, como mostrado

$$(\boldsymbol{K}_1 + k^2 \boldsymbol{K}_3 - \omega^2 \boldsymbol{M})\boldsymbol{\Phi} = 0. \tag{3-23}$$

Devido à ordem da Equação 3-23 ser quadrática para k, reordena-se a Equação 3-23 como

$$\left(\begin{bmatrix} \boldsymbol{K}_3 & \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{0} & -\left(\boldsymbol{K}_1 - \omega^2 \boldsymbol{M}\right) \end{bmatrix} - k \begin{bmatrix} \boldsymbol{0} & \boldsymbol{K}_3 \\ \boldsymbol{K}_3 & \boldsymbol{0} \end{bmatrix} \right) \begin{Bmatrix} k\boldsymbol{\Phi} \\ \boldsymbol{\Phi} \end{Bmatrix} = \boldsymbol{0}. \tag{3-24}$$

3.1.3
Modelagem SAFE Placas, sólidos-fluidos

Segundo Kalkowski *et. al* [48], a interação entre sólidos e fluidos é mantida pela continuidade do deslocamento, velocidade e pressão na interface. Portanto os termos a direita das Equações 3-7 e 3-19 devem ser iguais, como

$$\int_A \delta\left(\boldsymbol{u}\right)^T \boldsymbol{\sigma}\hat{\boldsymbol{n}} dA = \delta(\boldsymbol{u}^e)^T \left[-i\omega \boldsymbol{H}\right] \boldsymbol{\phi}^e, \tag{3-25}$$

$$-\int_A \delta\left(\boldsymbol{\phi}\right)^T \rho \boldsymbol{\nabla}\boldsymbol{\phi}(-\hat{\boldsymbol{n}}) dA = \delta(\boldsymbol{\phi}^e)^T \left[i\omega \boldsymbol{H}^T\right] \boldsymbol{u}^e, \tag{3-26}$$

portanto, as equações de acoplamento são descritas como

$$\begin{aligned} \boldsymbol{H} &= \rho \textstyle\int_A \boldsymbol{N}_u^T \hat{\boldsymbol{n}} \boldsymbol{N}_\phi dA = \rho y_A \boldsymbol{N}_u^T \hat{\boldsymbol{n}} \boldsymbol{N}_\phi, \\ \boldsymbol{H}^T &= \rho \textstyle\int_A \boldsymbol{N}_\phi^T \hat{\boldsymbol{n}}^T \boldsymbol{N}_u dA = \rho y_A \boldsymbol{N}_\phi^T \hat{\boldsymbol{n}}^T \boldsymbol{N}_u, \end{aligned} \tag{3-27}$$

sendo y_A a região onde há o contato entre os dois materiais, $\boldsymbol{N}_u$ a função de forma do sólido e $\boldsymbol{N}_\phi$ a função de forma para o fluido, porém utilizou-se $\boldsymbol{N}_u = \boldsymbol{N}_\phi$. A matriz de acoplamento é descrita como

$$\boldsymbol{K}_c = \begin{bmatrix} \boldsymbol{0} & \boldsymbol{H}^T \\ -\boldsymbol{H} & \boldsymbol{0} \end{bmatrix}. \tag{3-28}$$

Devido a matriz de acoplamento não ser simétrica, multiplica-se todas as matrizes referente ao material fluido por -1, como mostrado

$$\begin{aligned} &\left(\begin{bmatrix} -\boldsymbol{K}_1^f & \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{K}_1^s \end{bmatrix} + k \begin{bmatrix} \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{0} & \hat{\boldsymbol{K}}_2^s \end{bmatrix} + k^2 \begin{bmatrix} -\boldsymbol{K}_3^f & \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{K}_3^s \end{bmatrix} + \right. \\ &\left. i\omega \begin{bmatrix} \boldsymbol{0} & -\boldsymbol{H}^T \\ -\boldsymbol{H} & \boldsymbol{0} \end{bmatrix} - \omega^2 \begin{bmatrix} -\boldsymbol{M}^f & \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{M}^s \end{bmatrix} \right) \begin{Bmatrix} \boldsymbol{\phi} \\ \boldsymbol{TU} \end{Bmatrix} = \boldsymbol{0}. \end{aligned} \tag{3-29}$$

As matrizes de rigidez e massa devem ser unidas através de um procedimento de elementos finitos, como é mostrado

$$\begin{aligned}\overline{\boldsymbol{K}}_{1,..,3} &= (-\boldsymbol{K}^f_{1,...,3}) \bigcup (+\boldsymbol{K}^s_{1,...,3}),\\ \overline{\boldsymbol{M}} &= (-\boldsymbol{M}^f) \bigcup (+\boldsymbol{M}^s),\\ \boldsymbol{\Psi} &= \boldsymbol{\Phi} \bigcup \boldsymbol{TU},\end{aligned} \tag{3-30}$$

onde o sobrescrito (^{s}) indica as matrizes referentes ao material sólido e (^{f}) indica as matrizes referentes ao material fluido e devem sem multiplicadas por -1.

Com base nas matrizes obtidas na 3-30, pode-se descrever e comportamento da propagação de ondas em meios sólidos e fluidos como mostrado

$$(\overline{\boldsymbol{K}}_1 + k\overline{\hat{\boldsymbol{K}}}_2 + k^2\overline{\boldsymbol{K}}_3 + i\omega\overline{\boldsymbol{K}_c} - \omega^2\overline{\boldsymbol{M}})\boldsymbol{\Psi} = \boldsymbol{0}. \tag{3-31}$$

Devido à ordem da Equação 3-31 ser quadrática para k, reordena-se como

$$\begin{aligned}&\left(\begin{bmatrix}\overline{\boldsymbol{K}}_3 & \boldsymbol{0}\\ \boldsymbol{0} & -\left(\overline{\boldsymbol{K}}_1 + i\omega\overline{\boldsymbol{K}_c} - \omega^2\overline{\boldsymbol{M}}\right)\end{bmatrix} - \right.\\ &\left. k\begin{bmatrix}\boldsymbol{0} & \overline{\boldsymbol{K}}_3\\ \overline{\boldsymbol{K}}_3 & \overline{\hat{\boldsymbol{K}}}_2\end{bmatrix}\right)\begin{Bmatrix}k\boldsymbol{\Psi}\\ \boldsymbol{\Psi}\end{Bmatrix} = \boldsymbol{0}.\end{aligned} \tag{3-32}$$

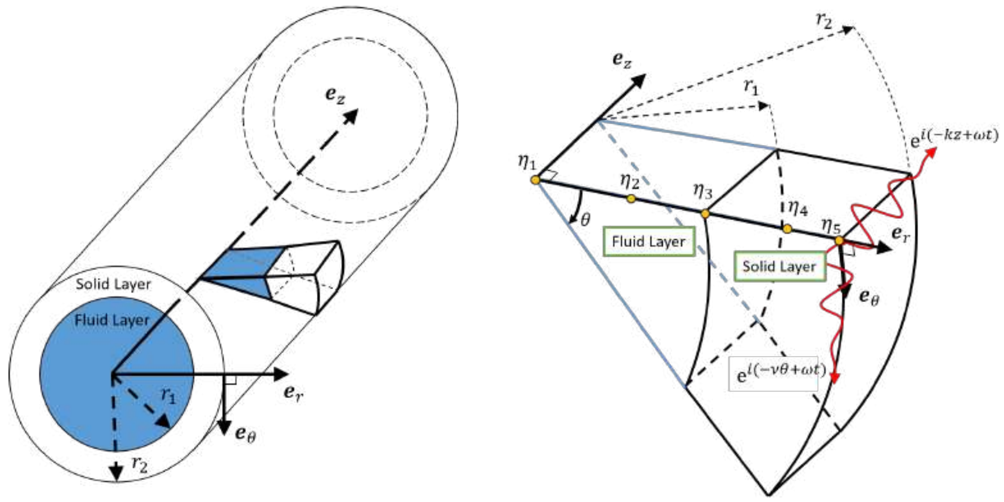
A Equação 3-32 pode ser entendida de forma simplificada como

$$\begin{aligned}\boldsymbol{A} &= \begin{bmatrix}\overline{\boldsymbol{K}}_3 & \boldsymbol{0}\\ \boldsymbol{0} & -\left(\overline{\boldsymbol{K}}_1 + i\omega\overline{\boldsymbol{K}_c} - \omega^2\overline{\boldsymbol{M}}\right)\end{bmatrix},\\ \boldsymbol{B} &= \begin{bmatrix}\boldsymbol{0} & \overline{\boldsymbol{K}}_3\\ \overline{\boldsymbol{K}}_3 & \overline{\hat{\boldsymbol{K}}}_2\end{bmatrix},\\ (\boldsymbol{A} - k\boldsymbol{B})&\left\{\overline{\boldsymbol{\Psi}}\right\} = \boldsymbol{0},\\ \left(\boldsymbol{B}^{-1}\boldsymbol{A} - kI\right)&\left\{\overline{\boldsymbol{\Psi}}\right\} = \boldsymbol{0},\end{aligned} \tag{3-33}$$

onde a Equação 3-33 tem como solução os autovalores, os números de onda k positivo e negativo; e autovetores, os modos $k\boldsymbol{\Psi}$ e $\boldsymbol{\Psi}$, para para cada valor de frequência, logo é necessário uma rotina para cobrir uma banda de frequência. Um meio otimizado para a rotina de solução é calcular apenas uma vez a matriz $\boldsymbol{B}^{-1}$, pois não depende da frequência e só deverá ser invertida uma vez [56, 48].

3.2
Modelagem SAFE Cilindros

A Figura 3.2 mostra um corpo sólido e um fluido, que traduzem dois cilindros de materiais diferentes em contato. A Figura (b) mostra a discretização unidimensional dos corpos na direção $\boldsymbol{e}_r$ cujos nós são dados por η; sendo utilizado o sistema de coordenadas cilíndricas, cujos eixos são r, θ e z e seus versores são $\boldsymbol{e}_r$, $\boldsymbol{e}_\theta$ e $\boldsymbol{e}_z$, respectivamente.



(a): Modelo com materiais sólido e fluido em coordenadas cilíndricas

(b): Seção discretizada do modelo em coordenadas cilíndricas

Figura 3.2: Discretização da seção transversal do corpo. (a) Modelo com materiais sólido e fluido e (b) seção discretizada do modelo em coordenadas cilíndricas, cuja direção de propagação de ondas se sentido de z e com periodicidade em θ.

3.2.1
Modelagem SAFE Cilindros, sólidos

Para a propagação de ondas harmônicas em materiais sólidos, como explicado no Capítulo 2, o deslocamento harmônico em qualquer ponto pode ser descrito como

$$\boldsymbol{u} = \begin{bmatrix} u_r \\ u_\theta \\ u_z \end{bmatrix} e^{i(-n\theta - kz + \omega t)}, \tag{3-34}$$

onde $\boldsymbol{u}$ representa o deslocamento harmônico, u_r, u_θ e u_z representam os componentes do deslocamento, já os termos da exponencial complexa $e^{i(-n\theta-kz+\omega t)}$ são: i é a unidade imaginária de $\sqrt{-1}$, n é o modo circunferencial, θ é a direção circunferencial, k é o número de onda, z é a direção de propagação de onda, ω é a frequência angular de onda e t é o tempo [63, 61]. Com base na Equação 3-34, o deslocamento dos elementos podem ser obtidos como

$$\boldsymbol{u} = \sum_{e=1}^{j} \boldsymbol{N}(r,\theta)\boldsymbol{u}^e e^{i(-n\theta - kz + \omega t)} \tag{3-35}$$

onde e é o número do elemento, j o número total de elementos, $\boldsymbol{N}(r,\theta)$, porém como há apenas discretização em r, $\boldsymbol{N}(r,\theta) = \boldsymbol{N}(r)$, e é a função de forma do elemento, $\boldsymbol{u}^e$ é o vetor de deslocamento nodal, definidos como

$$\begin{aligned} \boldsymbol{N}(r) &= \begin{bmatrix} N_1 & & & & N_j & & \\ & N_1 & & \cdots & & N_j & \\ & & N_1 & & & & N_j \end{bmatrix}, \\ \boldsymbol{u}^e &= \begin{bmatrix} u_{r1} & u_{\theta 1} & u_{z1} & \cdots & u_{rj} & u_{\theta j} & u_{zj} \end{bmatrix}^T. \end{aligned} \tag{3-36}$$

Segundo Kalkowski *et. al* [48], Viola *et. al* [61], e com base nas Equações 3-35 e 2-2, pode-se escrever a deformação nodal como

$$\boldsymbol{\varepsilon}^e = \left(\frac{1}{r}\boldsymbol{L}_c\boldsymbol{N} + \boldsymbol{L}_r\frac{\partial \boldsymbol{N}}{\partial r} - i\frac{n}{r}\boldsymbol{L}_\theta\boldsymbol{N} - ik\boldsymbol{L}_z\boldsymbol{N} \right) \boldsymbol{u}^e e^{i(-n\theta - kz + \omega t)}, \tag{3-37}$$

sendo

$$\boldsymbol{L}_c = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{L}_r = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\boldsymbol{L}_\theta = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{L}_z = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \tag{3-38}$$

agrupando $\left(\frac{1}{r}\boldsymbol{L}_c\boldsymbol{N} + \boldsymbol{L}_r\frac{\partial \boldsymbol{N}}{\partial r}\right)$ em $\boldsymbol{B}_1$, $\left(\frac{1}{r}\boldsymbol{L}_\theta\boldsymbol{N}\right)$ em $\boldsymbol{B}_2$ e $\boldsymbol{L}_z\boldsymbol{N}$ em $\boldsymbol{B}_3$, têm-se

$$\boldsymbol{\varepsilon}^e = (\boldsymbol{B}_1 - in\boldsymbol{B}_2 - ik\boldsymbol{B}_3)\boldsymbol{u}^e e^{i(-n\theta - kz + \omega t)}. \tag{3-39}$$

Seguindo o procedimento já descrito para placas, nas Equações 3-8 e 3-9, as equações para o movimento de sólidos podem ser obtidas através do princípio dos trabalhos virtuais, sendo $\hat{\boldsymbol{n}}$ o vetor normal à superfície para material sólido definido como $\hat{\boldsymbol{n}} = [1\ 0\ 0]^T$.

Desenvolvendo apenas a parte esquerda da Equação 3-7 para coordenadas cilíndricas, têm-se as expressões das matrizes de rigidez e massa, descritas como

$$\begin{aligned} \boldsymbol{k}_1^e &= 2\pi \int_r \boldsymbol{B}_1^T \boldsymbol{C} \boldsymbol{B}_1\, r dr, \\ \boldsymbol{k}_2^e &= 2\pi \int_r \left(-\boldsymbol{B}_1^T \boldsymbol{C} \boldsymbol{B}_2 + \boldsymbol{B}_2^T \boldsymbol{C} \boldsymbol{B}_1\right) r dr, \\ \boldsymbol{k}_3^e &= 2\pi \int_r \left(-\boldsymbol{B}_1^T \boldsymbol{C} \boldsymbol{B}_3 + \boldsymbol{B}_3^T \boldsymbol{C} \boldsymbol{B}_1\right) r dr, \\ \boldsymbol{k}_4^e &= 2\pi \int_r \left(\boldsymbol{B}_2^T \boldsymbol{C} \boldsymbol{B}_3 + \boldsymbol{B}_3^T \boldsymbol{C} \boldsymbol{B}_2\right) r dr, \\ \boldsymbol{k}_5^e &= 2\pi \int_r \boldsymbol{B}_2^T \boldsymbol{C} \boldsymbol{B}_2\, r dr, \\ \boldsymbol{k}_6^e &= 2\pi \int_r \boldsymbol{B}_3^T \boldsymbol{C} \boldsymbol{B}_3\, r dr, \end{aligned} \tag{3-40}$$

$$\boldsymbol{m}^e = 2\pi \int_r \boldsymbol{N}^T \rho \boldsymbol{N}\, r dr, \tag{3-41}$$

a parte da direita da Equação de acoplamento, associada ao acoplamento entre materiais sólidos e fluidos, será abordada posteriormente.

Com as Equações 3-40 e 3-41 para cada elemento, o problema pode ser montado com uma metodologia padrão de elementos finitos e tendo como resultado as matrizes de rigidez e inércia do sistema, como descrito

$$\boldsymbol{K}_{1,\ldots,6} = \bigcup_{e=1}^{j} \boldsymbol{k}^{e}_{1,\ldots,6}, \quad \boldsymbol{M} = \bigcup_{e=1}^{j} \boldsymbol{m}^{e}, \quad \boldsymbol{U} = \bigcup_{e=1}^{j} \boldsymbol{u}^{e}. \tag{3-42}$$

A Equação 3-43 mostra a equação característica do problema através das Equações 3-40, 3-41 e 3-42, ou seja

$$(\boldsymbol{K}_1 + in\boldsymbol{K}_2 + ik\boldsymbol{K}_3 + kn\boldsymbol{K}_4 + n^2\boldsymbol{K}_5 + k^2\boldsymbol{K}_6 - \omega^2\boldsymbol{M})\boldsymbol{U} = \boldsymbol{0}. \tag{3-43}$$

Segundo Kalkowski *et. al* [48], todas as matrizes são simétricas com exceção das matrizes de rigidezes $\boldsymbol{K}_2$ e $\boldsymbol{K}_3$, as quais são antissimétricas. Kalkowski [48] explica que a antissimetria das matrizes $\boldsymbol{K}_2$ e $\boldsymbol{K}_3$ é devido ao acoplamento dos deslocamentos u_r com u_θ e u_r com u_z, por isso propõe uma transformação diagonal através da matriz $\boldsymbol{T}$, mostrada na Equação 3-44, nas matrizes $\boldsymbol{K}_2$ e $\boldsymbol{K}_3$, mostradas na Equação 3-45, tornando-as simétricas. A matriz de transformação diagonal tem como propriedades: elementos nulos, exceto na diagonal principal; os valores da diagonal obedecem à regra de serem 1 na direção de $\boldsymbol{e}_r$ e i para as demais direções. Sendo que a matriz $\boldsymbol{T}$ para cilindros difere da matriz $\boldsymbol{T}$ para placas, uma vez que para cilindros considera-se a periodicidade em θ, ou seja, um i a mais para cada elemento.

$$\boldsymbol{T} = \begin{bmatrix} 1 & & & & & & \\ & i & & & & & \\ & & i & & & & \\ & & & \ddots & & & \\ & & & & 1 & & \\ & & & & & i & \\ & & & & & & i \end{bmatrix} \tag{3-44}$$

$$\begin{aligned} \hat{\boldsymbol{K}}_2 &= -i\boldsymbol{T}^T\boldsymbol{K}_2\boldsymbol{T}, \\ \hat{\boldsymbol{K}}_3 &= -i\boldsymbol{T}^T\boldsymbol{K}_3\boldsymbol{T}, \end{aligned} \tag{3-45}$$

Portanto, pode-se resolver o problemas de propagação de ondas em materiais sólidos cilíndricos como descrito

$$(\boldsymbol{K}_1 + n\hat{\boldsymbol{K}}_2 + k\hat{\boldsymbol{K}}_3 + kn\boldsymbol{K}_4 + n^2\boldsymbol{K}_5 + k^2\boldsymbol{K}_6 - \omega^2\boldsymbol{M})\boldsymbol{TU} = 0, \tag{3-46}$$

onde a Equação 3-46 pode ser interpretada como um problema de autovalor e autovetor para um valor de frequência, onde os autovalores são os pares número de onda e seu conjugado, e os autovetores são os deslocamentos nodais.

Devido à ordem da Equação 3-46 ser quadrática para k, reordena-se a Equação 3-46 como mostrado

$$\left(\begin{bmatrix} \boldsymbol{K}_6 & \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{0} & -\left(\boldsymbol{K}_1 + n\hat{\boldsymbol{K}}_2 + n^2\boldsymbol{K}_5 - \omega^2\boldsymbol{M}\right) \end{bmatrix} - k\begin{bmatrix} \boldsymbol{0} & \boldsymbol{K}_6 \\ \boldsymbol{K}_6 & \hat{\boldsymbol{K}}_3 + n\boldsymbol{K}_4 \end{bmatrix}\right)\begin{Bmatrix} k\boldsymbol{TU} \\ \boldsymbol{TU} \end{Bmatrix} = \boldsymbol{0}. \tag{3-47}$$

3.2.2
Modelagem SAFE Cilindros, fluidos

Seguindo o mesmo procedimento de placas, Segundo Kalkowski *et. al* [48], a propagação de ondas harmônicas em materiais fluidos pode ser descrita através do campo de velocidade potencial $\boldsymbol{\phi}$ em coordenadas cilíndricas, descrito como

$$\boldsymbol{\phi} = \begin{bmatrix} \phi_r \\ \phi_\theta \\ \phi_z \end{bmatrix} e^{i(-n\theta - kz + \omega t)}. \tag{3-48}$$

Com base na Equação 3-48, a velocidade potencial de cada nó pode ser descrita como

$$\boldsymbol{\phi} = \sum_{e=1}^{j} \boldsymbol{N}(r,\theta)\boldsymbol{\phi}^e e^{i(-n\theta - kz + \omega t)}, \tag{3-49}$$

onde e é o número do elemento, j o número total de elementos, $\boldsymbol{\phi}$ representa a velocidade potencial harmônica em qualquer ponto do material fluido; $\boldsymbol{N}(r, \theta)$ é a função de forma, $\boldsymbol{\phi}^e$ é o vetor de deslocamento nodal.

Com base na Equação 2-12 e 3-49, pode-se escrever a velocidade como mostrado

$$\boldsymbol{v}^e = \boldsymbol{\nabla}\boldsymbol{\phi}^e = \begin{bmatrix} \frac{\partial \boldsymbol{\phi}}{\partial r} & -i\frac{\boldsymbol{n}}{r}\frac{\partial \boldsymbol{\phi}}{\partial \theta} & -i\boldsymbol{k}\frac{\partial \boldsymbol{\phi}}{\partial z} \end{bmatrix}^T, \tag{3-50}$$

Segundo o procedimento de Kalkowski *et. al* [48], as equações para a solução do problema de fluidos podem ser obtidas através do princípio do trabalho virtual, já definidas na Equação 3-19. Desenvolvendo apenas a parte esquerda da Equação 3-19, têm-se as expressões das matrizes de rigidez e massa, sendo

$$\begin{aligned} \boldsymbol{k}_1^e &= 2\pi \int_r \frac{\partial \boldsymbol{N}}{\partial r}^T \rho \frac{\partial \boldsymbol{N}}{\partial r}\, rdr, \\ \boldsymbol{k}_5^e &= 2\pi \int_r \boldsymbol{N}^T \rho \boldsymbol{N}\, rdr, \\ \boldsymbol{k}_6^e &= 2\pi \int_r \boldsymbol{N}^T \rho \boldsymbol{N}\, rdr, \end{aligned} \tag{3-51}$$

$$\boldsymbol{m}^e = 2\pi \int_r \boldsymbol{N}^T \frac{\rho^2}{\lambda} \boldsymbol{N}\, rdr, \tag{3-52}$$

a parte da direita da Equação 3-19, associada ao acoplamento entre materiais sólidos-fluidos, será abordada posteriormente.

Com as Equações 3-51 e 3-52 para cada elemento, o problema pode ser montado com uma metodologia padrão de elementos finitos e tendo como resultado as matrizes de rigidez e inércia do sistema, como mostrado

$$\boldsymbol{K}_{1,5,6} = \bigcup_{e=1}^{j} \boldsymbol{k}_{1,5,6}^e, \quad \boldsymbol{M} = \bigcup_{e=1}^{j} \boldsymbol{m}^e, \quad \boldsymbol{\Phi} = \bigcup_{e=1}^{j} \boldsymbol{\phi}^e, \tag{3-53}$$

Segundo Kalkowski [48], todas as matrizes são simétricas para o material fluido, e portanto não há necessidade do uso da matriz de transformação, como no caso de materiais sólidos.

A Equação 3-54, do mesmo modo como foi para o caso de materiais sólidos, pode ser entendita como um problema de autovalor e autovetor para cada frequência, onde os autovalores são os pares número de onda e seu conjugado, e o autovetor são os deslocamentos nodais, como mostrado

$$(\boldsymbol{K}_1 + n^2\boldsymbol{K}_5 + k^2\boldsymbol{K}_6 - \omega^2\boldsymbol{M})\boldsymbol{\Phi} = \boldsymbol{0}. \tag{3-54}$$

Devido à ordem da Equação 3-54 ser quadrática para k, reordena-se a Equação 3-54 como mostrado

$$\left(\begin{bmatrix} \boldsymbol{K}_6 & \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{0} & -\left(\boldsymbol{K}_1 + n^2\boldsymbol{K}_5 - \omega^2\boldsymbol{M}\right) \end{bmatrix} - k\begin{bmatrix} \boldsymbol{0} & \boldsymbol{K}_6 \\ \boldsymbol{K}_6 & \boldsymbol{0} \end{bmatrix}\right)\begin{Bmatrix} k\boldsymbol{\Phi} \\ \boldsymbol{\Phi} \end{Bmatrix} = \boldsymbol{0}. \tag{3-55}$$

3.2.3 Modelagem SAFE Cilindros, sólidos-fluidos

Seguindo o mesmo procedimento para placas, onde a interação entre sólidos e fluidos é mantida pela continuidade do deslocamento, velocidade e pressão na interface [48]. As equações de acoplamento são descritas como

$$\begin{aligned} \boldsymbol{H} &= \rho \int_A \mathbf{N}_u^T \hat{\boldsymbol{n}} \mathbf{N}_\phi dA = \rho 2\pi r_A \mathbf{N}_u^T \hat{\boldsymbol{n}} \mathbf{N}_\phi, \\ \boldsymbol{H}^T &= \rho \int_A \mathbf{N}_\phi^T \hat{\boldsymbol{n}}^T \mathbf{N}_u dA = \rho 2\pi r_A \mathbf{N}_\phi^T \hat{\boldsymbol{n}}^T \mathbf{N}_u, \end{aligned} \tag{3-56}$$

sendo r_A a região onde há o contato entre os dois materiais. A matriz de acoplamento é descrita como

$$\boldsymbol{K}_c = \begin{bmatrix} \boldsymbol{0} & \boldsymbol{H}^T \\ -\boldsymbol{H} & \boldsymbol{0} \end{bmatrix}. \tag{3-57}$$

Para tornar as matrizes simétricas, devido a matriz de acoplamento não ser simétrica, multiplica-se todas as matrizes referente ao material fluido por -1, como mostrado

$$\begin{aligned}\left(\begin{bmatrix}-\boldsymbol{K}_1^f-\boldsymbol{K}_5^f & \mathbf{0}\\ \mathbf{0} & \boldsymbol{K}_1^s+n\hat{\boldsymbol{K}}_2^s+\boldsymbol{K}_5^s\end{bmatrix}+\right.\\ k\begin{bmatrix}\mathbf{0} & \mathbf{0}\\ \mathbf{0} & \hat{\boldsymbol{K}}_3^s+n\boldsymbol{K}_4\end{bmatrix}+k^2\begin{bmatrix}-\boldsymbol{K}_6^f & \mathbf{0}\\ \mathbf{0} & \boldsymbol{K}_6^s\end{bmatrix}+\\ i\omega\begin{bmatrix}\mathbf{0} & -\boldsymbol{H}^T\\ -\boldsymbol{H} & \mathbf{0}\end{bmatrix}-i\omega^2\left.\begin{bmatrix}-\boldsymbol{M}^f & \mathbf{0}\\ \mathbf{0} & \boldsymbol{M}^s\end{bmatrix}\right)\begin{Bmatrix}\boldsymbol{\phi}\\ \boldsymbol{TU}\end{Bmatrix}=\mathbf{0}.\end{aligned} \tag{3-58}$$

As matrizes de rigidezes e massa devem ser unidas através de um procedimento de elementos finitos, como é mostrado

$$\begin{aligned}\overline{\boldsymbol{K}}_{1,..,6}&=(-\boldsymbol{K}_{1,...,6}^f)\bigcup(+\boldsymbol{K}_{1,...,6}^s),\\ \overline{\boldsymbol{M}}&=(-\boldsymbol{M}^f)\bigcup(+\boldsymbol{M}^s),\\ \boldsymbol{\Psi}&=\boldsymbol{\Phi}\bigcup\boldsymbol{TU},\end{aligned} \tag{3-59}$$

onde o sobrescrito (^{s}) indica as matrizes referentes ao material sólido e (^{f}) indica as matrizes referentes ao material fluido e devem sem multiplicadas por -1.

Com base nas matrizes obtidas na 3-59, pode-se descrever e comportamento da propagação de ondas em meios sólidos e fluidos como mostrado

$$(\overline{\boldsymbol{K}}_1+n\overline{\hat{\boldsymbol{K}}}_2+k\overline{\hat{\boldsymbol{K}}}_3+kn\overline{\boldsymbol{K}}_4+n^2\overline{\boldsymbol{K}}_5+k^2\overline{\boldsymbol{K}}_6+i\omega\overline{\boldsymbol{K}_c}-\omega^2\overline{\boldsymbol{M}})\boldsymbol{\Psi}=\mathbf{0}. \tag{3-60}$$

Devido à ordem da Equação 3-60 ser quadrática para k, reordena-se como

$$\begin{aligned}\left(\begin{bmatrix}\overline{\boldsymbol{K}}_6 & \mathbf{0}\\ \mathbf{0} & -\left(\overline{\boldsymbol{K}}_1+n\overline{\hat{\boldsymbol{K}}}_2+n^2\overline{\boldsymbol{K}}_5+i\omega\overline{\boldsymbol{K}_c}-\omega^2\overline{\boldsymbol{M}}\right)\end{bmatrix}-\right.\\ k\left.\begin{bmatrix}\mathbf{0} & \overline{\boldsymbol{K}}_6\\ \overline{\boldsymbol{K}}_6 & \overline{\hat{\boldsymbol{K}}}_3+n\overline{\boldsymbol{K}}_4\end{bmatrix}\right)\begin{Bmatrix}k\boldsymbol{\Psi}\\ \boldsymbol{\Psi}\end{Bmatrix}=\mathbf{0}.\end{aligned} \tag{3-61}$$

A Equação 3-61 pode ser entendida de forma simplificada como

$$
\begin{gathered}
A = \begin{bmatrix} \overline{K}_6 & 0 \\ 0 & -\left(\overline{K}_1 + n\overline{\hat{K}}_2 + n^2\overline{K}_5 + i\omega\overline{K_c} - \omega^2\overline{M}\right) \end{bmatrix}, \\
B = \begin{bmatrix} 0 & \overline{K}_6 \\ \overline{K}_6 & \overline{\hat{K}}_3 + n\overline{K}_4 \end{bmatrix}, \\
(A - kB)\left\{\overline{\Psi}\right\} = 0, \\
\left(B^{-1}A - kI\right)\left\{\overline{\Psi}\right\} = 0.
\end{gathered} \tag{3-62}
$$

3.2.4 Modelagem SAFE Cilindros, $r_i = 0$

Para casos com raio interno igual a zero $r_i = 0$, as equações para coordenadas cilíndricas tendem a não convergirem devido ao termo r nas equações. Foi utilizada a solução proposta por Kalkowski *et. al* [48], que resolveu esse problema utilizando funções de forma de Lagrange sobre nós de Gauss-Lobatto-Jacobi (GLJ), que em seus cálculos contorna o problema do raio interno nulo computando o valor de r no cálculo dos pesos; e nós de Gauss-Lobatto-Legendre (GLL) para as demais camadas.

O procedimento mostrado nas Equações 3-33 e 3-62 podem ser estendidos para várias camadas, como mostra o Algoritmo 1.

Algoritmo 1: Algoritmo SAFE

Entrada: Dimensões, Materiais e Frequência
Saída: Número de Onda e Modos

se *Problema de Placa* **então**
- *Crie as matrizes* $\boldsymbol{K}_{1,\dots,3}$, $\boldsymbol{K}_c$ *e* $\boldsymbol{M}$ *para cada camada de material com base nas dimensões e materiais fornecidos;*
- *Monte as matrizes* $\overline{\boldsymbol{K}}_{1,\dots,3}$, $\overline{\boldsymbol{K}}_c$ *e* $\overline{\boldsymbol{M}}$;
- *Crie o vetor de frequência escolhidas* $\boldsymbol{f}$;
- *Crie a matriz* $\boldsymbol{B}^{-1}$;
- **para** $j = 1$ **até** n **faça**
  - *Crie a matriz* $\boldsymbol{A}_{f_i}$;
  - *Resolva* $\left(\boldsymbol{B}^{-1}\boldsymbol{A}_{f_i} - k\mathbb{I}\right)\overline{\boldsymbol{\Psi}} = \boldsymbol{0}$;
  - *Salve* $\boldsymbol{k}_i$ *e* $\overline{\boldsymbol{\Psi}}_{\boldsymbol{i}}$;
- *Monte o gráfico* $\boldsymbol{k} - \boldsymbol{f}$;

se *Problema de Cilindro* **então**
- *Crie as matrizes* $\boldsymbol{K}_{1,\dots,6}$, $\boldsymbol{K}_c$ *e* $\boldsymbol{M}$ *para cada camada de material com base nas dimensões e materiais fornecidos;*
- *Monte as matrizes* $\overline{\boldsymbol{K}}_{1,\dots,6}$, $\overline{\boldsymbol{K}}_c$ *e* $\overline{\boldsymbol{M}}$;
- *Crie o vetor de frequência escolhidas* $\boldsymbol{f}$;
- *Crie a matriz* $\boldsymbol{B}^{-1}$;
- **para** $j = 1$ **até** n **faça**
  - *Crie a matriz* $\boldsymbol{A}_{f_i}$;
  - *Resolva* $\left(\boldsymbol{B}^{-1}\boldsymbol{A}_{f_i} - k\mathbb{I}\right)\overline{\boldsymbol{\Psi}} = \boldsymbol{0}$;
  - *Salve* $\boldsymbol{k}_i$ *e* $\overline{\boldsymbol{\Psi}}_{\boldsymbol{i}}$;
- *Monte o gráfico* $\boldsymbol{k} - \boldsymbol{f}$;

Para validar o modelos SAFE, mostrado no Algoritmo 1 utilizou-se modelos analíticos e modelos de elementos finitos, como mostrado no Capítulo 4.

4
Validação SAFE

Nesta seção são comparados os resultados dos modelos SAFE com resultados analíticos, discutidos no Capítulo 2, e resultados de artigos que abordam ondas guiadas em multicamadas para validação dos modelos SAFE. As validações seguiram a seguinte ordem:

1. Testes com SAFE com modelos analíticos de placa para o caso de uma placa de aço de 1 mm e para um caso de uma placa de água de espessura de 1 mm, além de utilizar resultados de livros e artigos que abordam ondas guiadas em multicamadas, como os obtidos por Rose [56], que comenta o caso de uma placa de alumínio de 1 mm de espessura e uma placa de gelo de 0.2 mm de espessura sobrepostas; e por Yapura *et al.* [64], que comenta o caso de uma placa de alumínio de 1 mm de espessura e uma placa de água de 0.025 mm de espessura sobrepostas;

2. Realizou-se comparações do SAFE para placas com o modelo analítico para cilindros e SAFE para cilindros, utilizando uma relação de raios $rel = r_i/r_o$, onde rel é a relação de raios, r_i é o raio interno e r_o é o raio externo. Utilizou-se $rel = 0.999001$, pois as soluções de cilindros com rel tendendo a 1 se aproximam das soluções para placas, como descrito por Van Velsor [49];

3. Realizou-se testes com SAFE de cilindros com resultados de artigos que abordam ondas guiadas em multicamadas;

Os resultados esperados dos modelos têm a forma mostrada na Figura 4.1. A mesma representa a solução do número de onda complexo por frequência, e pode-se ilustrar a solução através dos eixo de número de onda real (em inglês, *Real wavenumber*), número de onda imaginário (em inglês, *Imag. wavenumber*) e frequência (em inglês, *Frequency*).

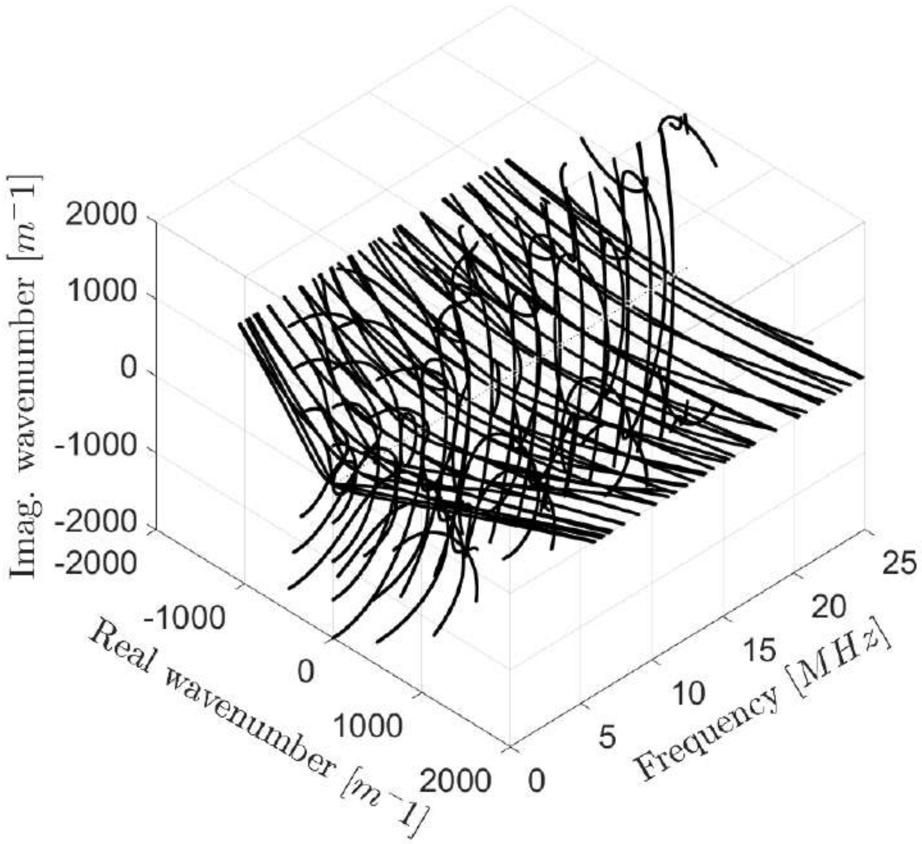
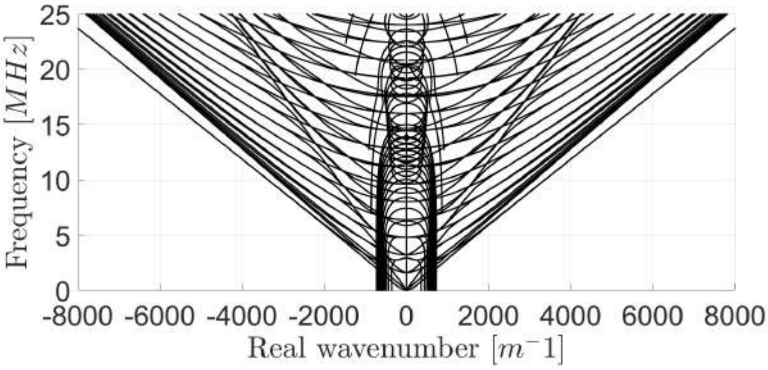
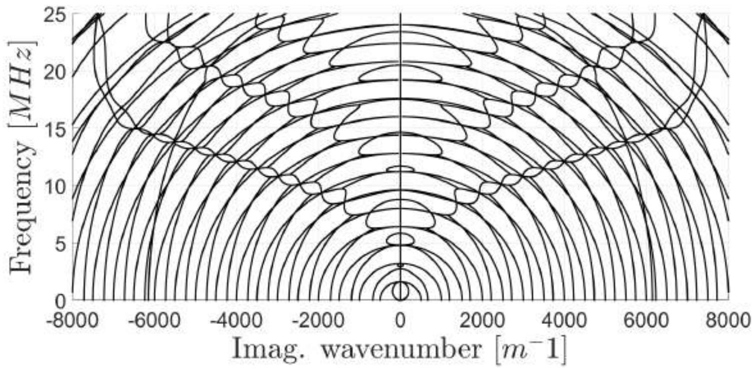


Figura 4.1: Exemplo da solução SAFE. Solução do número de onda complexo por frequência

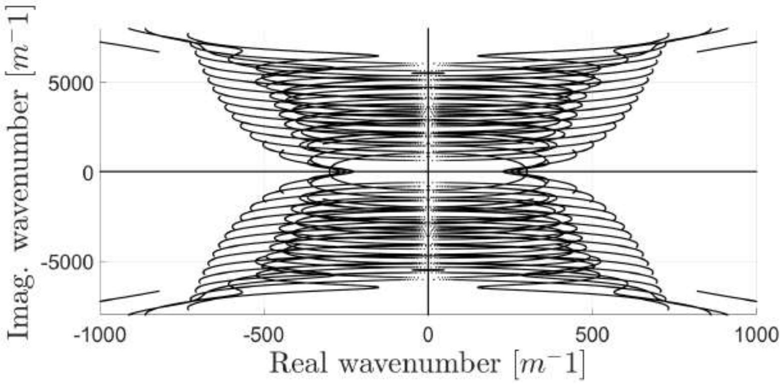
Como o resultado do SAFE é complexo, observou-se a Figura 4.1 através dos eixos número de onda real, número de onda imaginário e frequência como mostrado Figura 4.2. Segundo Giurgiutiu [65], os números de onda complexos, mostrados na Figura 4.2, podem ser divididos em reais, imaginários e complexos. O significado físico da parte real do número de onda corresponde às ondas que se propagam, já a parte imaginária do números de onda imaginários correspondem às chamadas ondas evanescentes, e que não se propagam mas representam uma vibração local e podem ser entendidas como a atenuação por unidade de distância, e por fim, os números de onda complexos, que correspondem as ondas que se propagam mas decaem a medida que se afasta da fonte [65].



(a): Vista frequência - número de onda real



(b): Vista frequência - número de onda imaginário



(c): Vista número de onda imaginário - número de onda real

Figura 4.2: Visualização do resultado complexo do SAFE.

Portanto, como há interesse apenas nos modos propagantes, estabeleceu-se que os resultados do SAFE são selecionados de modo que somente são exibidos os número de onda reais positivos, como mostrado na Figura 4.3. A mesma ilustra as partes imaginária k_{imag} e a parte real k_{real} do número de onda. Portanto, os resultados exibidos a partir desse ponto estarão referidos apenas à parte real do número de onda.

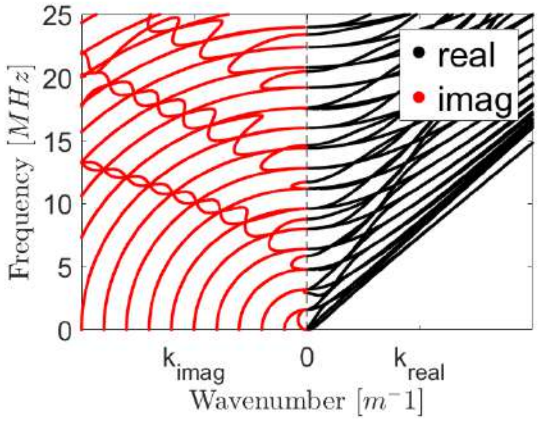
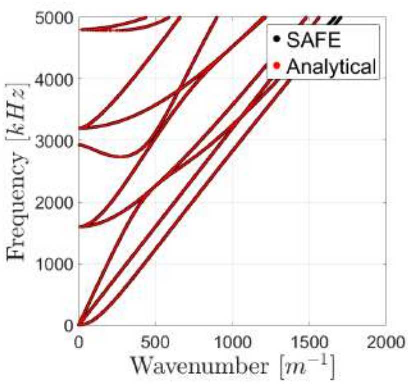


Figura 4.3: Resultado da filtragem dos resultados SAFE para a parte real do número de onda k_{real} e a parte imaginária do número de onda k_{imag}.

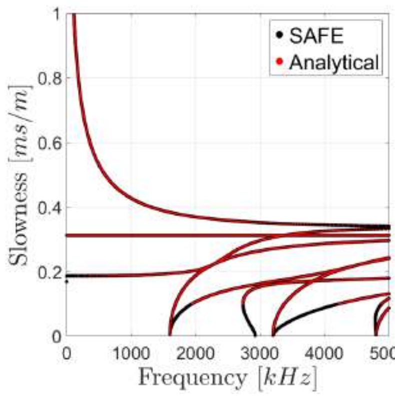
4.1 SAFE para placa com Modelo Analítico de Placa de Material Sólido

Nesta seção, são mostrados os resultados analíticos (em inglês, *Analytical*) e SAFE para uma placa de aço de 1 mm de espessura, com as propriedades utilizadas do aço (*steel*), mostradas na Tabela 6.5, sendo as velocidades de onda de corpo $v_L = 5850$ m/s, $v_T = 3200$ m/s e densidade $\rho = 7850$ kg/m^3, o resultado é mostrado através das curvas de dispersão de número de onda e vagarosidade para uma faixa de frequência de 0 a 5000 kHz.

Como pode-se observar na Figura 4.4, os resultados do SAFE para placas são coerentes e convergem para a solução analítica de uma placa de meio sólido.



(a): Número de onda, comparação modelo analítico para placas e SAFE para placas



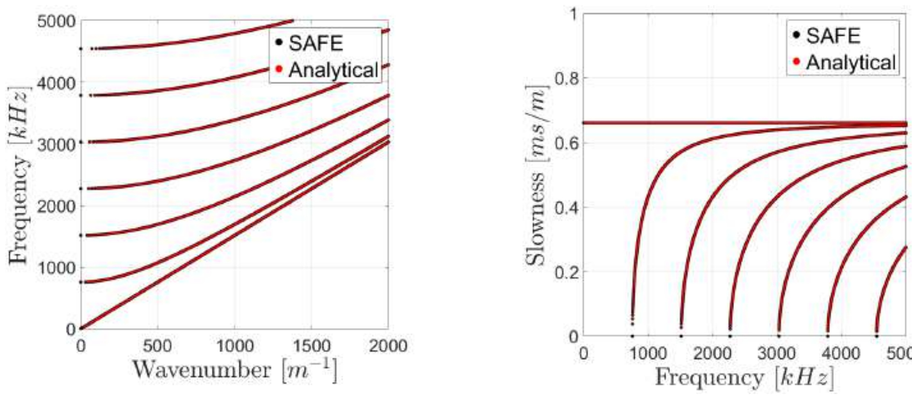
(b): Vagarosidade, comparação modelo analítico para placas e SAFE para placas

Figura 4.4: Comparação dos resultados analítico e SAFE para uma placa de aço de 1 mm de espessura.

4.2 SAFE para placa com Modelo Analítico de Placa de Material Fluido

Nesta seção são mostrados os resultados analíticos e SAFE para uma placa de água de 1 mm de espessura, com as propriedades utilizadas da água (*water*), mostradas na Tabela 6.5, sendo as velocidades de corpo $v_L = 1515$ m/s e densidade $\rho = 1049$ kg/m^3. O resultado é mostrado através das curvas de dispersão de número de onda e vagarosidade para uma faixa de frequência de 0 a 5000 kHz.

Como pode-se observar na Figura 4.5, os resultados do SAFE para placas são coerentes e convergem para a solução analítica de uma placa de meio fluido.



(a): Número de onda, comparação modelo analítico para placas e SAFE para placas

(b): Vagarosidade, comparação modelo analítico para placas e SAFE para placas

Figura 4.5: Comparação dos resultados analítico e SAFE para uma lâmina de água de 1 mm de espessura.

4.3 SAFE com Modelo de Placa Multicamadas

Nesta seção são mostrados os resultados da comparação da velocidade de fase para duas placas de meios sólidos diferentes sobrepostas e também é mostrado o resultado da comparação da velocidade de fase para duas placas de meios diferentes sobrepostas.

A Figura 4.6 ilustra o caso simulado de uma placa de alumínio de 1 mm de espessura e uma placa de gelo de 0.2 mm de espessura, com as propriedades do alumínio $\rho = 2700$ kg/m^3, velocidades de corpo $v_L = 6396$ m/s e $v_T = 3111$ m/s; e sendo as propriedades do gelo $\rho = 900$ kg/m^3, velocidades de corpo $v_L = 3856$ m/s e $v_T = 1848$ m/s.

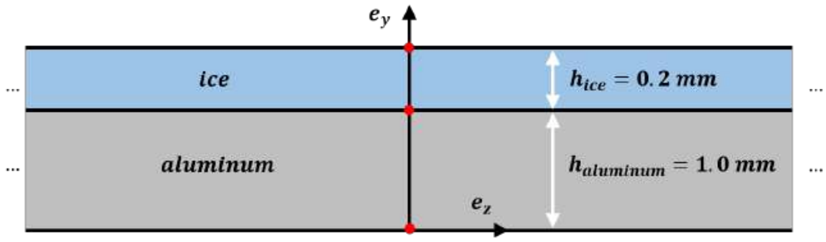
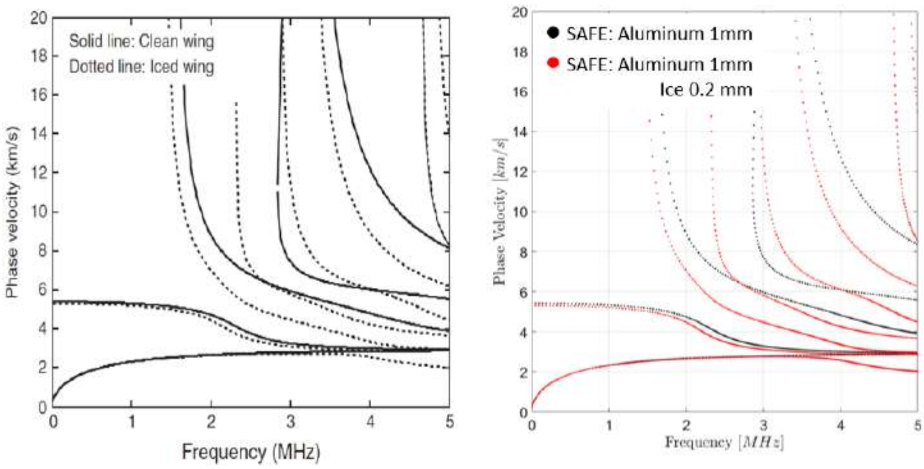


Figura 4.6: Ilustração do modelo com duas placas sobrepostas, uma placa de alumínio de 1 mm de espessura e uma placa de gelo de 0.2 mm de espessura, baseado em Rose [56].

A Figura 4.7 apresenta a comparação dos resultados extraídos de Rose [56] e SAFE para placas para validação. Como pode-se observar na Figura 4.7, os resultados do SAFE para placas são coerentes e convergem.



(a): Velocidade de fase, Rose [56] (b): Velocidade de fase, SAFE placa

Figura 4.7: Resultados da comparação da velocidade de fase para duas placas sobrepostas, uma placa de alumínio de 1 mm de espessura e uma placa de gelo de 0.2 mm de espessura.

A Figura 4.8 ilustra o caso simulado de uma placa de alumínio de 1 mm de espessura e uma placa de água de 0.025 mm de espessura, com as propriedades do alumínio $\rho = 2700$ kg/m^3, velocidades de corpo $v_L = 5950$ m/s e $v_T = 3120$ m/s; e sendo as propriedades da água $\rho = 1000$ kg/m^3 e velocidade de corpo $v_L = 1480$ m/s.

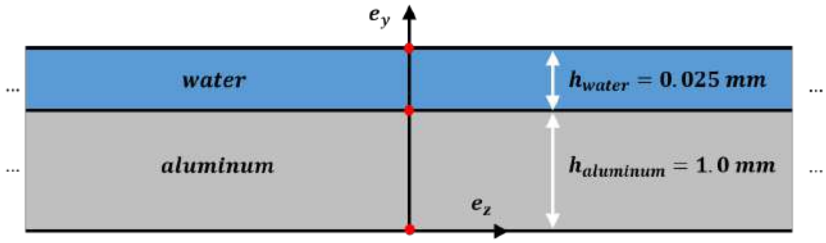
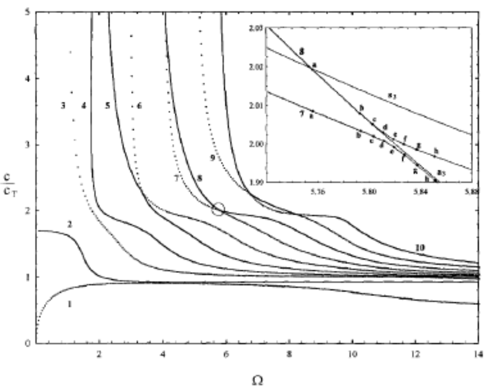
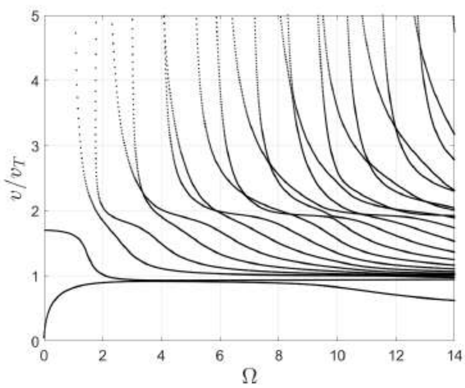


Figura 4.8: Ilustração do modelo com duas placas sobrepostas, uma placa de alumínio de 1 mm de espessura e uma placa de água de 0.025 mm de espessura, baseado em Rose [56].

A Figura 4.9 mostra o resultado da comparação dos resultados de Yapura *et al.* [64] e SAFE para placas, para validação. Como pode-se observar na Figura 4.7, os resultados do SAFE para placas são coerentes e convergem para a solução analítica de uma placa de meio fluido.



(a): Velocidade de fase, Yapura *et al.* [64]



(b): Velocidade de fase, SAFE placa

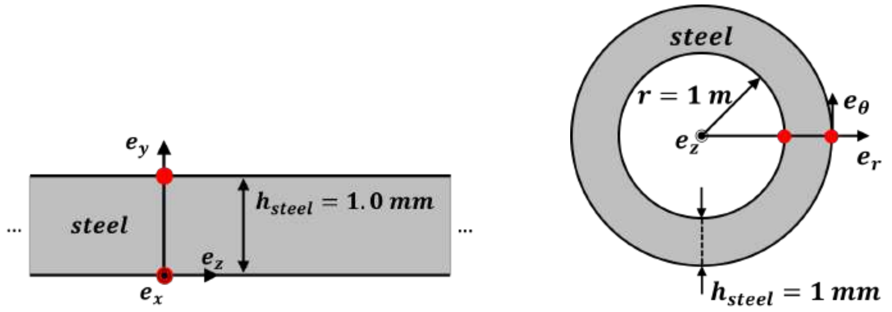
Figura 4.9: Resultados da comparação da velocidade de fase para duas placas, uma de meio sólido e uma de meio fluido, sobrepostas, uma placa de alumínio de 1 mm de espessura e uma placa de água de 0.025 mm de espessura.

As figuras das Seções 4.1 e 4.2 apresentam uma boa concordância entre os resultados analíticos e com SAFE para meios sólidos e fluidos. Na Seção 4.3 observou-se que o acoplamento entre as camadas de diferentes materiais teve resultado coerente com os dados que foram comparados. Portanto, com os modelos SAFE validados para placas, utilizou-se esses modelos para validar o SAFE para cilindros, juntamente com casos analíticos.

4.4 SAFE para Cilindros Comparado com SAFE para Placas e Modelo Analítico para Cilindros

Nesta seção são mostrados e comparados os resultados SAFE para placas, modelo analítico para cilindros e SAFE para cilindros. Comparou-se modelos SAFE para placas, modelo analítico para cilindros e SAFE para cilindros de uma placa de aço e de um cilindro de aço. Posteriormente, comparou-se o modelo SAFE para cilindros para um cilindro maciço de aço para os quatro primeiros modos circunferências com os resultados obtidos por [61], e por fim, comparou-se o SAFE para cilindros com o modelo analítico para um caso multicamadas.

A Figura 4.10 ilustra o caso simulado de uma placa de aço de 1 mm de espessura e um cilindro de 1 mm de espessura, com as propriedades de velocidade de corpo $v_L = 5850$ m/s, $v_T = 3200$ m/s e densidade $\rho = 7850$ kg/m^3.

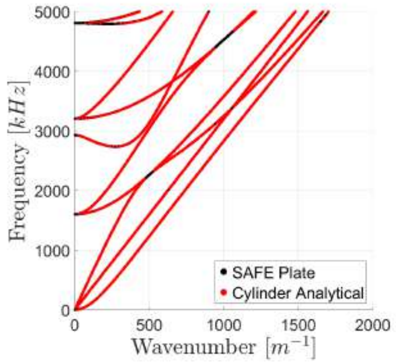


(a): Número de onda, SAFE cilíndrico com raio de 0.5 mm

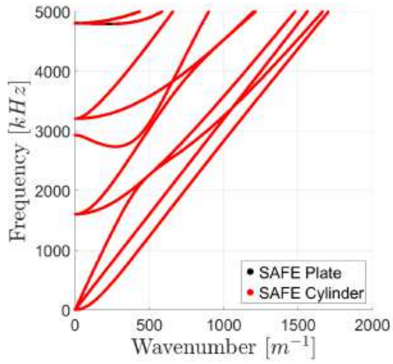
(b): Número de onda, SAFE cilíndrico com aço e água

Figura 4.10: Modelos de placa e cilindro usado para comparações.

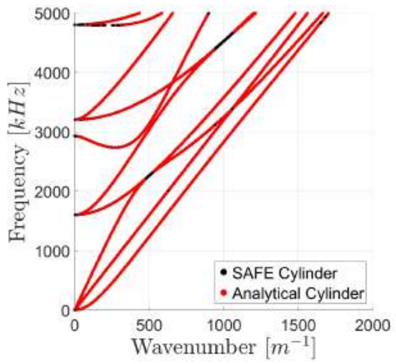
Na Figura 4.11 realizou-se esse teste para checar as rotinas do código SAFE para cilindros, uma vez que o desenvolvimento SAFE para cilindros é muito mais complexo do que para placas; e também foi possível verificar a convergência dos resultados.



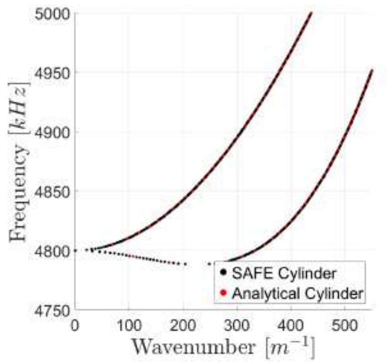
(a): Comparação modelo analítico para cilindros e SAFE para placas



(b): Comparação do SAFE para cilindros e SAFE para placas



(c): Comparação do SAFE para cilindros e modelo analítico para cilindros



(d): Comparação do SAFE para cilindros e modelo analítico para cilindros dos dois últimos modos encontrados

Figura 4.11: Resultados da comparação do SAFE para placas, modelo analítico para cilindros e SAFE para cilindros. Espessura de 1 mm e para casos cilíndricos um $rel = 0.999001$.

Nota-se na Figura 4.11 (a), (b) e (c) que as soluções convergem, e na Figura 4.11 (d) é visto a comparação dos dois últimos modos, os modos que começam perto de 4800 kHz, entre o SAFE para cilindros e modelo analítico para cilindros, com uma diferença no número de onda de 0.6 m^{-1}.

A Figura 4.12 ilustra o caso simulado de um cilindro de aço, maciço, de raio igual 1 mm, para os quatro primeiros modos.

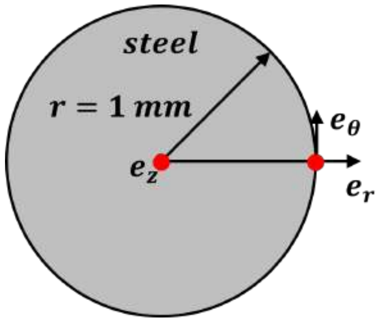
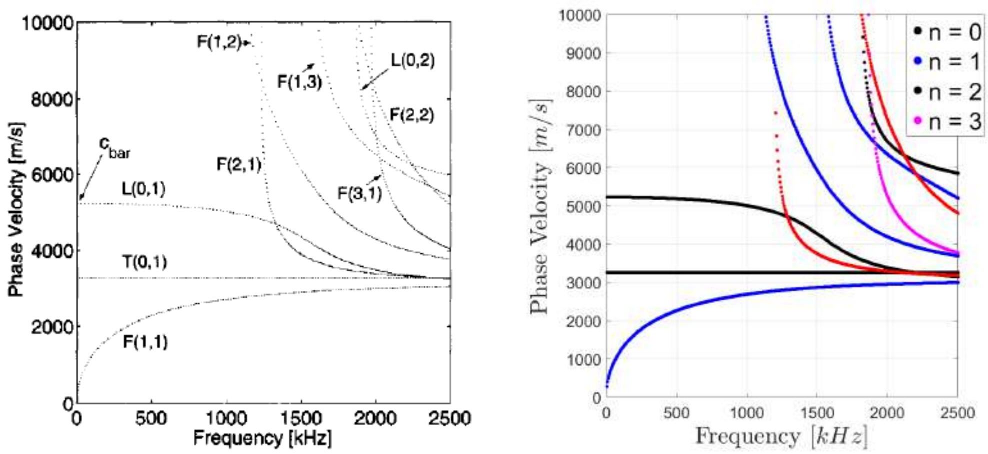


Figura 4.12: Modelo de um cilindro maciço de aço, com raio igual a 1 mm, usado para comparações com Viola *et al.* [61]

Na Figura 4.13 é mostrada a comparação dos dados para um cilindro de aço, de 1 mm de raio, para os quatro primeiros modos circunferenciais, sendo as propriedades de velocidades de corpo $v_L = 5960$ m/s, $v_T = 3260$ m/s e densidade $\rho = 7800$ kg/m^3, baseado em Viola *et al.* [61], onde L simboliza os modos de onda longitudinais, F simboliza os modos de onda flexurais e T simboliza os modos de onda torcionais. Observou-se o mesmo comportamento dos modos de onda e uma boa coerência entre os dados.



(a): Velocidade de fase, Viola *et al.* [61]

(b): Velocidade de fase, SAFE para cilindros

Figura 4.13: Resultado da comparação dos dados para um cilindro de aço, de 1 mm de raio, para os quatro primeiros modos. (a) Resultado obtido por Viola *et al.* [61] para um cilindro de aço, de 1 mm de raio, para os quatro primeiros modos, onde L simboliza os modos de onda longitudinais, F simboliza os modos de onda flexurais e T simboliza os modos de onda torcionais, (b) SAFE para cilindros para os quatro primeiros modos circunferenciais.

A Figura 4.14 ilustra o caso simulado de um cilindro de aço com de 1 mm de espessura e um cilindro interno de água com 2 mm de raio.

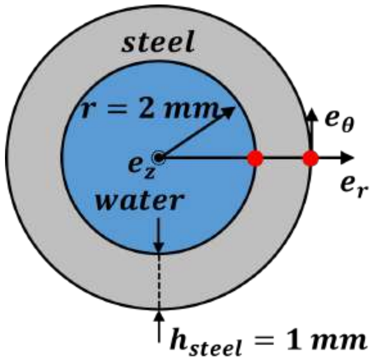


Figura 4.14: Modelo de um cilindro de aço com de 1 mm de espessura e um cilindro interno de água com 2 mm de raio utilizando o modelo analítico para cilindros, baseado em Correia [12].

Na Figura 4.15 é mostrada a comparação dos dados analíticos para um cilindro de aço de 1 mm de espessura e um cilindro interno de água de 2 mm, sendo as propriedades do aço velocidades de corpo $v_L = 5850$ m/s, $v_T = 3200$ m/s e densidade $\rho = 7850$ kg/m^3; e as propriedades para a água $\rho = 1049$ kg/m^3 e velocidade de corpo $v_L = 1515$ m/s. Percebeu-se que o método analítico para cilindros não encontrou várias soluções esperadas e teve um custo computacional elevado se comparado com o SAFE para cilindros.

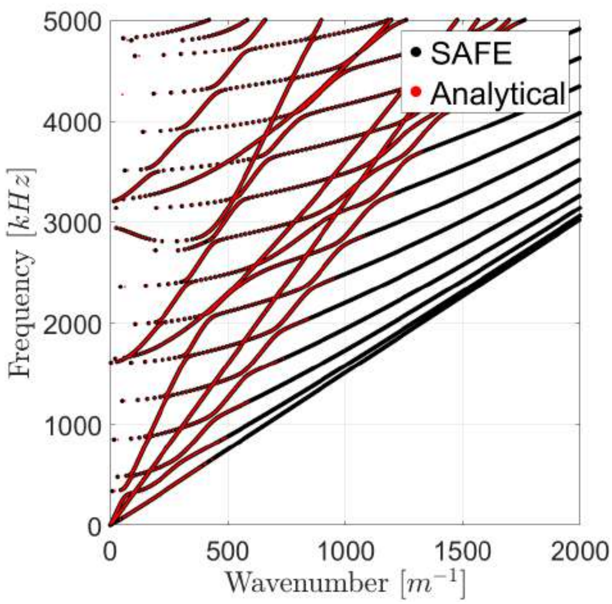


Figura 4.15: Resultado em número de onda de casos multicamadas modelo analítico para cilindros e com SAFE para cilindros para um cilindro de aço de 1 mm de espessura e um cilindro interno de água de 2 mm.

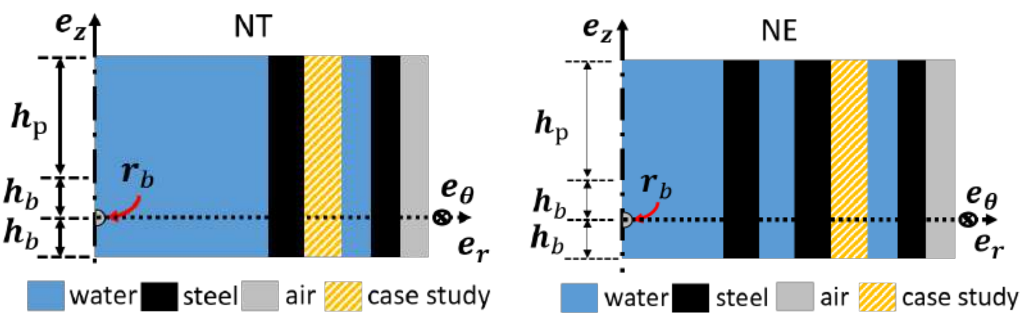
Na Seção 4.4 foi possível comparar os modelos SAFE de placas com modelos analíticos para cilindros e SAFE para cilindros com $rel = 0.999001$. Observou-se a coerência entre os resultados obtidos por Viola *et al.* [61] para um cilindro maciço para os quatro primeiros modos circunferenciais. Notou-se a dificuldade e custo computacional do modelo analítico para cilindros proposto por Correia [12] se comparado com o SAFE para cilindros. Portanto, através de todos os casos de validação expostos, considera-se que o modelo SAFE para cilindros foi validado, nos próximos capítulos será chamado apenas de SAFE. Para todos os casos de defeitos simulados a seguir pelo SAFE foram usados 30 elementos, para convergência em 50 kHz.

5
Modelagem através do Métodos de Elementos Finitos

Neste capítulo são apresentadas as simulações numéricas realizadas pelo método dos elementos finitos (FEM, do inglês *Finite Element Method*) para ajudar na análise dos resultados obtidos pelo SAFE para os casos listados no Capítulo 1.1. Os modelos FEM foram processados no *software* comercial COMSOL *Multiphysics* ®, versão 5.6. Os modelos utilizaram as físicas *Structural Mechanics* e *Pressure Acoustics*. Além disso, foi utilizada a formulação *plane-strain* e *solver* transiente implícito *generalized-α*, com o *time-step* fixo. Admitiu-se com base nos trabalhos de Viggen [23, 66], que os sinais analisados teriam uma banda em frequência f_{band} de 0 a 50 kHz; e os pontos de aquisição estariam condizentes com ferramentas de perfilagem acústica. As simulações foram divididas em dois grandes grupos, simulações 2D axissimétricas (2D-SIM), para casos concêntricos e Simulações 3D (3D-SIM), para casos excêntricos.

5.1
Modelo do Método de Elementos Finitos

As geometrias dos modelos 2D-SIM são mostradas na Figura 5.1.

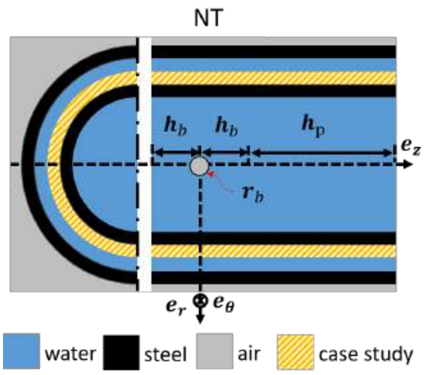


(a): Casos sem tubo de produção (NT) (b): Casos com tubo de produção (NE)

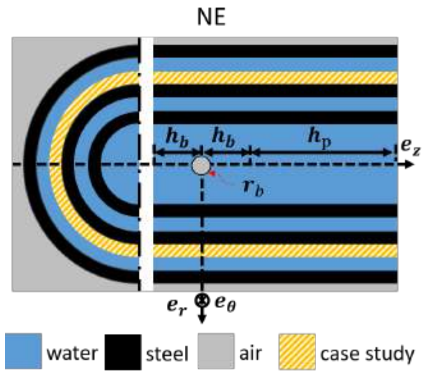
Figura 5.1: Representação esquemática dos modelos 2D-SIM NT e NE. (a) Casos sem tubo de produção (NT) e (b) Casos com tubo de produção (NE).

onde o raio r_b é o raio da fonte de pressão acústica, que gera a frente de onda de pressão acústica esférica de acordo com uma função imposta. A altura h_b é a distância do início do modelo à fonte de pressão acústica e também a distância da fonte de pressão acústica ao primeiro ponto de aquisição do modelo. A altura h_p é a distância entre o primeiro e o último ponto de aquisição do modelo. Além disso, são mostrados os materiais utilizados, sendo água (*water*), aço (*steel*), ar (*air*) e o estudo de caso (*case study*), que contemplam os casos comentados no Capítulo 1.1.

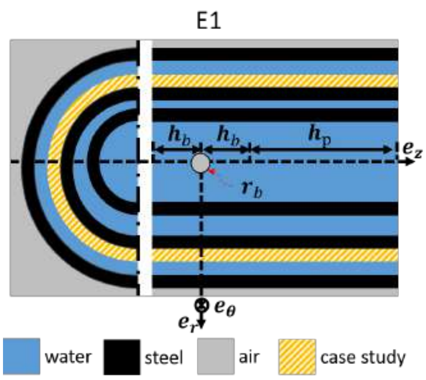
A geometria do modelo 3D-SIM é mostrada na Figura 5.2, onde apresenta uma vista do modelo superior e uma vista do modelo em corte para melhor entendimento.



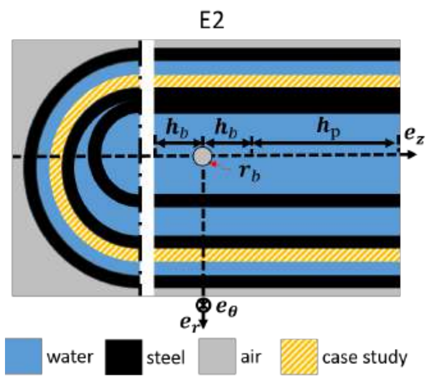
(a): Casos sem tubo de produção (NT)



(b): Casos com tubo de produção (NE)



(c): Casos com 48.79% de excentricidade (E1)



(d): Casos com 100% de excentricidade (E2)

Figura 5.2: Representação esquemática dos modelos 3D-SIM NT, NE, E1 e E2.

Observa-se que a posição da fonte de pressão acústica é sempre concêntrica à camada onde se encontra em todos os modelos. Para garantir a convergência da malha, foram consideradas algumas restrições. Os elementos foram configurados de tal forma que seu comprimento Δx esteja de acordo com Nandy [67], como apresentado

$$\Delta x \leq \frac{v_{\mathrm{L,T_{min}}}}{n_{elem} f_{\mathrm{band}}}, \tag{5-1}$$

onde $c_{\mathrm{L,T_{min}}}$ é a menor velocidade de corpo do modelo, no caso a velocidade de corpo longitudinal do fluido, considerada como 1500 m/s; e n_{elem} é a número inteiro usado na convergência de malha. Segundo Bartoli *et al.* [68], o valor geralmente escolhido para n_{elem} é 20. Portanto, para a resolução espacial obteve-se com $\Delta x = 1.5$ mm; já para a resolução temporal, foi utilizado o *time-step* Δt através de

$$\Delta t = \frac{1}{n_{elem} f_{\mathrm{band}}}, \tag{5-2}$$

Considerando a faixa de frequência das ferramentas descrita por Viggen [23], escolheu-se a máxima frequência como $f = 50$ kHz, portanto o incremento de tempo foi $\Delta t = 1.0$ μs.

Para geração das curvas de dispersão foram escolhidos 200 pontos no centro da geometria, mais precisamente, entre $h_b = 0.165$ m e $h_p = 2.17$ m, e com $r_b = 19$ mm. Nestes pontos, foram lidos os sinais de pressão acústica, os quais foram utilizados para obtenção do resultado no domínio frequência-número de onda. Para isso, utilizou-se a transformada bidimensional de Fourier.

5.2
Extração da Curva de Dispersão

Para a visualização dos modos que se propagam, utilizou-se a transformada de Fourier bidimensional (2DTF) dos sinais $p(z,t)$ dos resultados dos modelos, adquiridos em h_p, e com isto encontra-se $P(\omega,k)$, como apresentado

$$P(\omega,k) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} p(z,t) e^{-i(\omega t + kz)} dt dz, \tag{5-3}$$

onde t representa a variável de tempo e z o espaço positivo para cada posição vertical e $P(\omega,k)$ é $p(z,t)$ no domínio da frequência [69].

As curvas no plano $\omega - k$ obtdidas pela 2DFT são chamadas de curvas de dispersão e são associadas aos máximos em espectros de amplitude para os modos que se propagam. O Algoritmo 2 mostra o procedimento para obtenção das curvas de dispersão.

Algoritmo 2: Algoritmo FEM.

Entrada: Dimensões e propriedades dos materiais
Saída: Gráfico de número de onda, velocidade ou vagarosidade por Frequência

1 *Obter o sinal $p(z,t)$ através do modelo FEM;*
2 *Realizar a 2DTF para obter $P(\omega,k)$ e montar a curva de dispersão de número de onda por frequência;*
3 *dividir a curva de dispersão de número de onda por frequência em quatro quadrantes simétricos, sendo utilizado somente o quadrante com frequências e número de onda positivos;*
4 *Extrair a curva de dispersão de frequência por velocidade;*
5 *Extrair a curva de dispersão de frequência por vagarosidade.*

A Figura 5.3 ilustra o Algoritmo 2, com etapas numeradas de 1 a 5, para a extração das curvas de dispersão de número de onda, velocidade e vagarosidade por frequência através dos sinais obtidos no domínio do tempo.

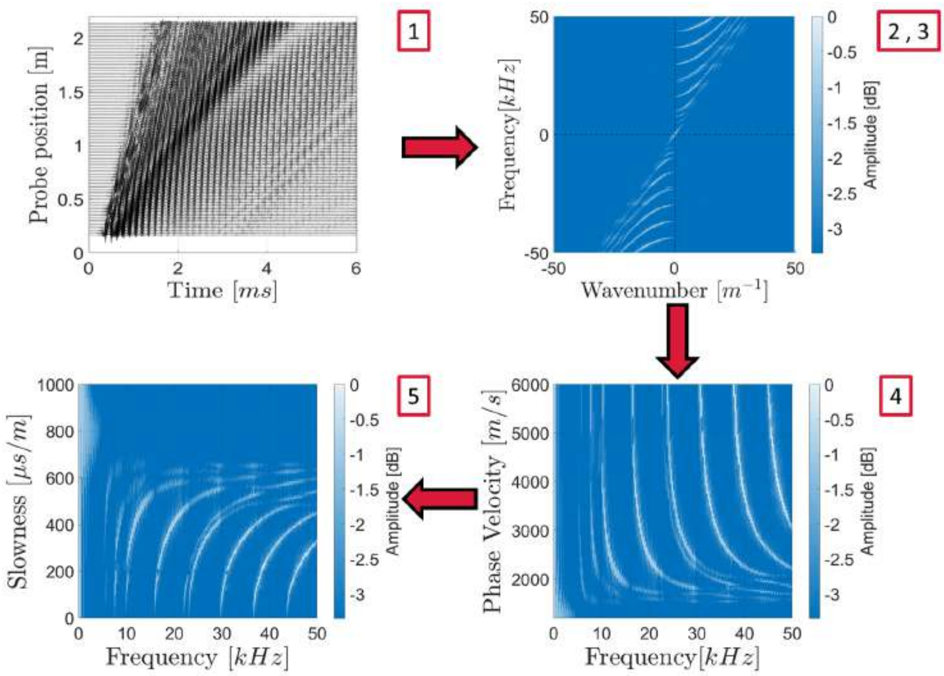


Figura 5.3: Visualização do algoritmo para a extração das curvas de dispersão de número de onda, velocidade e vagarosidade através dos sinais obtidos no domínio do tempo

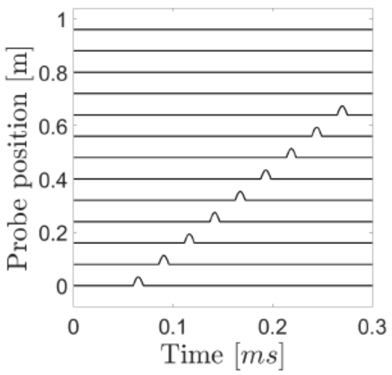
5.3 Curva de Coerência Vagarosidade-Tempo

A técnica de Coerência Vagarosidade-Tempo STC (em inglês, *Slowness-Time Coherence*), se baseia na correlação da energia das ondas captados por receptores em poços de petróleo [70]. as várias ondas que chegam nos receptores verticais são então convertidas em dados de vagarosidade para cada tempo de chegada. Segundo Kimball [71], uma desvantagem deste método é que a detecção da primeira chegada está sujeita a erros devido a ruídos e necessita de um algoritmo robusto. Entretanto, esta técnica consegue rapidamente distinguir, de forma visual, os tipos de ondas que se propagam, e o tempo de chegada de cada tipo de onda[70]. O STC pode ser utilizado para dois ou mais receptores verticais, cujos sinais são $p(z,t)$ e podem ser entendidos como a somatória de vários tipos de ondas e com diferentes vagarosidades[71]. O cálculo do STC pode ser entendido como um mapa de nível e cada nível é descrito através da função $ST(a_i,s_j)$ em uma escala de 0 a 1 [71], como

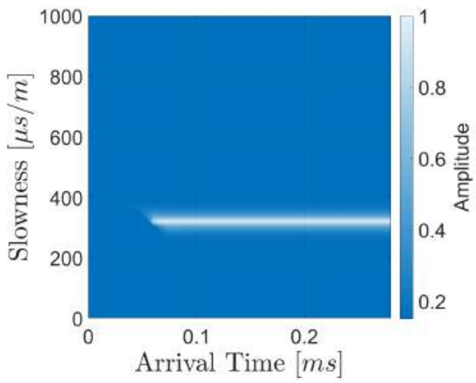
$$ST(a_i,s_j) = \frac{1}{W}\frac{\int_{t=a_i}^{t=a_i+T_w}\left[\sum_{w=1} p(t-a_i-s_j(z_w-z_1))\right]^2 dt}{\sum_{w=1}\int_{t=a_i}^{t=a_i+T_w}\left[p(t-a_i-s_j(z_w-z_1))\right]^2 dt} \tag{5-4}$$

sendo z_w a altura do receptor em relação ao primeiro receptor, w a posição do receptor, W o número total de receptores, t o tempo, a_i o tempo de chegada de cada onda, s_j a vagarosidade e por fim, T_w é a janela de análise da coerência.

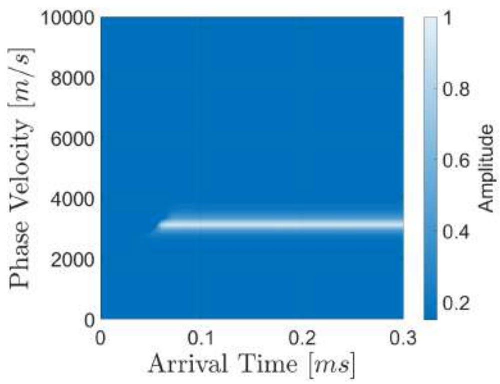
A Figura 5.4 exemplifica a extração da curva STC para uma onda com velocidade de 3200 m/s e frequência de 50 kHz. Na Figura 5.4 (a) é mostrado um sinal do domínio do tempo, na Figura 5.4 (b) é mostrada a curva STC relativa a Figura 5.4 (a), onde ilustra uma faixa, que simboliza a vagarosidade correspondente. Além disso, pode inverter cada valor de vagarosidade e encontrar a velocidade, que é mostrada na Figura 5.4 (c).



(a): Sinal no domínio do tempo



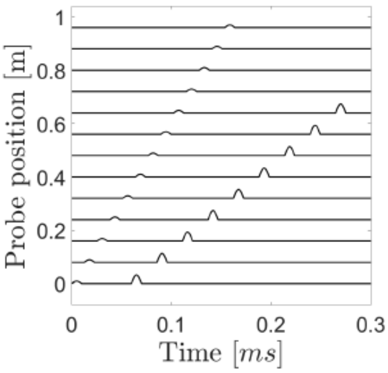
(b): curva STC de vagarosidade



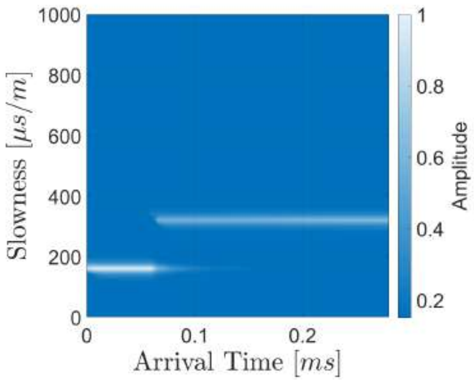
(c): curva STC de velocidade

Figura 5.4: Exemplificação da extração da curva STC de um sinal do tempo com uma onda com velocidade de 3200 m/s e frequência de 50 kHz.

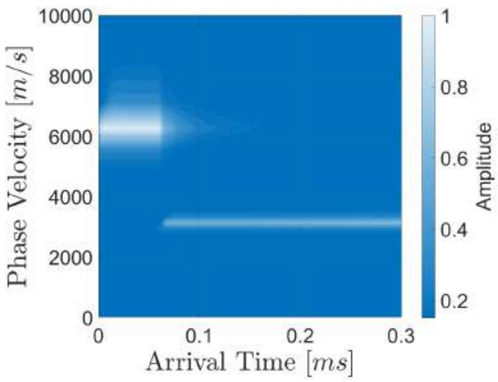
A Figura 5.5 exemplifica a extração da curva STC para duas ondas com velocidade de 5850 m/s 3200 m/s, respectivamente, e ambas com frequência de 50 kHz. Na Figura 5.5 (a) é mostrado um sinal do domínio do tempo, na Figura 5.5 (b) é mostrada a curva STC relativa à Figura 5.5 (a), onde ilustra uma faixa, que simboliza a vagarosidade correspondente. Além disso, pode inverter cada valor de vagarosidade e encontrar a velocidade, que é mostrada na Figura 5.5 (c).



(a): Sinal no domínio do tempo



(b): curva STC de vagarosidade



(c): curva STC de velocidade

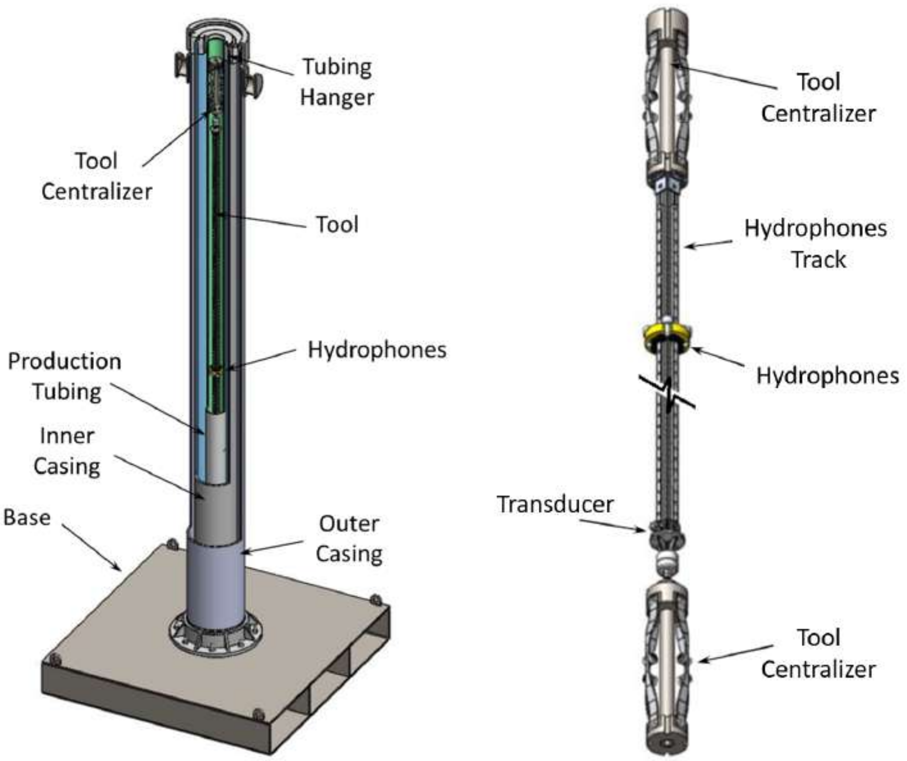
Figura 5.5: Exemplificação da extração da curva STC de um sinal do tempo com duas ondas com velocidade de 5850 m/s 3200 m/s, respectivamente, e ambas com frequência de 50 kHz.

Todos os códigos e simulações deste trabalho foram executados no computador DellEMC PowerEdge R840 com processador Intel Xeon Gold 6244 de 3,60 GHz e 2 TB de memória. O tempo computacional médio gasto para executar as simulações por elementos finitos para os casos concêntricos foi de 37 min e o para os casos excêntricos foi de 12 h.

Com base nos Capítulos 3 e 5, realizou-se a montagem de uma bancada experimental para validar experimentalmente os modelos FEM e SAFE, como mostrado no Capítulo 6.

6
Bancada Experimental

Nesta seção é feita a descrição da bancada experimental construída e o funcionamento dos experimentos. A bancada experimental é composta por três partes: Estrutura, Ferramenta e Controle. O desenho da bancada experimental é representada na Figura 6.1 (a), a Ferramenta é representada na Figura 6.1(b) e o sistema de Controle é apresentado na Figura 6.11.



(a): Estrutura e Ferramenta (b): Ferramenta

Figura 6.1: Bancada experimental de testes montada com a Estrutura e Ferramenta.

6.1
Estrutura

A parte nomeada Estrutura simula a configuração de um poço de petróleo real, a qual e subdivide-se em: base (*Base*), que tem dimensões 1.20x1.50x0.3 m em aço, cuja função é suportar os tubos; os tubos possuem comprimento de 4.20 m, sendo que dois tubos são definidos como as camadas de revestimento interno (*Inner Casing*) e externo (*Outer Casing*), um tubo de cimento que simula a camada de revestimento de cimento, um tubo definido como o tubo de produção (*Tubing*), por fim, o centralizador de tubos (*Tubing Hanger*), cuja função é centralizar os tubos e tem 0.2 m de altura.

O diâmetro externo do *Outer Casing* é 13 3/8″ e tem espessura de 10.925 mm, o diâmetro externo do *Inner Casing* é 9 5/8″ e tem espessura de 13.845 mm, por fim, o diâmetro externo do *Tubing* é 4 1/2″ e tem espessura de 6.9 mm. A bancada experimental permite alterar o valor de excentricidade através de um suporte localizado na base da estrutura, o qual possui sulcos para o encaixe do tubo de produção, assim permitindo um caso sem tubo de produção (NT), três casos com tubo de produção (NE, E1 e E2). Os níveis de excentricidade aplicáveis são: NE = 0 %, E1 = 48.79 % e E2 = 100 %, assim como discutido na Seção 1.1. A Figura 6.2 mostra os sulcos feitos na base para provocar a descentralização do *Tubing*.

(a): Suporte com sulcos para o tubo de produção, mostrando os três níveis de excêntricidade possíveis

(b): Montagem do suporte do tubo de produção com o tubo de produção

Figura 6.2: Suporte do tubo de produção da Bancada experimental.

6.2 Ferramenta

A parte da bancada experimental nomeada de Ferramenta é definida como o protótipo de uma ferramenta acústica desenvolvida para imitar as ferramentas comerciais acústicas. A Ferramenta fica alojada no interior da Estrutura e serve para excitar mecânicamente as camadas ao entorno e obter as formas de ondas acústicas nos hidrofones. A Ferramenta tem 3.345 m de comprimento e é composta por uma haste quadrada de 3x3x245 cm de alumínio (*Hydrophones Track*), na qual podem transladar, ao mesmo tempo, quatro hidrofones (*Hydrophones*) modelo BII-7005FG da Benthowave Instrument Inc.; além disso a Ferramenta conta com um transdutor ultrassônico, do tipo cerâmica piezoelétrica PZT 5A, em forma de disco, com 38 mm de diâmetro externo, 12.6 mm de diâmetro interno e 3.2 mm de espessura, nomeado de Transdutor (*Transducer*), que trabalha como a fonte de pressão acústica radial e por fim, dois centralizadores (*Tool Centralizer*) nos extremos da ferramenta que tem comprimento de 0.45 m e tem a função de centralizar a Ferramenta no *Tubing* para os casos NE, E1 e E2 ou centralizar a Ferramenta no *Inner Casing* para os casos NT.

6.2.1 Escolha do Transdutor e Hidrofones

Com o intuito de trabalhar com a mesma banda de frequência das ferramentas para perfilagem acústica e com uma fonte monopolar, escolheu-se, portanto, a banda de frequência de 0 a 50 kHz [23] e um transdutor em forma de anel e excitado por um gerador de funções (em inglês, *Waveform generator*) para produzir um campo de pressão monopolar, como ilustrado na Figura 6.3.

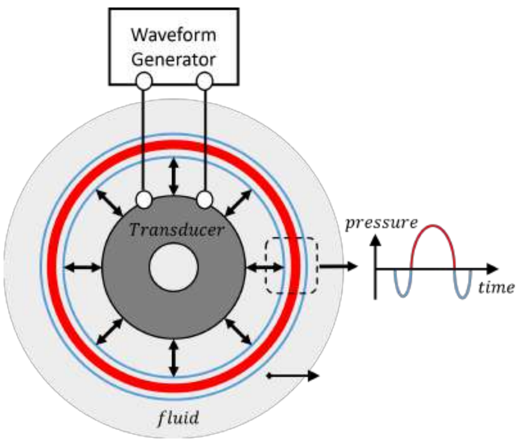


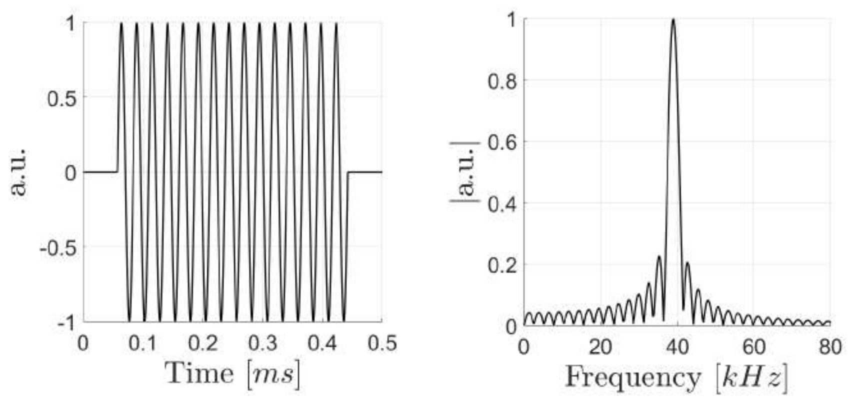
Figura 6.3: Transdutor em forma de anel, excitado por um gerador de funções para produzir um campo de pressão monopolar.

Dos transdutores disponíveis do tipo PZT 5A, selecionou-se cinco transdutores com frequências de ressonância nominais entre 30 e 50 kHz. Com os cinco transdutores selecionados, nomeados de T1, T2, T3, T4 e T6, foram feitos testes de amplitude do sinal, sendo os sinais foram colhidos a 5 cm da borda do transdutor, como mostrado nas Figuras 6.6 e 6.5. A Tabela 6.1 reporta as propriedades dos transdutores ensaiados, onde De é diâmetro externo, Di o diâmetro interno, h a espessura de cada transdutor e Dh é a relação $(De - Di)/h$.

Tabela 6.1: Propriedades utilizadas dos transdutores ensaiados.

Transdutor	De (mm)	Di (mm)	h (mm)	Dh $(-)$	Material	Frequência (kHz)
T1	23.8	14.0	2.4	4.08	PZT 5A	47.8
T2	24.0	14.0	2.4	4.17	PZT 5A	47.5
T3	25.0	12.4	2.0	6.30	PZT 5A	49.2
T4	25.2	12.8	6.4	1.94	PZT 5A	48.0
T6	38.0	12.6	3.2	7.94	PZT 5A	38.4

O sinal utilizado nos testes de amplitude para excitar os transdutores foi o $Tone - Burst$, nomeado de TB. O sinal TB é descrito no domínio do tempo como alguns ciclos de uma função senoidal e no domínio da frequência atua como uma banda estreita, cuja a frequência central é a frequência aplicada. A Figura 6.4 ilustra o sinal com a frequência de 38.4 kHz.



(a): Sinal no domínio do tempo (b): Sinal no domínio na frequência

Figura 6.4: Sinal utilizado nos experimentos de amplitude nos transdutores, $Tone - Burst$ de 38.4 kHz.

Com base na banda de frequência dos transdutores disponíveis, escolheu-se o hidrofone de modelo BII-7005FG da Benthowave Instrument Inc., cujas caracteríscas são mostradas na Tabela 6.2.

Tabela 6.2: Características dos hidrofones.

Faixa de frequência	1 a 350 kHz
Direção	omnidirecional
Ganho	0, 20, 40 e 60 dB

6.2.2 Teste dos Transdutores

O teste dos transdutores T1 a T6 se baseou em mergulhar em um tanque com água o hidrofone e o transdutor ensaiado, sendo espaçados a ponta do hidrofone e a borda externa do transdutor em 5 cm. Em seguida aplicou-se no transdutor o sinal de tensão elétrica de excitação TB na frequência de ressonância do transdutor, através do Gerador de Funções Arbitrárias AFG3022C da Tektronix e um amplificador de potência linear Krohn Hite 7500, leu-se então a resposta no hidrofone. Para a leitura dos sinais de resposta do hidrofone, foi utilizado um computador pessoal (PC) acoplado com os módulos de aquisição digital de sinais elétricos (DAQ) cDAQNI9185, NI9222 e NI9223 da *National Instruments* ®, sendo esse conjunto de módulos nomeados de NIK. O NIK foi configurado para a taxa de amostragem de 500 kS/s por canal e com conversão simultânea analógico-digital. O esquemático dos testes dos transdutores é mostrado na Figura 6.5 e a montagem do ensaio dos transdutores é mostrada na Figura 6.6.

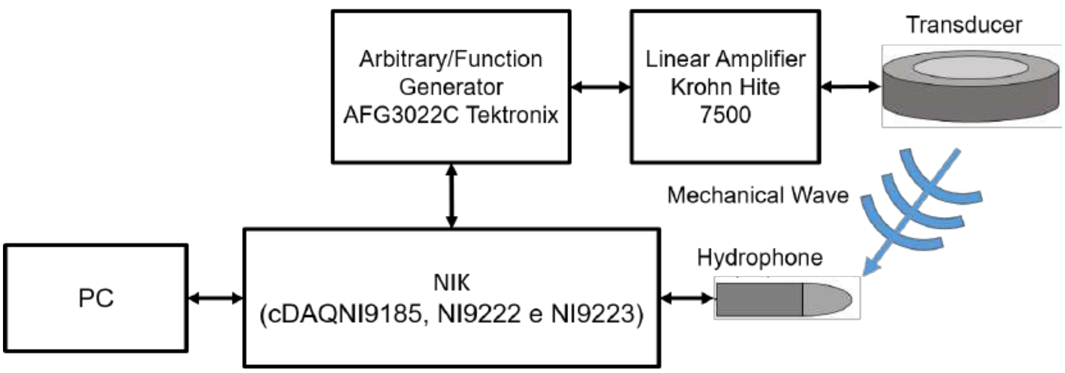


Figura 6.5: Esquemático dos testes nos transdutores.

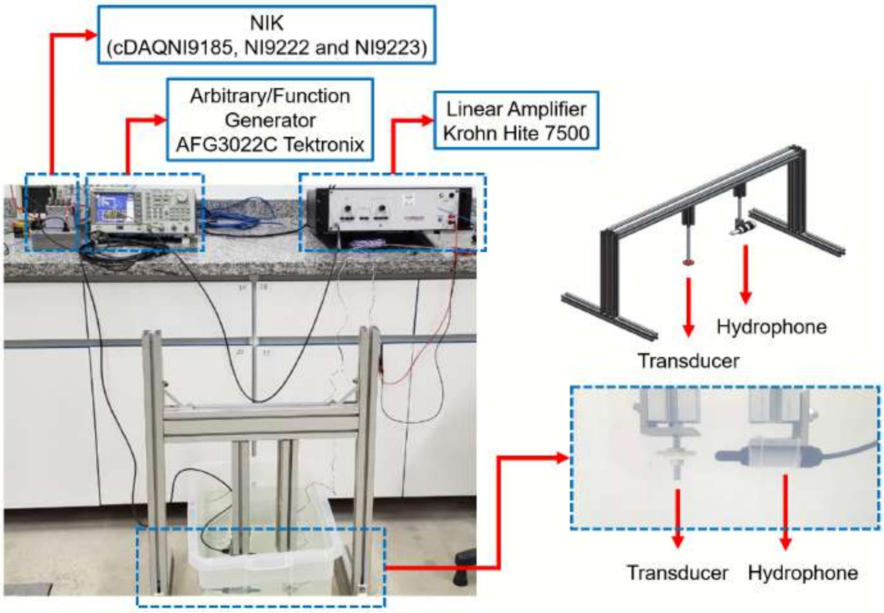
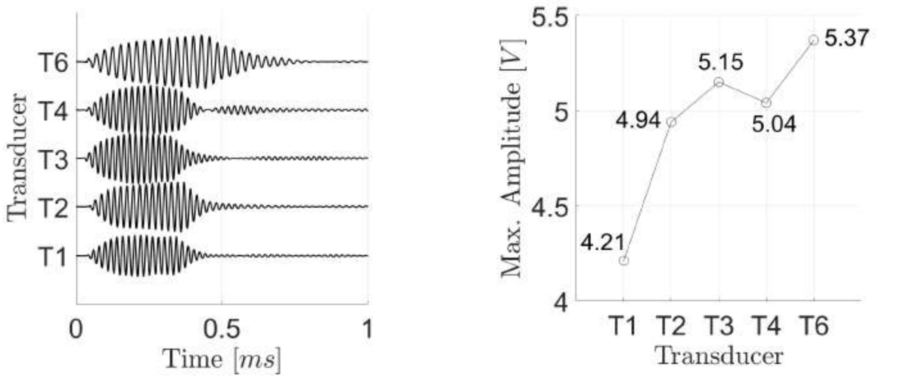


Figura 6.6: Montagem dos testes nos transdutores.

O resultado do teste de amplitude revelou que o transdutor T6 teve maior amplitude, como mostrado na Figura 6.7 (b), por isso, escolheu-se o T6 para os testes na bancada experimental.

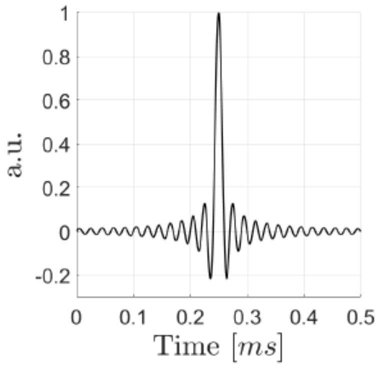


(a): Sinais dos transdutores no domínio do tempo

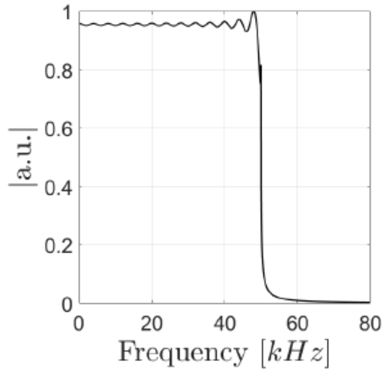
(b): Máxima amplitude por transdutor

Figura 6.7: Resultado dos testes dos testes com os transdutores T1, T2, T3, T4 e T6.

Para visualizar a resposta do transdutor T6 no domínio da frequência, realizou-se outro teste, que baseou-se em fixar o transdutor T6 na montagem mostrada na Figura 6.6 e colher o sinal com o hidrofone, em 67 posições diferentes e equidistantes de 1 cm, para extrair a curva de dispersão. O sinal utilizado nos testes foi o sinc de 50 kHz. O sinal sinc é descrito no domínio do tempo como $sinc(x) = sen(x)/x$ e no domínio da frequência atua como um filtro passa-baixas, cuja frequência de corte é a frequência aplicada [69], ilustrado na Figura 6.8.



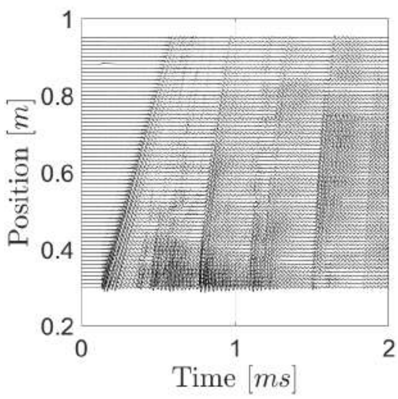
(a): Sinal sinc mostrado no domínio do tempo



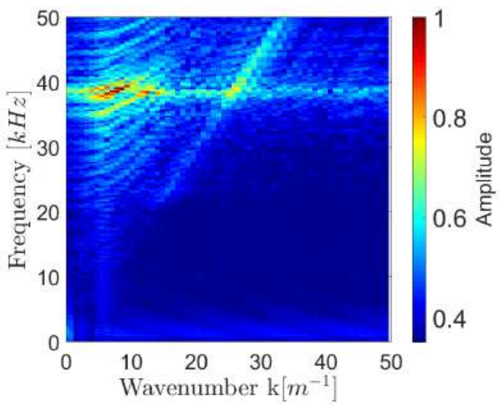
(b): Sinal sinc mostrado no domínio da frequência

Figura 6.8: Sinal utilizado nos experimentos para a curva de dispersão do transdutor T6.

A curva do transdutor T6 no domínio do tempo para cada posição é mostrada na Figura 6.9 (a), a curva de dispersão normalizada do transdutor T6 é mostrado na Figura 6.9 (b). Como esperado, nota-se na Figura (b) que há uma maior quantidade de energia em torno de 38.4 kHz, que é a frequência natural do transdutor.



(a): Sinal do transdutor T6, sinc de 50 kHz, mostrado no domínio do tempo para cada posição do hidrofone



(b): Sinal do transdutor T6 mostrado no domínio da frequência normalizado entre 0 e 1

Figura 6.9: Ensaio do transdutor T6.

6.3 Controle

O Controle, mostrado na Figura 6.10, reúne o controle da excitação, que cria um sinal de tensão elétrica com o gerador de forma de onda agilent 33120A (*Waveform Generator Agilent 33120A*), depois amplifica o sinal com o amplificador de potência Krohn Hite 7500 (*Linear Amplifier Krohn Hite 7500*), ajustado para amplificação de dez vezes, e depois aplica este sinal no transdutor T6 (*Transducer*). A etapa de amplificação é necessária para que as ondas cheguem nos transdutores nas posições mais distantes estejam em um nível de tensão razoável e nas posições perto da fonte os sinais não fiquem saturados. Além disso, o Controle lê os sinais dos hidrofones com ganho em 20 dB com auxílio dos módulos de aquisição digital de sinais cDAQNI9185, NI9222 e NI9223 da *NationalInstruments®* (NIK), sendo os hidrofones alimentados com uma fonte simétrica de 9 V em corrente contínua, KEITHLEY 2220G-30-1 (*Hydrophones Power Supply*). A movimentação dos quatro hidrofones é feita através de um motor de passo Nema 17 42HS40 (*Motor*) ligado ao suporte dos hidrofones, alimentado por uma fonte de 12 V chaveada (*Motor Power Supply*) e controlado pelo módulo controlador de passos (*Motor Controller*), que consiste em um driver TB6600 administrado por um circuito microcontrolado.

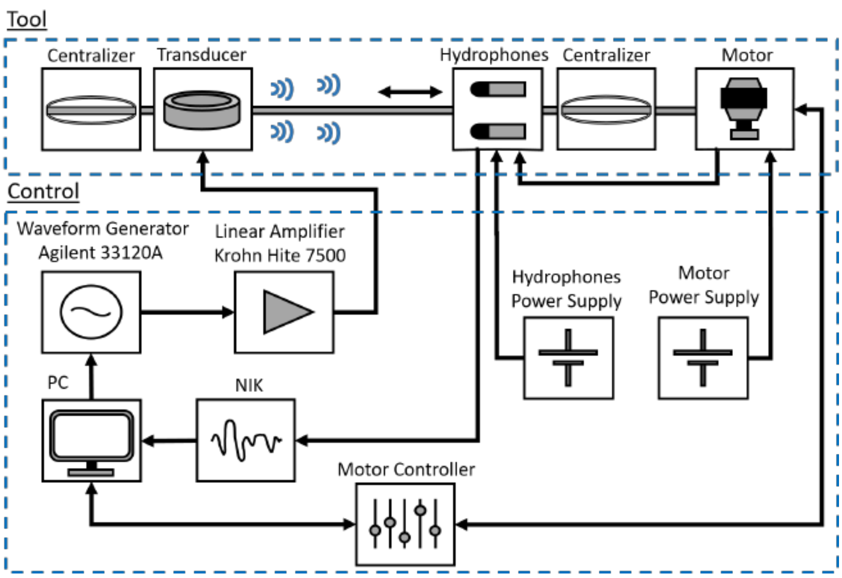
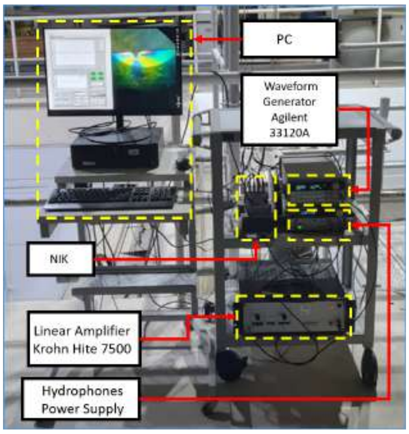
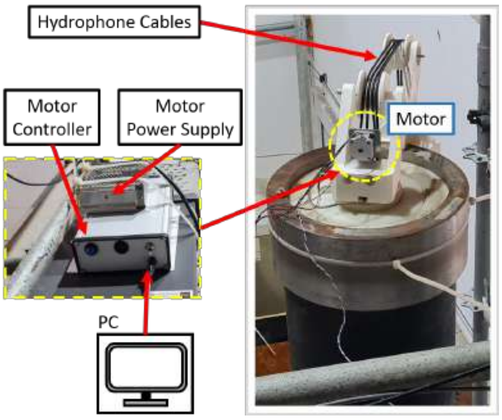


Figura 6.10: Esquemático do sistema de controle, responsável pela excitação do Transdutor e controle da posição dos hidrofones

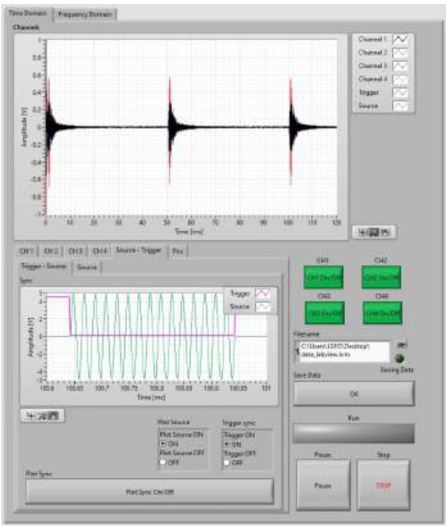
As Figuras 6.11 (a) e (b) mostram os equipamentos que compõem o Controle. Para controlar a excitação do transdutor, a movimentação dos hidrofones e ler os sinais elétricos obtidos dos hidrofones em cada posição do curso da ferramenta, foi criado um código em *LabView®* para atuar como interface gráfica na realização dos experimentos, como mostrado nas Figuras 6.11 (c) e (d). O código contabiliza a média de três períodos de 6 ms para cada posição, com o auxilio de um sinal adicional enviado ao NIK, nomeado de *trigger*, o qual contabiliza o ínicio da excitação do transdutor, como visto na Figura 6.11 (c). A Figura 6.11 (d) mostra o espectro de frequências obtidas nos hidrofones.



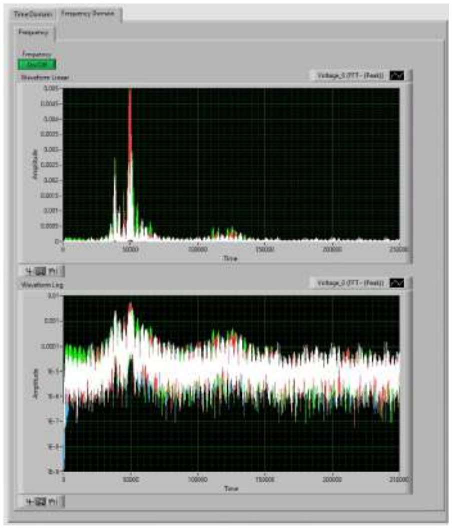
(a): Equipamentos utilizados na excitação do Transdutor e controle de posição dos hidrofones



(b): Equipamentos utilizados na movimentação vertical dos hidrofones



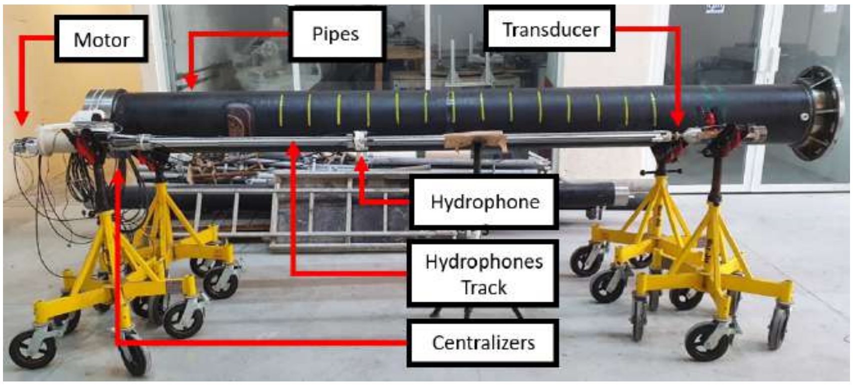
(c): Interface gráfica mostrando os sinais obtidos através dos hidrofones no domínio do tempo



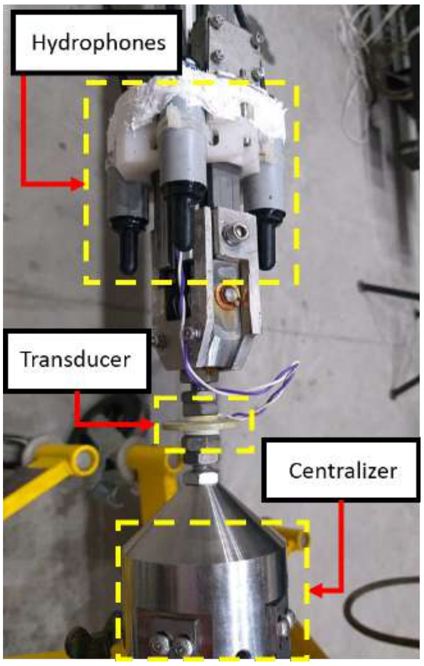
(d): Interface gráfica mostrando os sinais obtidos através dos hidrofones no domínio da frequência

Figura 6.11: Controle dos ensaios da bancada de experimental através do controle do *hardware*, mostrado nas Figuras 6.11 (a) e (b), através do *software* mostrado nas Figuras 6.11.

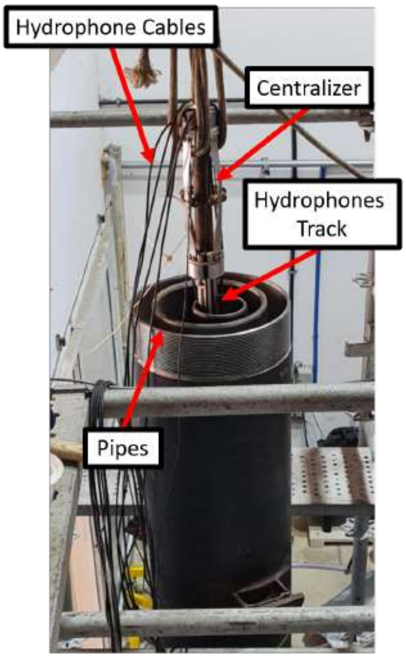
A Figura 6.12 (a) mostra os tubos da Bancada Experimental usinados e montados e também mostra a Ferramenta e seus componentes fabricados e montados. A Figura 6.12 (b) mostra em detalhe a montagem do Transdutor e dos hidrofones, além disso mostra que os hidrofones são igualmente espaçados em 90° entre si, e podem se movimentar em até 6000 posições ao longo da altura da ferramenta, desde 166 mm até 2171 mm, a partir da face superior do transdutor. A Figura 6.12 (c) mostra o içamento da Ferramenta para ajustes nos cabos dos hidrofones e tubos da bancada experimental.



(a): Estrutura



(b): Protótipo da Ferramenta Acústica



(c): Sistema de excitação e controle

Figura 6.12: Bancada Experimental.

6.4 Propriedades dos Materiais Utilizados nos Experimentos

Os materiais utilizados nos testes com a bancada experimental tiveram suas propriedades medidas para melhor entendimento do comportamento dos testes e resultados.

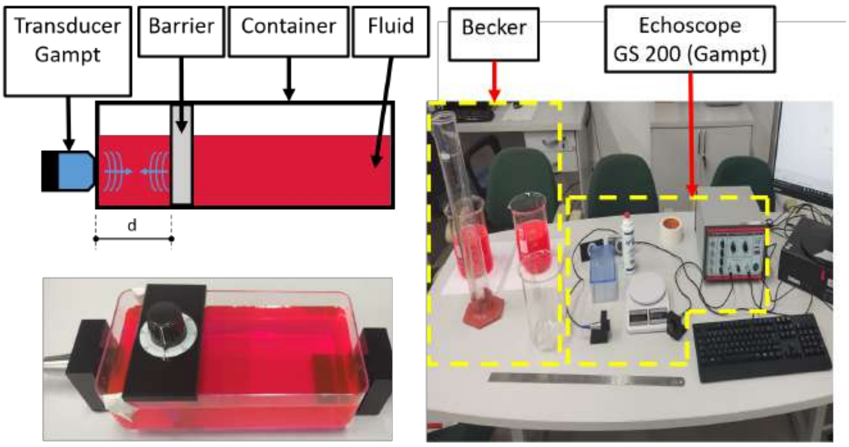
6.4.1 Fluido

A fim de evitar a degradação por corrosão dos componentes metálicos utilizados na Bancada Experimental, optou-se por substituir a água utilizada nos experimentos por uma mistura de água e fluido anticorrosivo. Realizou-se o experimento de pulso-eco para os seguintes fluidos: água, anticorrosivo e mistura de 60 % de água e 40 % de anticorrosivo, nomeado de mistura por praticidade. Logo, foi necessário realizar experimentos para determinar as propriedades da mistura do fluido, como a velocidade de corpo longitudinal e densidade.

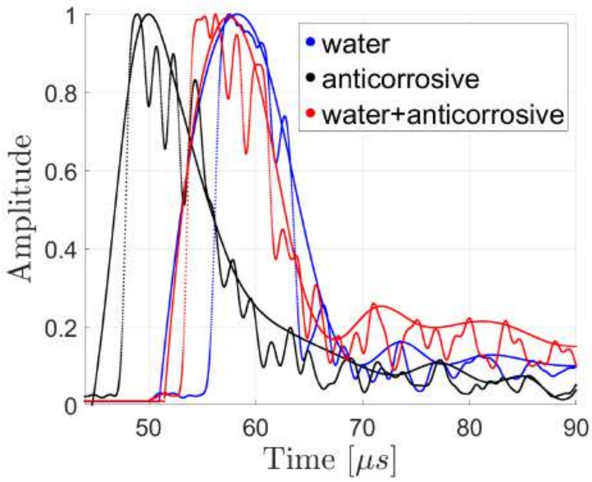
Os experimentos para a velocidade de fase consistiram na técnica de pulso-eco [72], onde um transdutor, do conjunto Echoscope Gampt mbH®, emite uma onda acústica e lê-se os ecos recebidos no mesmo transdutor, após isto aplica-se uma envoltória no sinal e contabiliza-se os ecos devido a uma barreira de metal submersa, a uma distância $d = 43.59$ mm do transdutor, como mostrado na Figura (a), e pode-se encontrar a velocidade longitudinal para cada fluido v_L seguindo a Equação

$$v = 2d/\Delta t, \tag{6-1}$$

onde o dobro da distância do transdutor à parede d é dividido pela diferença entre os tempos dos ecos Δt. Para medir a densidade dos fluidos, dividiu-se o um volume conhecido, obtido através de um becker de vidro, e depois pesou-se com uma balança digital.



(a): Esquemático dos experimentos pulso-eco e equipamentos e materiais



(b): Resultados dos experimentos pulso-eco

Figura 6.13: Experimentos de pulso-eco para encontrar a velocidade do fluido.

Os resultados dos experimentos realizados nos fluidos ensaiados, através da Figura 6.13 (c), é reportado na Tabela 6.3, sendo adotado para os experimentos a mistura de 60 % de água e 40 % de anticorrosivo, material nomeado de fluido por comodidade.

Tabela 6.3: Propriedades dos fluidos ensaiados.

	Água	Anticorrosívo	Mistura
v_L (m/s)	1495	1744	1515
ρ (kg/m^3)	988	1120	1049

6.4.2 Cimento

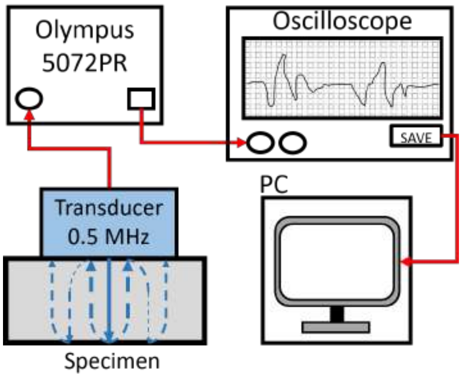
O cimento utilizado nos testes foi o SikaGrout 215, portanto foi necessário realizar testes para encontrar as propriedades do material, velocidade de fase longitudinal, velocidade de fase transversal e densidade. Para realizar os testes foi feito um corpo de prova de cimento em formato cilíndrico, que possui raio de 28.92 mm e altura de 24.0 mm. Os experimentos para a velocidade de fase consistiram na técnica de pulso-eco [72], onde um transdutor de 0.5 MHz emite uma onda acústica e colhe-se o tempo da envoltória do sinal de dois sucessivos ecos, como mostrado na Figura 6.14 (a). Utilizou-se o conjunto Pulser-Receiver 5072PR OLympus®, um osciloscópio e um PC para realizar os ensaios de pulso-eco. Para medir a densidade do corpo de prova de cimento, dividiu-se o um volume conhecido, obtido através de medições com paquímetro, e depois pesou-se o corpo de prova com uma balança de precisão, como mostrado na Figura 6.14 (b). Na Figura 6.14 (c) é mostrado a envoltória dos sinais obtidos.

Estimou-se a velocidade de corpo transversal através da relação das velocidades longitudinal e transversal do cimento com base no trabalho de Wang [73], sendo a relação $\alpha^{Wang} = v_T^{Wang}/v_L^{Wang}$, com velocidade longitudinal $v_L^{Wang} = 4000\ m/s$, velocidade transversal $v_T^{Wang} = 2100\ m/s$ e portanto $\alpha^{Wang} = 0.525$. A velocidade transversal do cimento $v_T^{cimento}$ é portanto estimada como $v_T^{cimento} = v_L^{cimento}\alpha^{Wang}$, sendo $v_L^{cimento}$ encontrada com o experimento pulso-eco e é igual $v_L^{cimento} = 3779\ m/s$. Assim, a velocidade transversal do cimento é igual $v_T^{cimento} = 1984\ m/s$. O resumo dos experimentos realizados no corpo de prova de cimento é mostrado na Tabela 6.4.

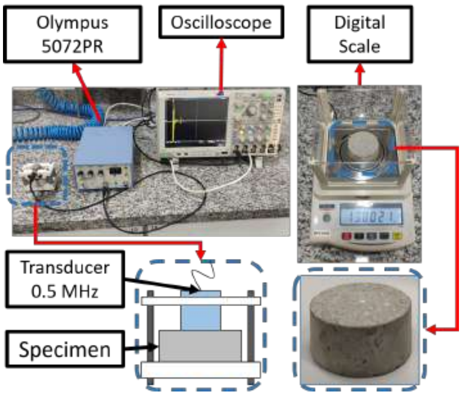
Tabela 6.4: Propriedades corpo de prova de cimento.

v_L (m/s)	3779
v_T (m/s)	1984
ρ (kg/m^3)	2189

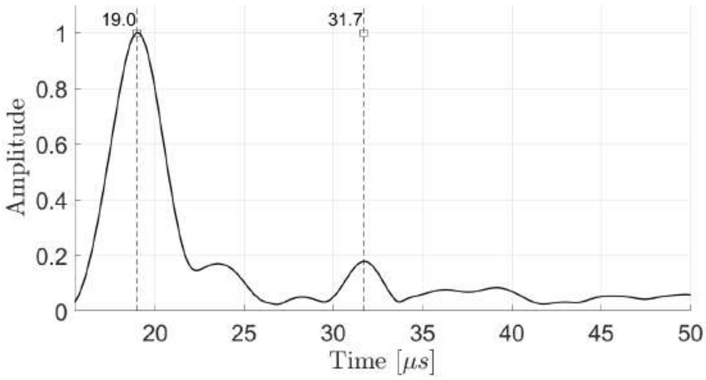
As propriedades das ligas de aço utilizadas nos tubos de revestimento e tubo de produção, material nomeado de aço por praticidade, foram obtidas pelo fornecedor e são apresentadas na Tabela 6.5, cujas propriedades são próximas das encontradas por Wang [73].



(a): Esquemático dos experimentos pulso-eco



(b): Montagem do esquemático para os experimentos



(c): Resultados dos experimentos pulso-eco

Figura 6.14: Experimentos de pulso-eco para encontrar a velocidade do corpo de prova de cimento.

6.5
Resumo dos Dados Experimentais

As dimensões utilizadas, propriedades medidas, apresentadas com um *, propriedades estimadas, apresentadas com $^\#$, e propriedades encontradas neste capítulo são condensadas na Tabela 6.5, onde constam os nomes das camadas, os diâmetros externos D, as espessuras *th*, o material, sendo LQ a abreviação para o cimento com baixa impedância acústica, densidade ρ, velocidade de corpo longitudinal v_L e velocidade de corpo transversal v_T.

Tabela 6.5: Propriedades acústicas e mecânicas dos materiais.

Camada	D (in)	th (mm)	Material	ρ (kg/m^3)	v_L (m/s)	v_T (m/s)
Tubing	4 1/2″	13.80	Steel	7850	5850	3200
Inner Casing	9 5/8″	27.69	Steel	7850	5850	3200
Fluid Layer	12 33/64″	73.40	Water*	1049	1515	-
Outer Casing	13 3/8″	21.85	Steel	7850	5850	3200
			Cement#	2189	3779	2067
Cement Layer	12 33/64″	73.40	Cement# LQ	1710	1950	1067

No Capítulo 7, são mostrados os casos utilizados como validação dos modelos SAFE, os resultados dos modelos FEM com os resultados dos modelos SAFE sobrepostos e, por fim, os resultados experimentais com os resultados dos modelos SAFE sobrepostos.

7
Resultados

Neste capitulo são mostrados os resultados das curvas de dispersão FEM com SAFE sobrepostos e os resultados experimentais com SAFE sobrepostos; além disso, são mostrados também os resultados das curvas STC dos resultados FEM e experimentais. O procedimento para obtenção das curvas de dispersão e SAFE é mostrado na Figura 7.1.

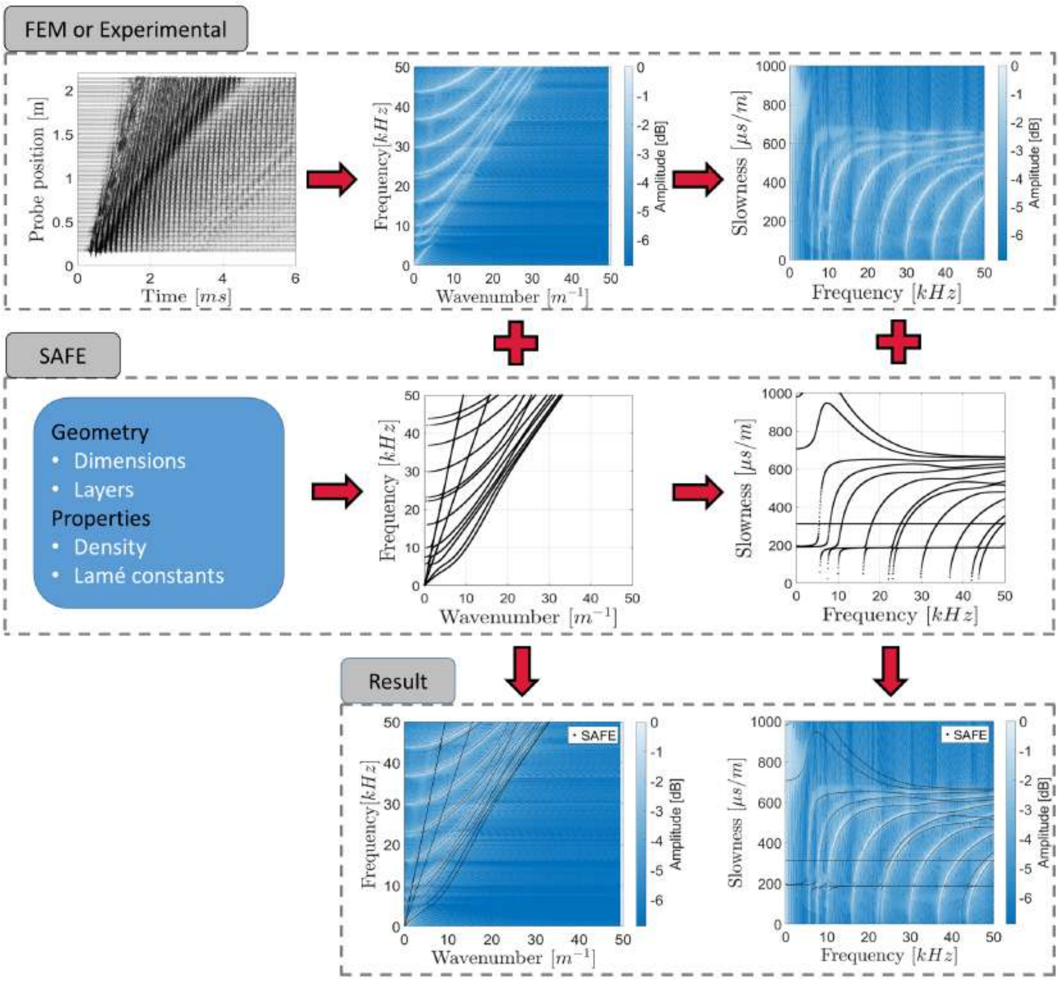


Figura 7.1: Procedimento para a extração dos resultados FEM e SAFE sobrepostos e resultados experimental e SAFE sobrepostos

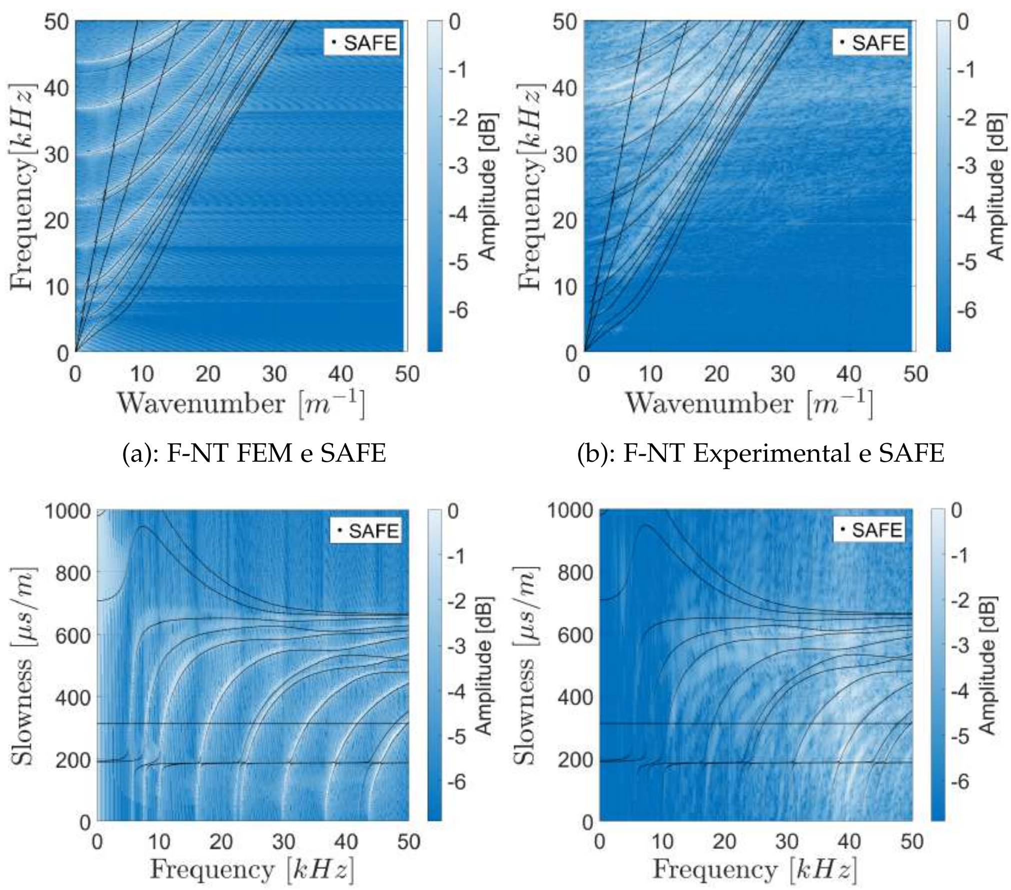
Ressalta-se que não foi realizado um modelo SAFE excêntrico, nos casos com excentricidade foram sobrepostas as curvas SAFE concêntricas para verificar quais modos são mais afetados pela excentricidade. Para fins de brevidade, os resultados dos modelos FEM são mostrados no Apêndice A, os resultados experimentais são mostrados no Apêndice B, os resultados FEM com SAFE sobreposto são mostrados no Apêndice C, e os resultados experimentais com SAFE sobreposto são mostrados no Apêndice D.

7.1 Comparação Resultados FEM, Experimental e SAFE

Nesta seção são comparados os resultados FEM, experimental e SAFE. Todos os casos seguem a seguinte ordem, figuras (a) e (c) são FEM e figuras (b) e (d) são experimentais, ambas com SAFE sobreposto.

7.1.1 Caso F-NT

Nesta subseção são apresentados os resultados do caso F-NT.



(a): F-NT FEM e SAFE

(b): F-NT Experimental e SAFE

(c): F-NT FEM e SAFE

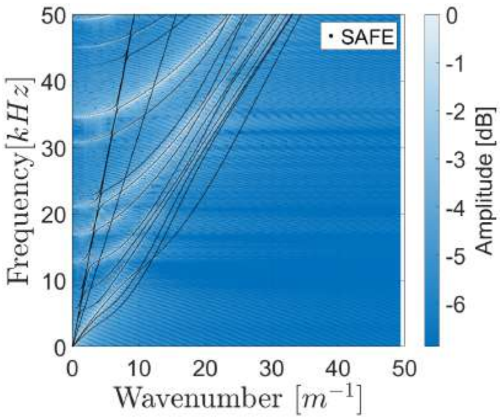
(d): F-NT Experimental e SAFE

Figura 7.2: Resultado do modelo FEM, Experimento e SAFE no domínio da frequência, caso F-NT

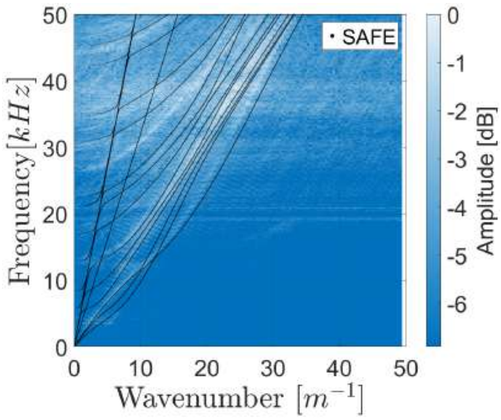
Observa-se na Figura 7.2 do caso F-NT que, há uma boa concordância entre os resultados FEM e Experimental, entretanto aparece um modo adicional próximo a frequência natural do transdutor piezoelétrico, de 39 kHz. Os resultados FEM e Experimental quando comparados com o resultado SAFE não apresentam os dois primeiros modos, fato que é melhor visualizado nos gráficos de vagarosidade entre 700 e 1000 μs/m.

7.1.2
Caso F-NE

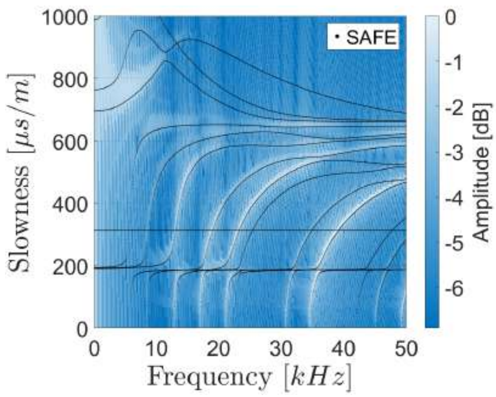
Nesta subseção são apresentados os resultados do caso F-NE.



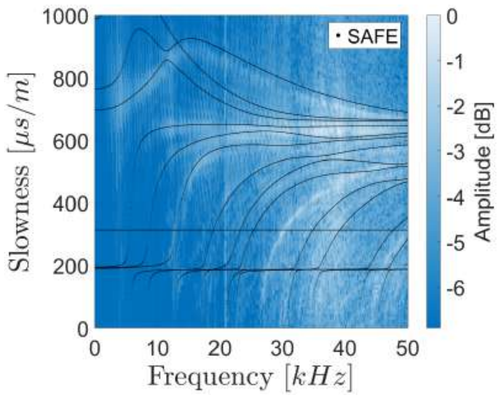
(a): F-NE FEM e SAFE



(b): F-NE Experimental e SAFE



(c): F-NE FEM e SAFE



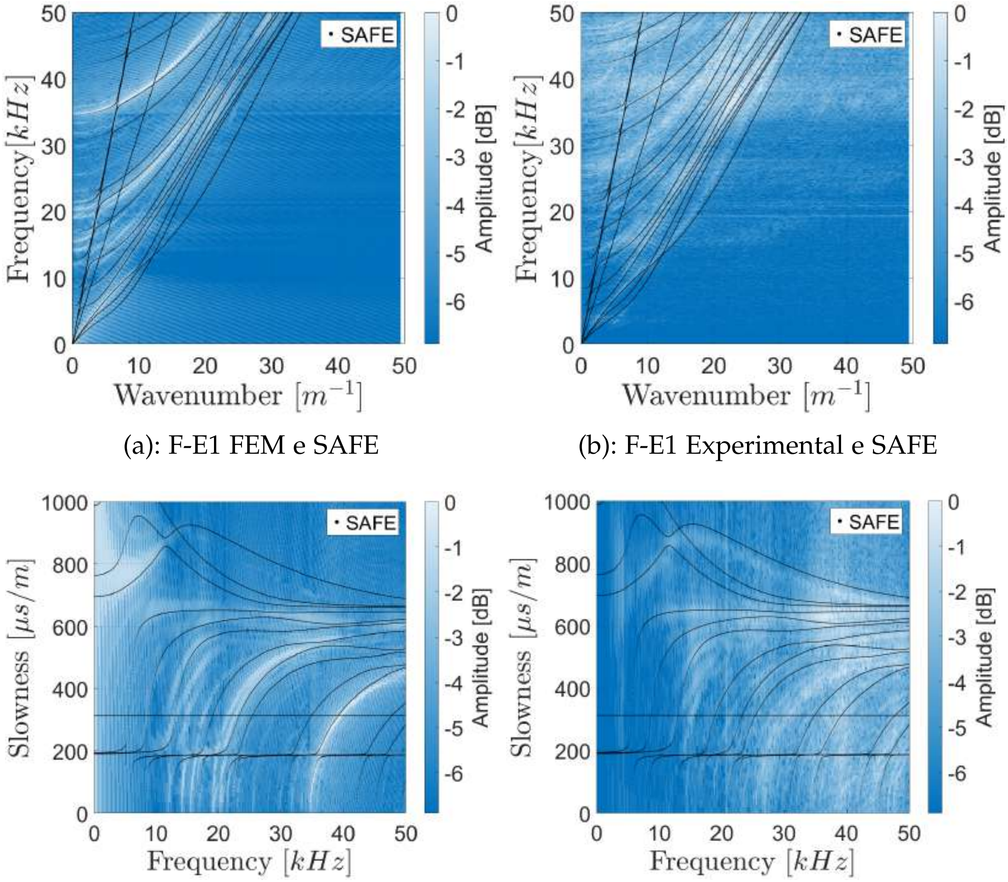
(d): F-NE Experimental e SAFE

Figura 7.3: Resultado do modelo FEM, Experimento e SAFE no domínio da frequência, caso F-NE

Observa-se na Figura 7.3 do caso F-NE que, há uma boa concordância entre os resultados FEM e Experimental de 0 a 25 kHz e vagarosidades maiores que 200 μs/m, após 25 kHz aparece um modo adicional não contemplado nos modelos FEM e SAFE. Se comparadas as Figuras 7.2 e 7.3, nota-se que a Figura 7.3 apresenta menos modos e para o resultado experimental 25 kHz fica difícil distinguir os modos.

7.1.3 Caso F-E1

Nesta subseção são apresentados os resultados do caso F-E1.



(a): F-E1 FEM e SAFE

(b): F-E1 Experimental e SAFE

(c): F-E1 FEM e SAFE

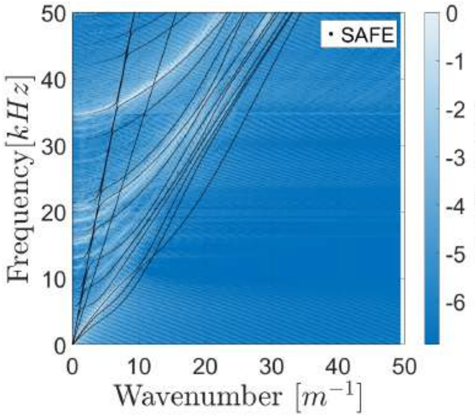
(d): F-E1 Experimental e SAFE

Figura 7.4: Resultado do modelo FEM, Experimento e SAFE no domínio da frequência, caso F-E1

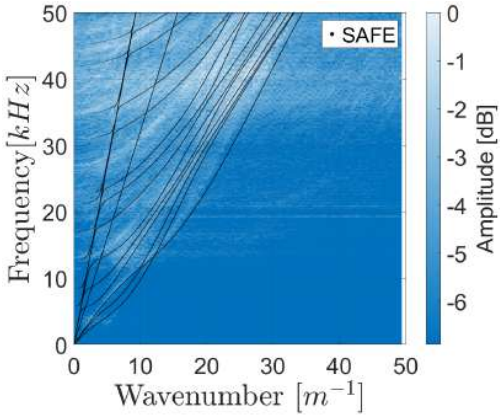
Observa-se na Figura 7.4 do caso F-E1 que, no modelo FEM há um deslocamento nos modos para vagarosidades menores que 700 μs/m. No resultado experimental, após a frequência de 25 kHz aparece um modo adicional não contemplado nos modelos FEM e SAFE. Se comparadas as Figuras 7.3 e 7.4 do resultado experimental de vagarosidade, nota-se uma leve alteração nos modos entre 10 a 20 kHz e acima de 25 kHz fica difícil distinguir os modos devido a baixa amplitude dos sinais e ruído recebido nos hidrofones.

7.1.4 Caso F-E2

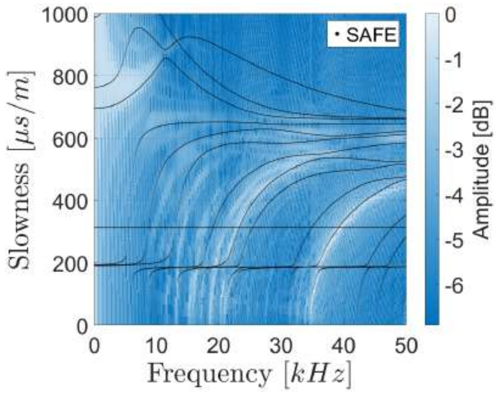
Nesta subseção são apresentados os resultados do caso F-E2.



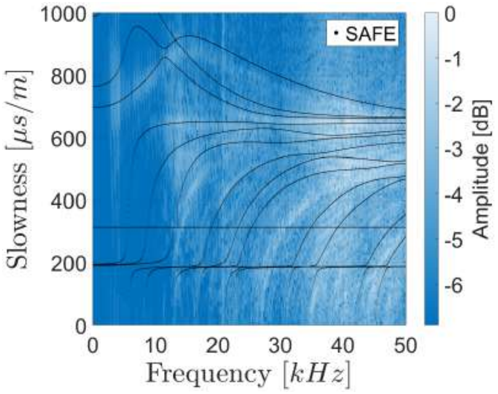
(a): F-E2 FEM e SAFE



(b): F-E2 Experimental e SAFE



(c): F-E2 FEM e SAFE



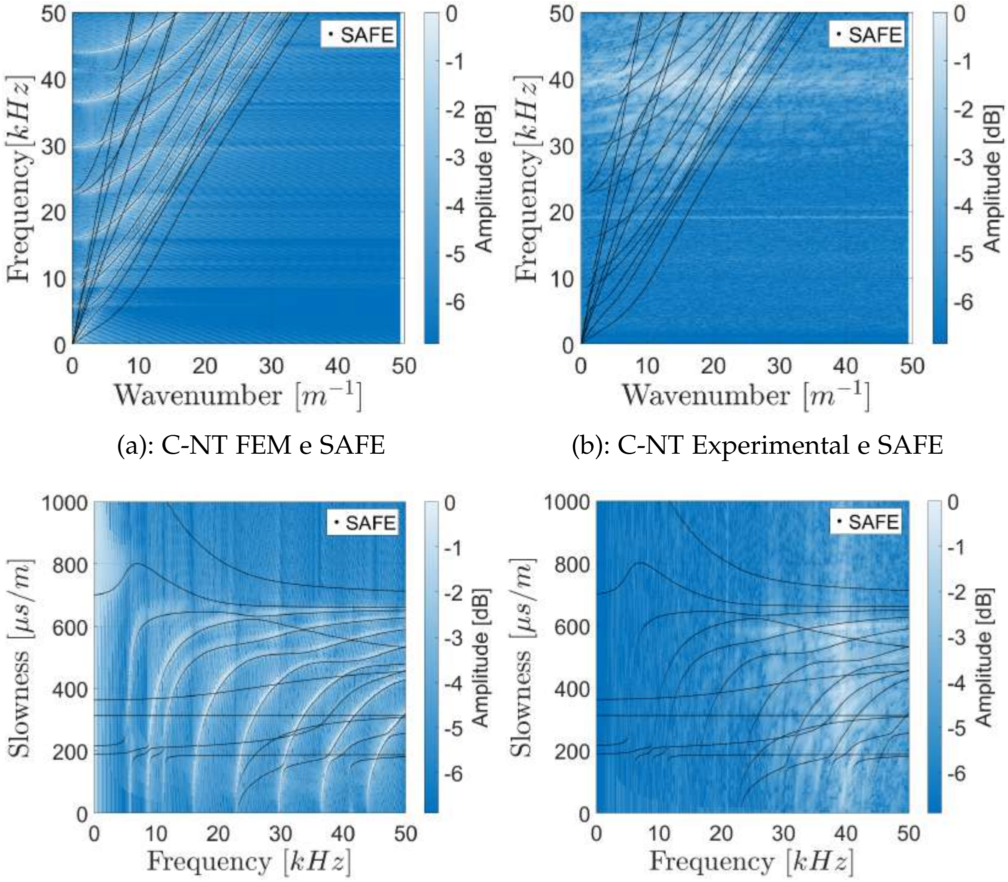
(d): F-E2 Experimental e SAFE

Figura 7.5: Resultado do modelo FEM, Experimento e SAFE no domínio da frequência, caso F-E2

Observa-se na Figura 7.5 do caso F-E2 que, no modelo FEM há um deslocamento nos modos para vagarosidades menores que 700 μs/m. No resultado experimental, após a frequência de 25 kHz aparece um modo adicional não contemplado nos modelos FEM e SAFE. Se comparadas as Figuras 7.3 e 7.5 do resultado experimental de vagarosidade, nota-se uma mudança nos modos entre a faixa de frequência de 0 a 10 kHz; e acima de 25 KHz fica difícil distinguir os modos devido devido à baixa amplitude dos sinais e ruído recebido nos hidrofones.

7.1.5
Caso C-NT

Nesta subseção são apresentados os resultados do caso C-NT.



(a): C-NT FEM e SAFE

(b): C-NT Experimental e SAFE

(c): C-NT FEM e SAFE

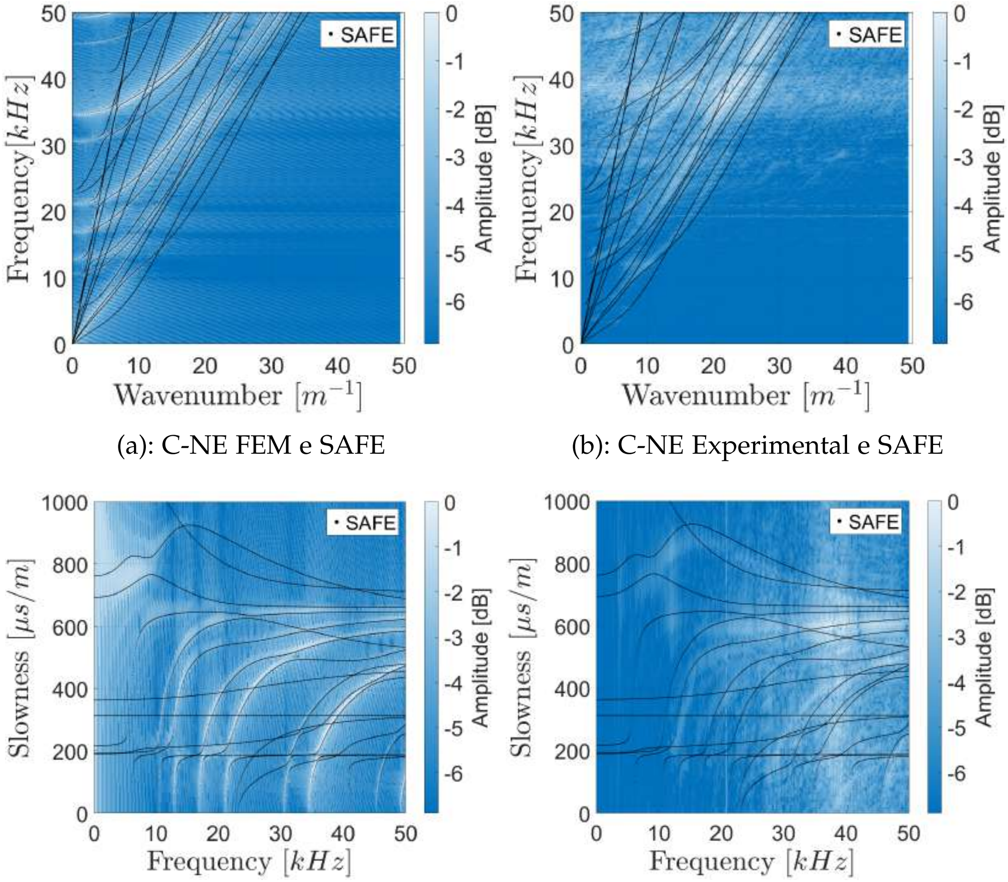
(d): C-NT Experimental e SAFE

Figura 7.6: Resultado do modelo FEM, Experimento e SAFE no domínio da frequência, caso C-NT

Observa-se na Figura 7.6 do caso C-NT que, não houve uma boa concordância entre os resultados FEM e SAFE, devido a alta atenuação entre as frequências de 0 a 20 kHz. No caso FEM e SAFE houve uma boa coerência. Os resultados FEM e Experimentais quando comparados com o resultado SAFE não apresentam os dois primeiros modos, assim como para o caso F-NT, fato melhor visualizado nos gráficos de vagarosidade entre 700 e 1000 μs/m.

7.1.6
Caso C-NE

Nesta subseção são apresentados os resultados do caso C-NE.



(a): C-NE FEM e SAFE

(b): C-NE Experimental e SAFE

(c): C-NE FEM e SAFE

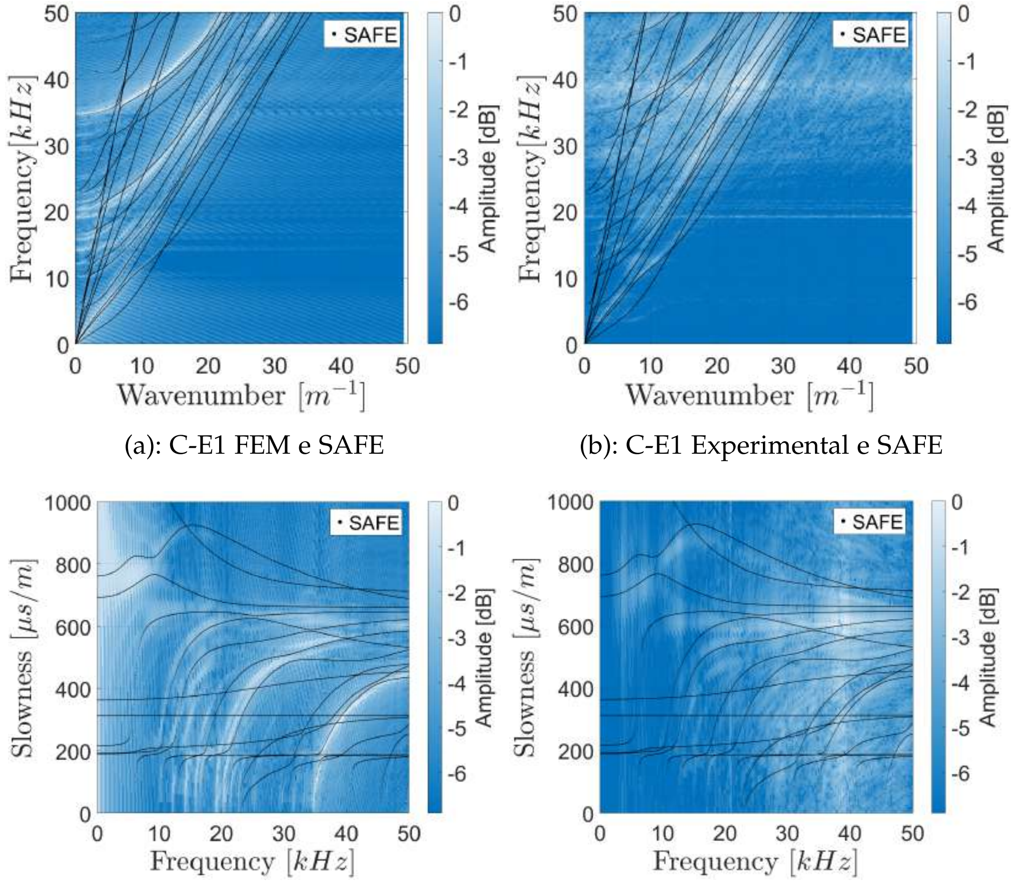
(d): C-NE Experimental e SAFE

Figura 7.7: Resultado do modelo FEM, Experimento e SAFE no domínio da frequência, caso C-NE

Observa-se na Figura 7.7 do caso C-NE que, há uma boa concordância entre os resultados FEM e Experimentais de 0 a 25 kHz e diferentemente do caso F-NE, após 25 kHz não aparece um modo adicional. Se comparadas as Figuras 7.6 e 7.7, nota-se que a Figura 7.7 apresenta poucos modos e acima de 25 KHz fica difícil distinguir os modos devido a baixa amplitude dos sinais e ruído recebido nos hidrofones.

7.1.7
Caso C-E1

Nesta subseção são apresentados os resultados do caso C-E1.



(a): C-E1 FEM e SAFE

(b): C-E1 Experimental e SAFE

(c): C-E1 FEM e SAFE

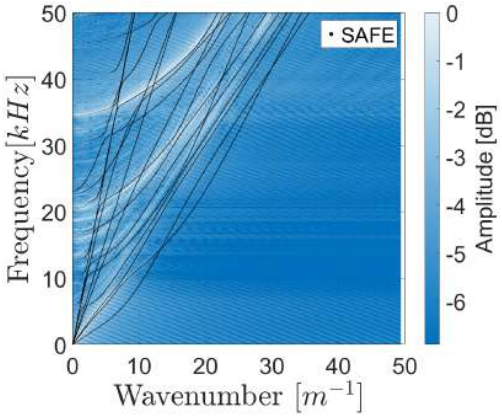
(d): C-E1 Experimental e SAFE

Figura 7.8: Resultado do modelo FEM, Experimento e SAFE no domínio da frequência, caso C-E1

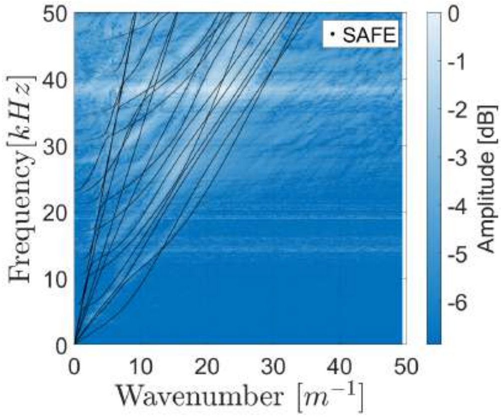
Observa-se na Figura 7.8 do caso C-E1 que, no modelo FEM há um deslocamento nos modos entre as frequências de 10 a 25 kHz e diferentemente do caso F-E1, após 25 kHz não aparece um modo adicional. Se comparadas as Figuras 7.7 e 7.8 do resultado experimental de vagarosidade, nota-se uma variação dos modos nas frequências de 10 a 20 kHz e acima de 25 KHz fica difícil distinguir os modos devido devido à baixa amplitude dos sinais e ruído recebido nos hidrofones.

7.1.8 Caso C-E2

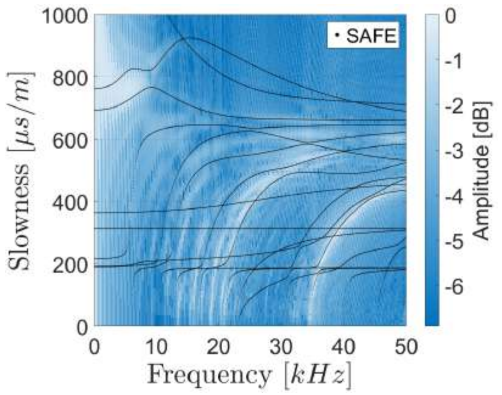
Nesta subseção são apresentados os resultados do caso C-E2.



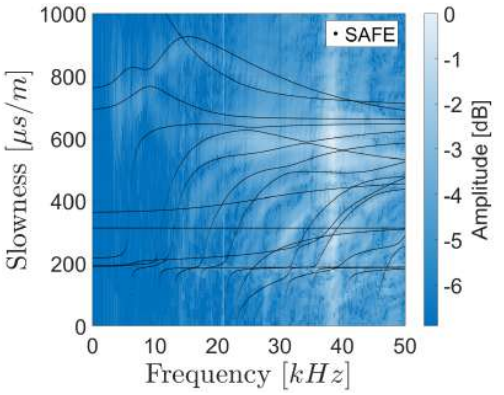
(a): C-E2 FEM e SAFE



(b): C-E2 Experimental e SAFE



(c): C-E2 FEM e SAFE



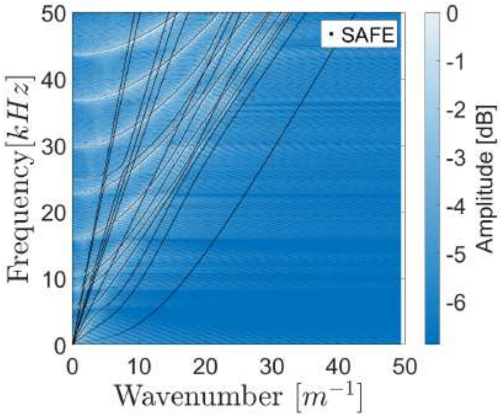
(d): C-E2 Experimental e SAFE

Figura 7.9: Resultado do modelo FEM, Experimento e SAFE no domínio da frequência, caso C-E2

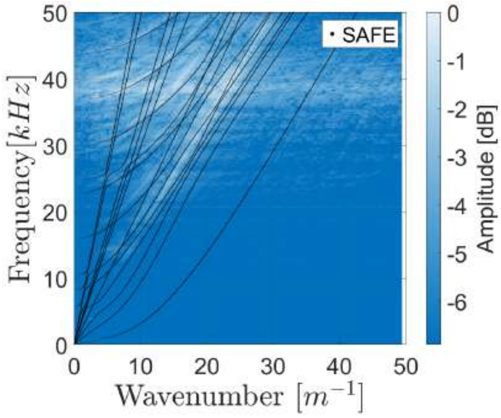
Observa-se na Figura 7.9 do caso C-E2 que, no modelo FEM há um deslocamento dos modos entre as frequências de 10 a 25 kHz e diferentemente do caso F-E1, após 25 kHz não aparece um modo adicional. Se comparadas as Figuras 7.7 e 7.9 do resultado experimental de vagarosidade, nota-se que a diferença se dá entre a frequência de 10 a 20 kHz e acima de 25 KHz fica difícil distinguir os modos devido devido à baixa amplitude dos sinais e ruído recebido nos hidrofones.

7.1.9
Caso CH-NT

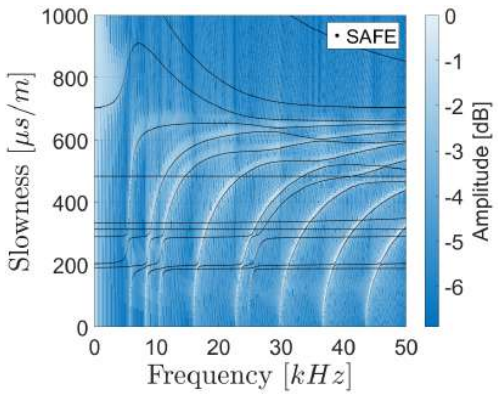
Nesta subseção são apresentados os resultados do caso CH-NT.



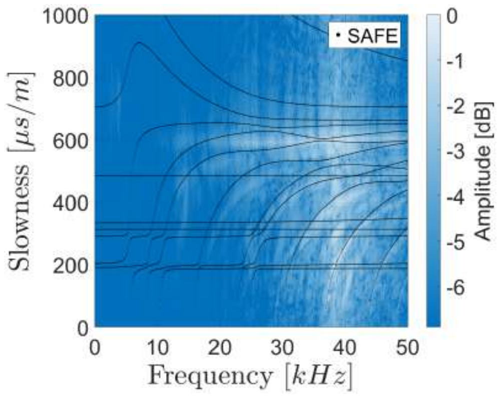
(a): CH-NT FEM e SAFE



(b): CH-NT Experimental e SAFE



(c): CH-NT FEM e SAFE



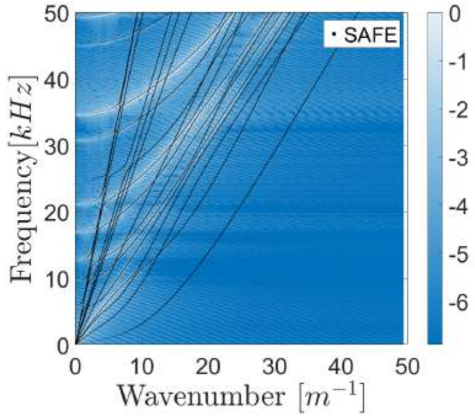
(d): CH-NT Experimental e SAFE

Figura 7.10: Resultado do modelo FEM, Experimento e SAFE no domínio da frequência, caso CH-NT

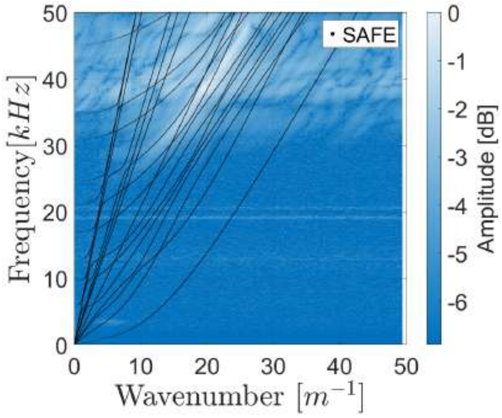
Observa-se na Figura 7.10 do caso CH-NT que, há uma boa concordância entre os resultados FEM e SAFE. No caso Experimental, houve uma grande atenuação nos modos entre 0 a 15 kHz. Os resultados FEM e Experimentais quando comparados com o resultado SAFE não apresentam os dois primeiros modos, que são melhor visualizados nos gráficos de vagarosidade entre 700 e 1000 μs/m.

7.1.10
Caso CH-NE

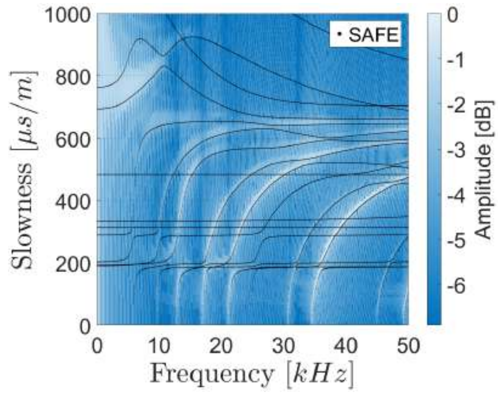
Nesta subseção são apresentados os resultados do caso CH-NE.



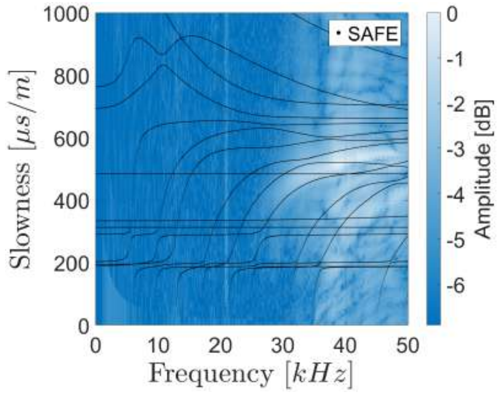
(a): CH-NE FEM e SAFE



(b): CH-NE Experimental e SAFE



(c): CH-NE FEM e SAFE



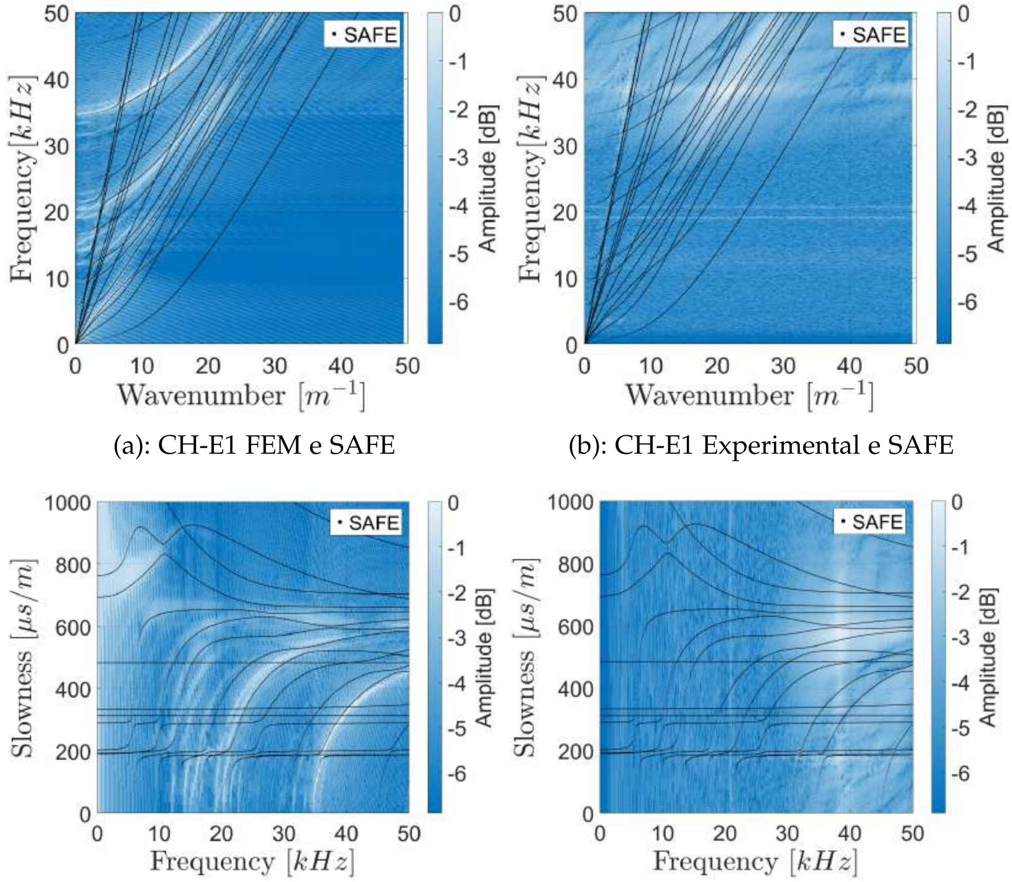
(d): CH-NE Experimental e SAFE

Figura 7.11: Resultado do modelo FEM, Experimento e SAFE no domínio da frequência, caso CH-NE

Observa-se na Figura 7.11 do caso CH-NE que, há uma boa concordância entre os resultados FEM e SAFE. Se comparadas as Figuras 7.10 e 7.11 para o experimento, nota-se que a Figura 7.11 do experimento tem energia somente acima de 20 kHz e não é possível estabelecer alguma interpretação sobre os modos deste caso.

7.1.11 Caso CH-E1

Nesta subseção são apresentados os resultados do caso CH-E1.



(a): CH-E1 FEM e SAFE

(b): CH-E1 Experimental e SAFE

(c): CH-E1 FEM e SAFE

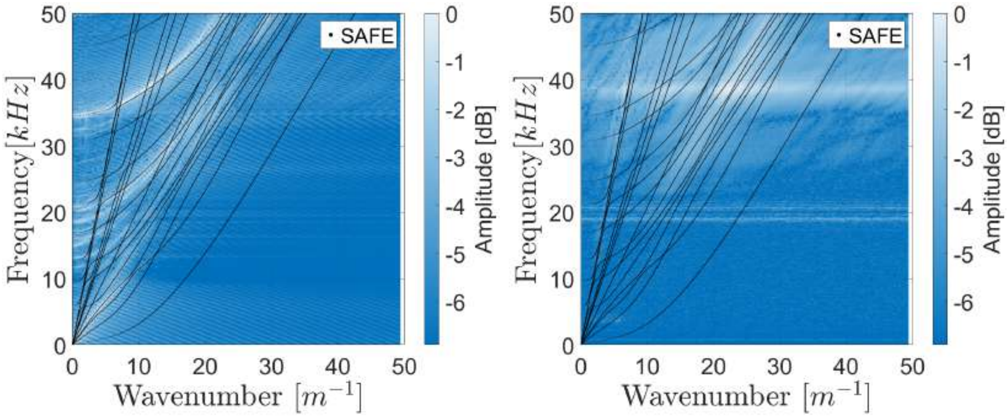
(d): CH-E1 Experimental e SAFE

Figura 7.12: Resultado do modelo FEM, Experimento e SAFE no domínio da frequência, caso CH-E1

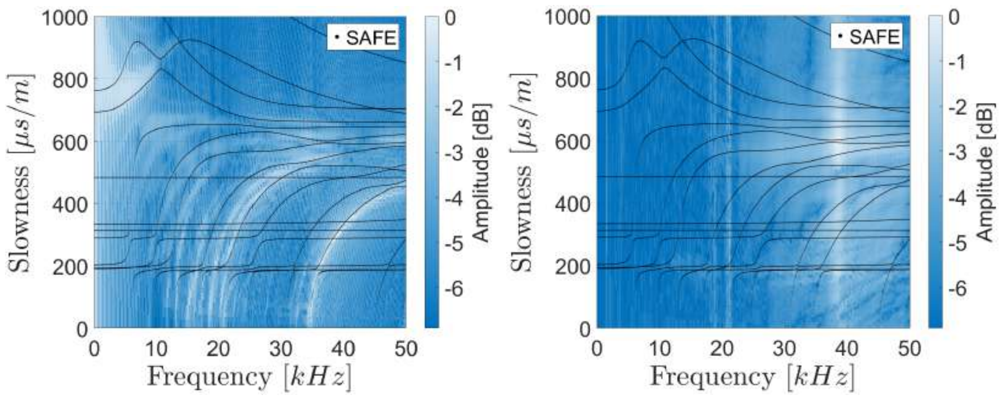
Observa-se na Figura 7.12 do caso CH-E1 que, no modelo FEM há um deslocamento nos modos entre as frequências de 10 a 25 kHz. No caso experimental há somente energia na frequência de ressonância do transdutor piezoelétrico. Se comparadas as Figuras 7.10 e 7.12 para o experimento, nota-se que a Figura 7.12 do experimento tem energia somente acima de 30 kHz e não é possível estabelecer alguma interpretação sobre os modos deste caso.

7.1.12 Caso CH-E2

Nesta subseção são apresentados os resultados do caso CH-E2.



(a): CH-E2 FEM e SAFE (b): CH-E2 Experimental e SAFE



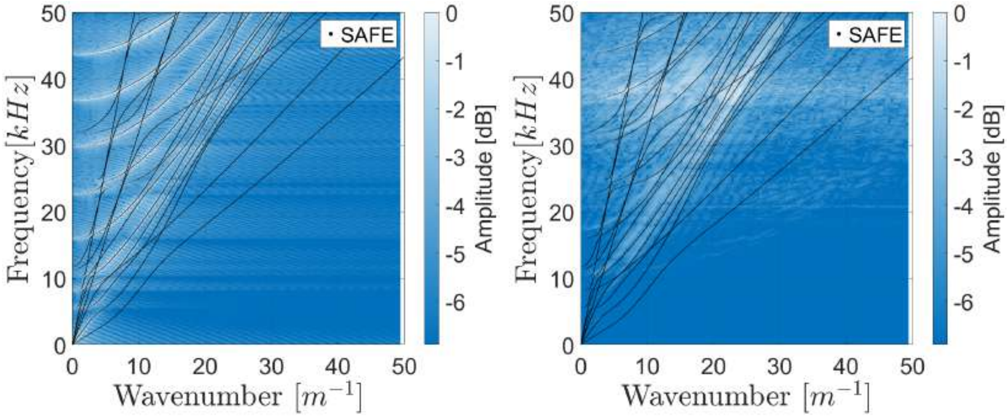
(c): CH-E2 FEM e SAFE (d): CH-E2 Experimental e SAFE

Figura 7.13: Resultado do modelo FEM, Experimento e SAFE no domínio da frequência, caso CH-E2

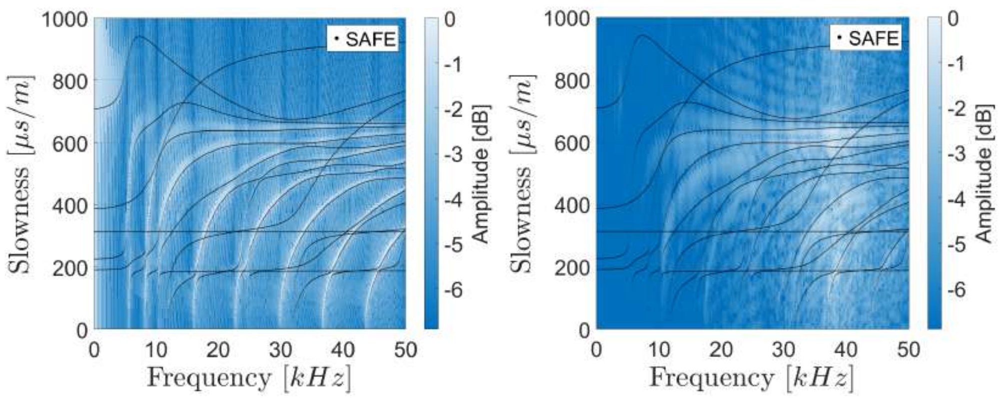
Observa-se na Figura 7.13 do caso CH-E2 que, no modelo FEM há um deslocamento nos modos entre as frequências de 10 a 25 kHz. No caso experimental há somente energia na frequência de ressonância do transdutor piezoelétrico. Se comparadas as Figuras 7.10 e 7.13 para o experimento, nota-se que a Figura 7.13 do experimento tem energia somente acima de 20 kHz e não é possível estabelecer alguma interpretação sobre os modos deste caso.

7.1.13
Caso CL-NT

Nesta subseção são apresentados os resultados do caso CL-NT.



(a): CL-NT FEM e SAFE (b): CL-NT Experimental e SAFE



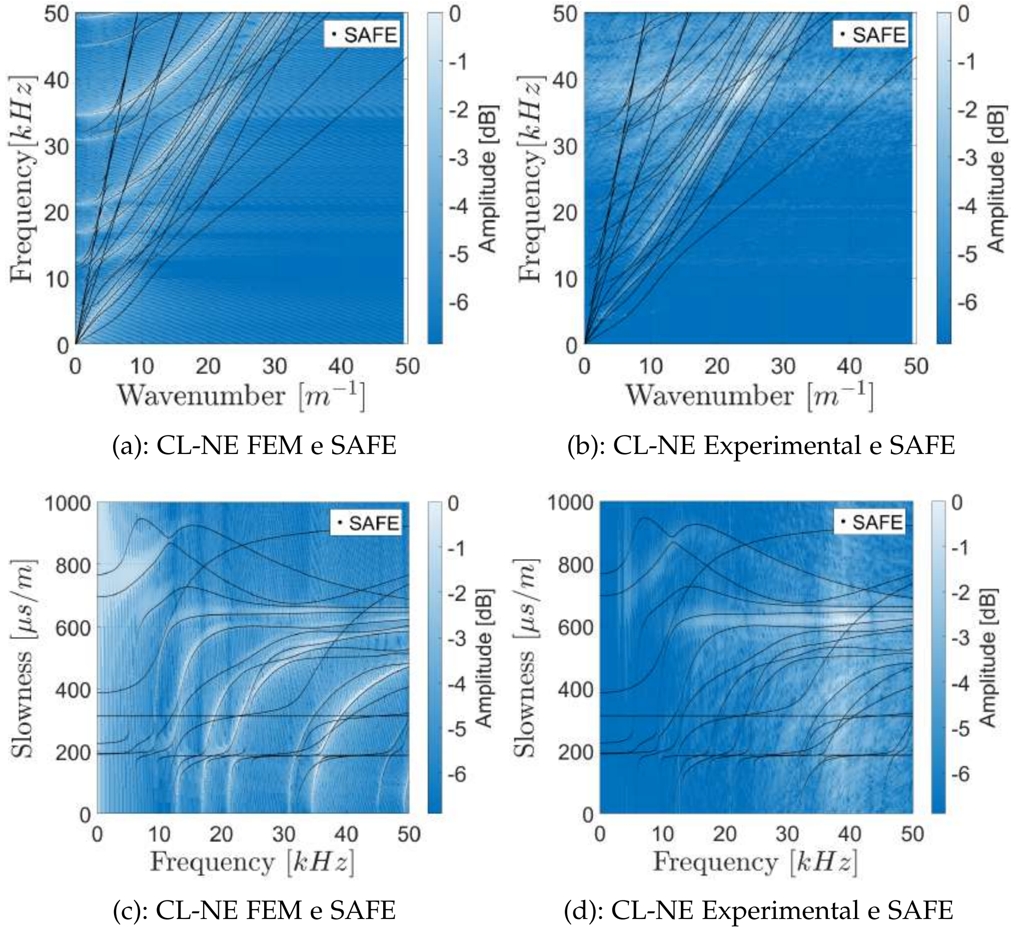
(c): CL-NT FEM e SAFE (d): CL-NT Experimental e SAFE

Figura 7.14: Resultado do modelo FEM, Experimento e SAFE no domínio da frequência, caso CL-NT

Observa-se na Figura 7.14 do caso CL-NT que, há uma boa concordância entre os resultados FEM e SAFE. No caso Experimental, houve concordância entre Experimental e SAFE nas frequências 10 a 25 kHz. Os resultados FEM e Experimentais quando comparados com o resultado SAFE não apresentam os dois primeiros modos, que são melhor visualizados nos gráficos de vagarosidade entre 700 e 1000 μs/m.

7.1.14
Caso CL-NE

Nesta subseção são apresentados os resultados do caso CL-NE.



(a): CL-NE FEM e SAFE

(b): CL-NE Experimental e SAFE

(c): CL-NE FEM e SAFE

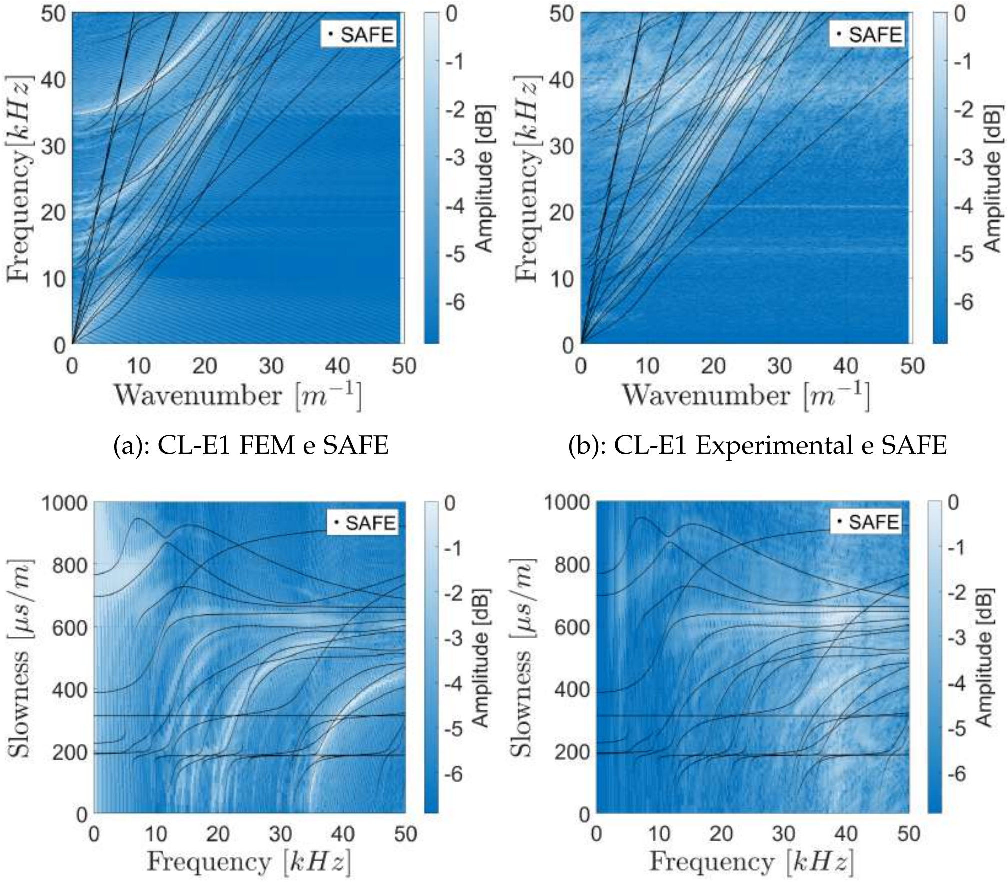
(d): CL-NE Experimental e SAFE

Figura 7.15: Resultado do modelo FEM, Experimento e SAFE no domínio da frequência, caso CL-NE

Observa-se na Figura 7.7 do caso CL-NE que, há uma boa concordância entre os resultados FEM e SAFE. No resultado Experimental, é difícil a distinção dos modos, onde basicamente nota-se um modo de 10 a 50 kHz na vagarosidade de 600 μs/m e outro modo de 25 a 50 kHz com vagarosidade de 0 a 500 μs/m. Se comparadas as Figuras 7.14 e 7.15, nota-se que a Figura 7.15 apresenta menos modos e a distinção dos modos devido à baixa amplitude dos sinais e ruído recebido nos hidrofones é difícil.

7.1.15
Caso CL-E1

Nesta subseção são apresentados os resultados do caso CL-E1.



(a): CL-E1 FEM e SAFE (b): CL-E1 Experimental e SAFE

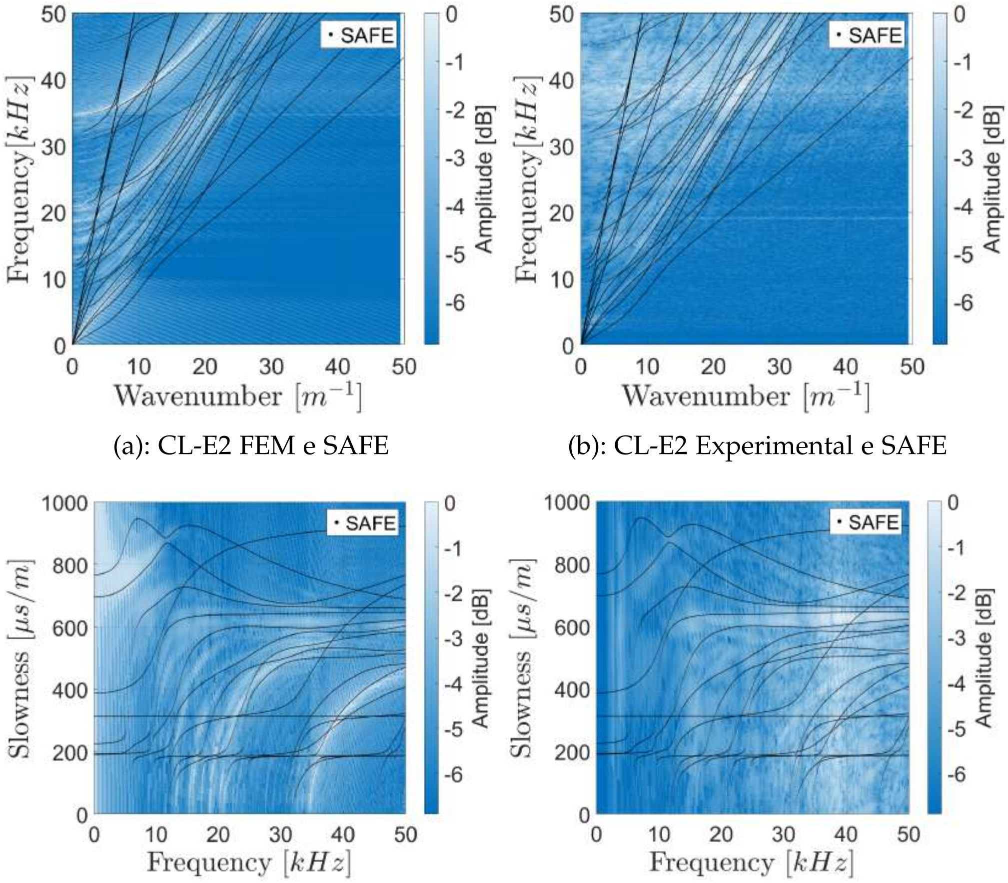
(c): CL-E1 FEM e SAFE (d): CL-E1 Experimental e SAFE

Figura 7.16: Resultado do modelo FEM, Experimento e SAFE no domínio da frequência, caso CL-E1

Observa-se na Figura 7.16 do caso CL-E1 que, no modelo FEM há um deslocamento nos modos entre as frequências de 10 a 25 kHz. Se comparadas as Figuras 7.14 e 7.16, nota-se o aumento de energia nos modos vistos, porém com difícil distinção dos modos devido à baixa amplitude dos sinais e ruído recebido nos hidrofones.

7.1.16 Caso CL-E2

Nesta subseção são apresentados os resultados do caso CL-E2.



(a): CL-E2 FEM e SAFE (b): CL-E2 Experimental e SAFE

(c): CL-E2 FEM e SAFE (d): CL-E2 Experimental e SAFE

Figura 7.17: Resultado do modelo FEM, Experimento e SAFE no domínio da frequência, caso CL-E2

Observa-se na Figura 7.17 do caso CL-E2 que, no modelo FEM há um deslocamento nos modos entre as frequências. Se comparadas as Figuras 7.14 e 7.17, nota-se o aumento de energia nos modos vistos porém ainda com difícil distinção dos modos devido devido à baixa amplitude dos sinais e ruído recebido nos hidrofones.

Os casos F-NT, C-NT, CH-NT e CL-NT foram os que melhor tiveram concordância entre os resultados FEM, Experimental e SAFE. Houve uma grande atenuação nos modos entre 0 a 10 kHz para todos os casos, fato que pode ser explicado devido a esses modos terem pouca energia. O caso C-NT apresentou elevado atenuação, fato que pode ser explicado devido ao tempo de cura do cimento não ter sido suficiente.

Os casos F-NE, C-NE, CH-NE e CL-NE apresentaram boa concordância entre os resultados FEM, Experimental e SAFE entre 0 e 25 kHz. Para os casos CH-NE e CL-NE experimentais houve uma perda significativa na amplitude dos sinais, e por isso, não há muita distinção entre os modos. Além disso, nota-se que em todos os casos NE, E1 e E2 há menos modos que os casos NT, este se fato se dá pela principalmente pela inserção do tubo de produção.

Os casos F-E1 e C-E1 apresentaram uma boa concordância entre os resultados FEM e Experimental entre 0 e 25 kHz. Para os casos CH-E1 e CL-E1 experimentais houve uma perda significativa na amplitude dos sinais, e por isso, não há muita distinção entre os modos, porém no caso CH-E1 esse fato foi mais grave que no CL-E1.

Os casos F-E2 e C-E2 apresentaram uma boa concordância entre os resultados FEM e Experimental entre 0 e 25 kHz. Para os casos CH-E2 e CL-E2 experimentais houve uma perda significativa na amplitude dos sinais, e por isso, não há muita distinção entre os modos, porém no caso CH-E2 esse fato é mais grave que no CL-E2. O SAFE concêntrico juntamente com os experimentos excêntricos mostraram que há uma tendência de alguns modos se movimentarem no sentido positivo da frequência.

7.2
Comparação Resultados do STC FEM e STC experimental

Nesta subseção são comparados os resultados STC FEM e STC experimentais. Todos os casos seguem a seguinte ordem, figura (a) é o sinal no domínio do tempo FEM, (b) é o sinal no domínio do tempo experimental, (c) é o STC FEM e (d) é o STC experimental. O procedimento para para obtenção das curvas dos resultados é mostrado na Figura 7.18

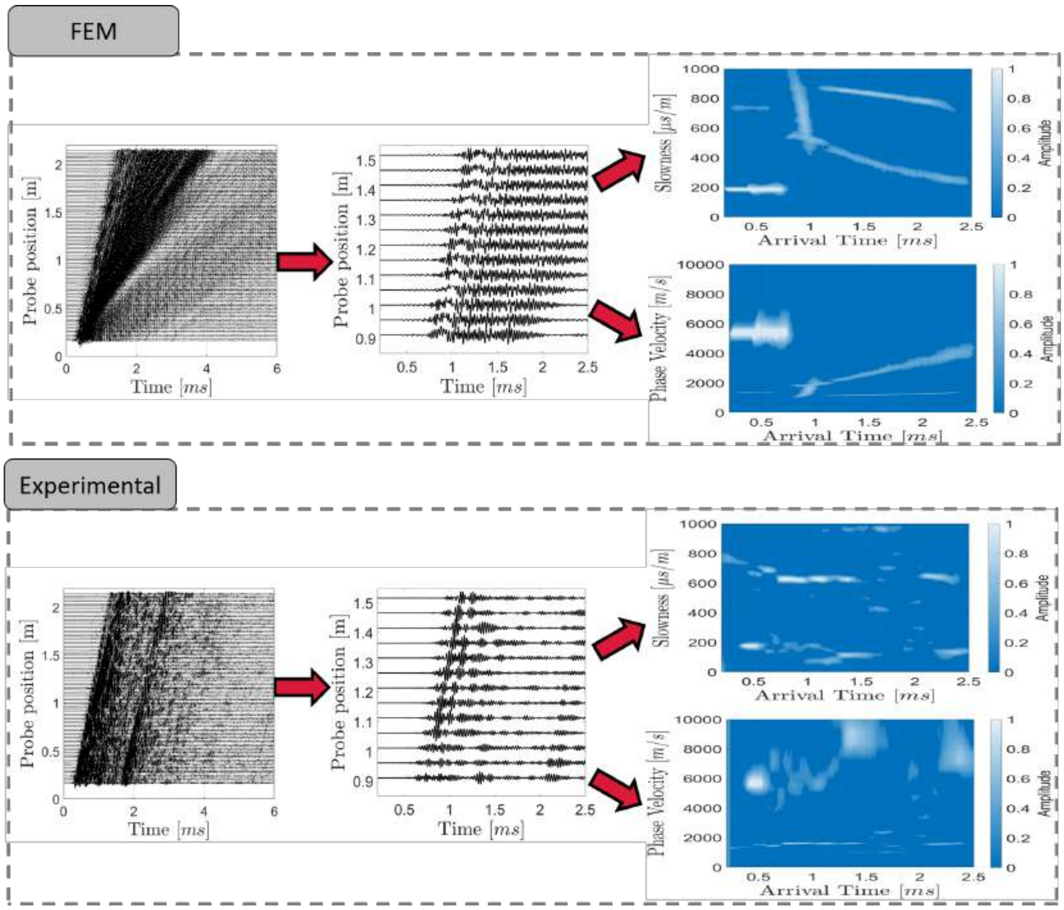
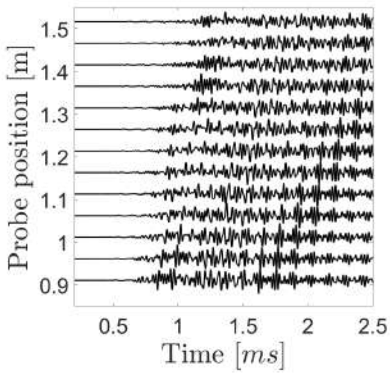


Figura 7.18: Procedimento para a extração dos gráficos STC FEM e STC experimental

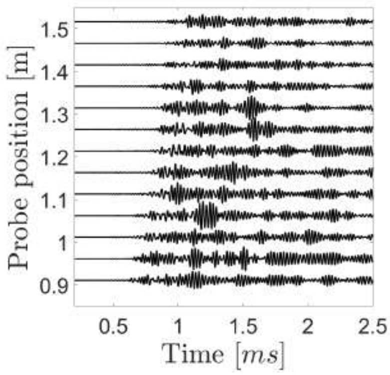
Ilustra-se na Figura 7.18 o procedimento para a extração dos gráficos STC, basicamente pega-se os sinais do domínio do tempo, nos 200 pontos simulados com FEM e aquisitados com os experimentos e escolhe-se 13 pontos contidos entre 3 e 5 pés para cada caso, e por fim, utiliza-se a equação do STC, assim obtendo os gráficos de STC para vagarosidade e velocidade de fase. Notou-se que o comportamento dos casos foi melhor observado com os gráficos de velocidade, por isso foi utilizado neste capítulo o STC para velocidade de fase e, por brevidade, os gráficos de vagarosidade são apresentados no Apêndice E.

7.2.1
Caso F-NT

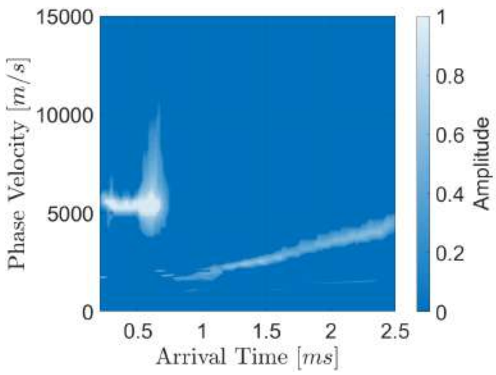
Nesta subseção são apresentados os resultados STC do caso F-NT.



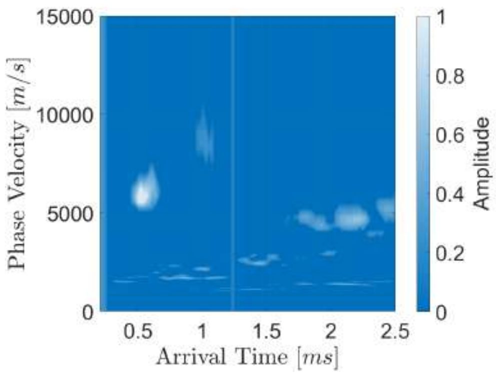
(a): F-NT FEM tempo



(b): F-NT experimental tempo



(c): F-NT FEM STC



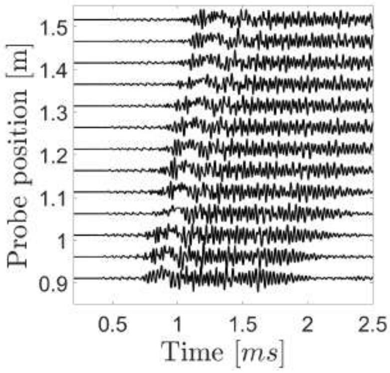
(d): F-NT experimental STC

Figura 7.19: Resultado do modelo FEM e experimental no domínio do tempo com 13 receptores; e STC FEM e experimental, caso F-NT

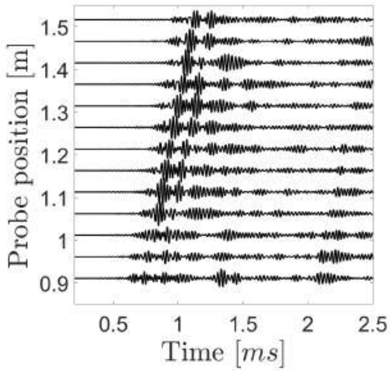
Observa-se na Figura 7.19 do caso F-NT que, nos gráficos no domínio do tempo os resultados mostram tempos de chegada próximos porém com forma de onda diferente; nos gráficos de velocidade de fase os resultados mostram boa coerência, com exceção de que o tempo de chegada do primeiro modo para o caso experimental é maior.

7.2.2 Caso F-NE

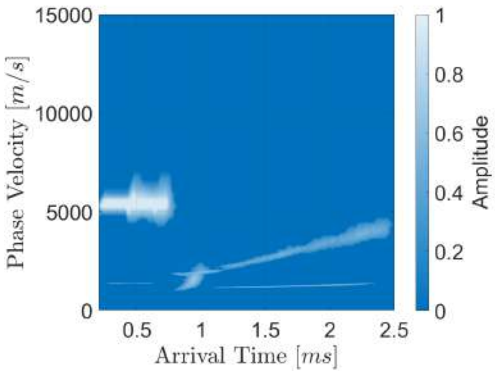
Nesta subseção são apresentados os resultados STC do caso F-NE.



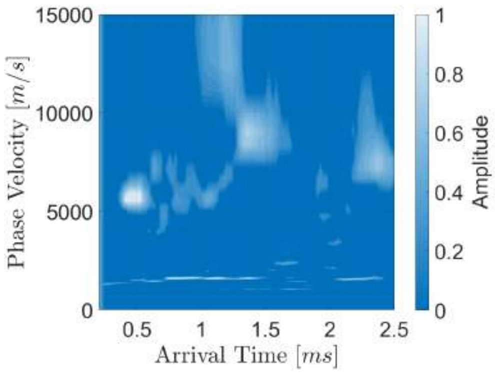
(a): F-NE FEM tempo



(b): F-NE experimental tempo



(c): F-NE FEM STC



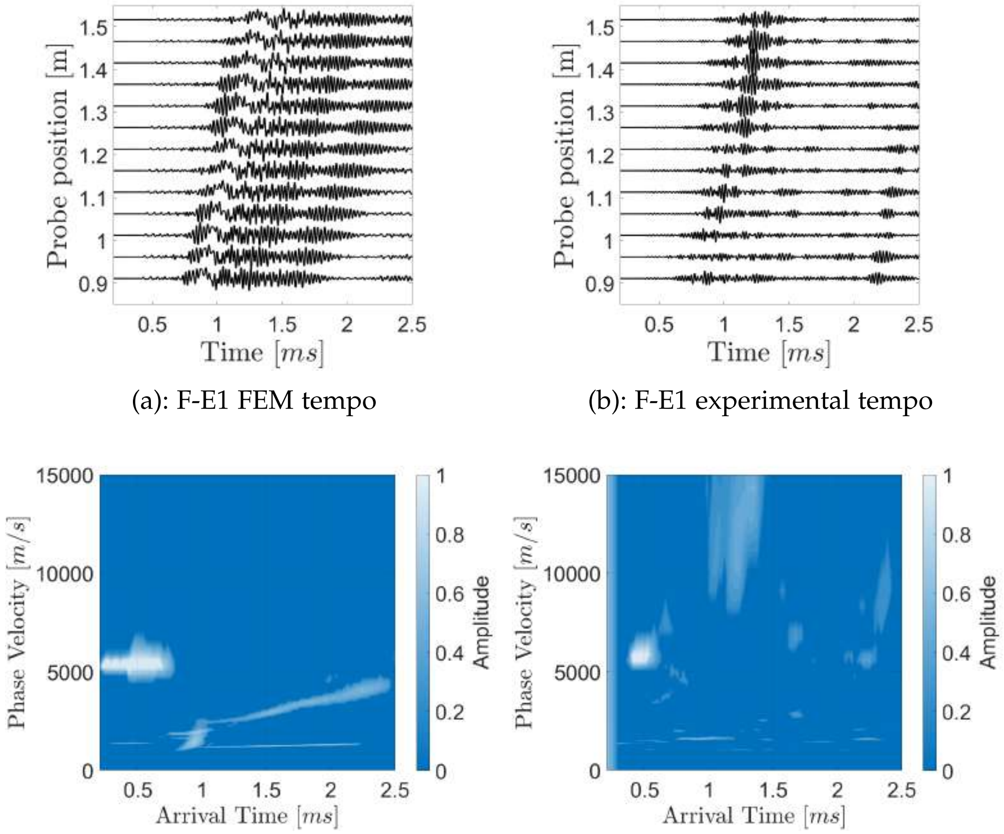
(d): F-NE experimental STC

Figura 7.20: Resultado do modelo FEM e experimental no domínio do tempo com 13 receptores; e STC FEM e experimental, caso F-NE

Observa-se na Figura 7.20 do caso F-NE que, nos gráficos no domínio do tempo os resultados mostram tempos de chegada próximos porém com forma de onda diferente; nos gráficos de velocidade de fase os resultados mostram boa coerência, com exceção de que o tempo de chegada do primeiro modo para o caso experimental é maior e aparecem ondas com velocidade maiores dos que as encontradas no FEM.

7.2.3 Caso F-E1

Nesta subseção são apresentados os resultados STC do caso F-E1.



(a): F-E1 FEM tempo

(b): F-E1 experimental tempo

(c): F-E1 FEM STC

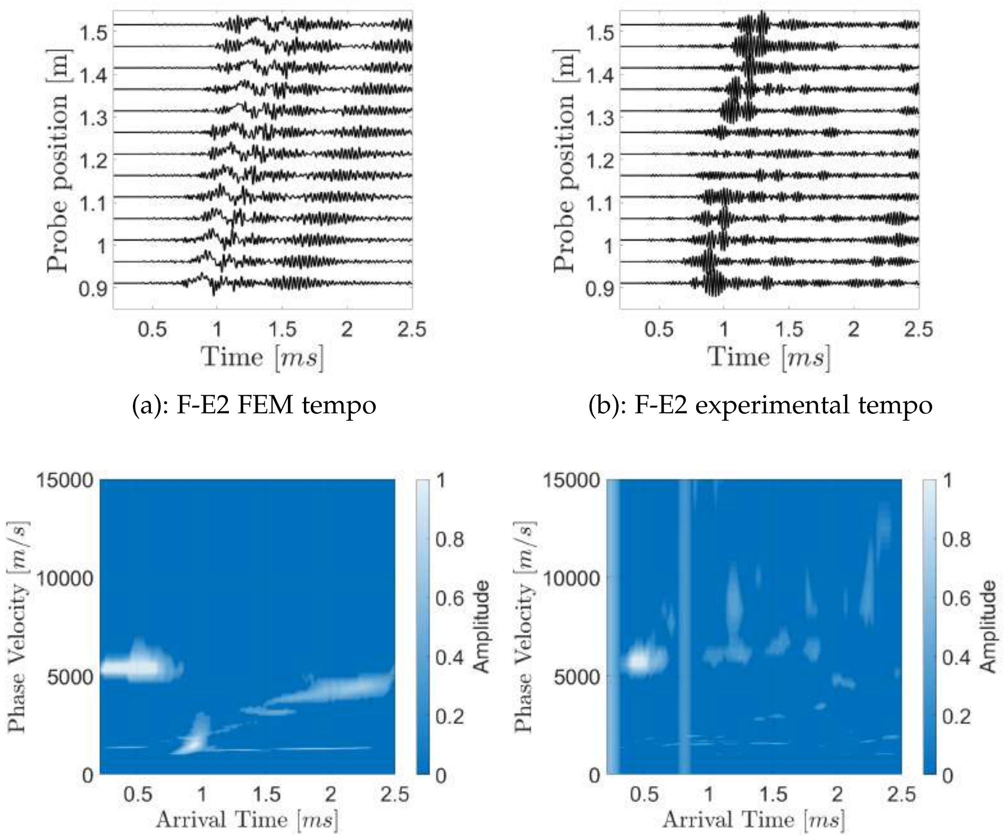
(d): F-E1 experimental STC

Figura 7.21: Resultado do modelo FEM e experimental no domínio do tempo com 13 receptores; e STC FEM e experimental, caso F-E1

Observa-se na Figura 7.21 do caso F-E1 que, nos gráficos no domínio do tempo os resultados mostram tempos de chegada próximos porém com forma de onda diferente; nos gráficos de velocidade de fase os resultados mostram boa coerência, com exceção de que o tempo de chegada do primeiro modo para o caso experimental é maior e aparecem ondas com velocidade maiores dos que as encontradas no FEM.

7.2.4
Caso F-E2

Nesta subseção são apresentados os resultados STC do caso F-E2.



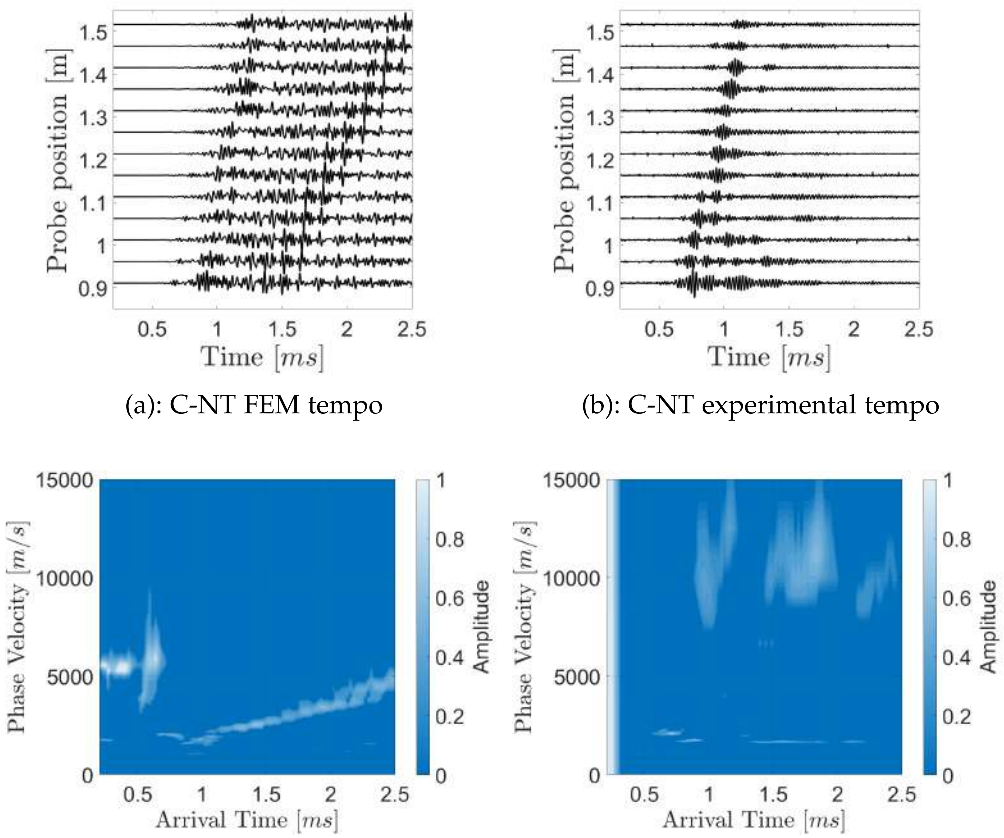
(a): F-E2 FEM tempo
(b): F-E2 experimental tempo
(c): F-E2 FEM STC
(d): F-E2 experimental STC

Figura 7.22: Resultado do modelo FEM e experimental no domínio do tempo com 13 receptores; e STC FEM e experimental, caso F-E2

Observa-se na Figura 7.22 do caso F-E2 que, nos gráficos no domínio do tempo os resultados mostram tempos de chegada próximos porém com forma de onda diferente; nos gráficos de velocidade de fase os resultados mostram boa coerência, com exceção de que o tempo de chegada do primeiro modo para o caso experimental é maior e aparecem ondas com velocidade maiores dos que as encontradas no FEM.

7.2.5
Caso C-NT

Nesta subseção são apresentados os resultados STC do caso C-NT.



(a): C-NT FEM tempo

(b): C-NT experimental tempo

(c): C-NT FEM STC

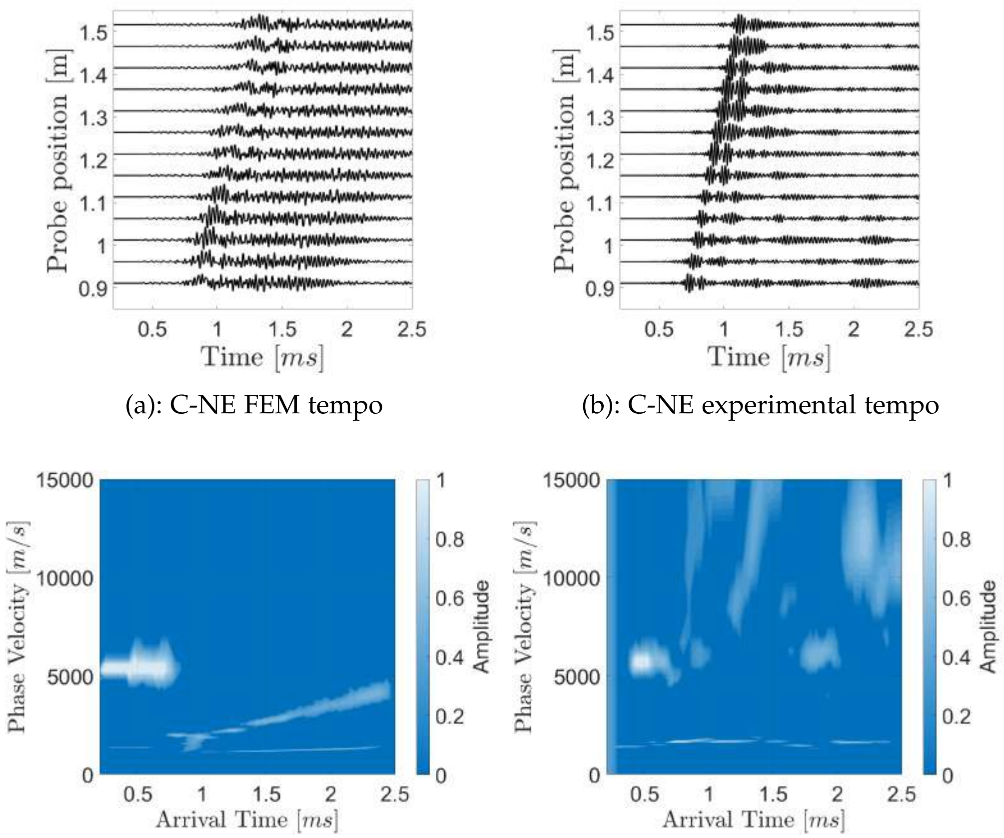
(d): C-NT experimental STC

Figura 7.23: Resultado do modelo FEM e experimental no domínio do tempo com 13 receptores; e STC FEM e experimental, caso C-NT

Observa-se na Figura 7.23 do caso C-NT que, nos gráficos no domínio do tempo os resultados mostram tempos de chegada próximos porém com forma de onda diferente; nos gráficos de velocidade de fase os resultados não mostram coerência, o primeiro modo em 5850 m/s não aparece no caso experimental e aparecem ondas com velocidade maiores dos que as encontradas no FEM.

7.2.6 Caso C-NE

Nesta subseção são apresentados os resultados STC do caso C-NE.



(a): C-NE FEM tempo

(b): C-NE experimental tempo

(c): C-NE FEM STC

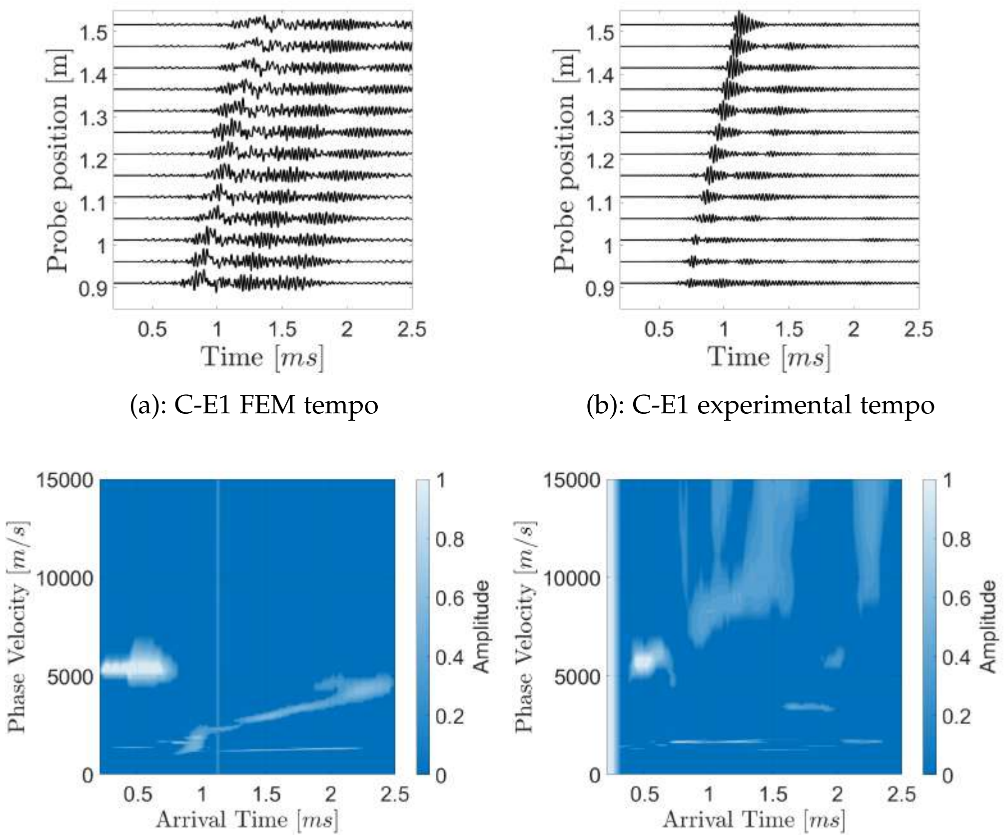
(d): C-NE experimental STC

Figura 7.24: Resultado do modelo FEM e experimental no domínio do tempo com 13 receptores; e STC FEM e experimental, caso C-NE

Observa-se na Figura 7.24 do caso C-NE que, nos gráficos no domínio do tempo os resultados mostram tempos de chegada próximos porém com forma de onda diferente; nos gráficos de velocidade de fase os resultados mostram boa coerência, com exceção de que o tempo de chegada do primeiro modo para o caso experimental é maior e aparecem ondas com velocidade maiores dos que as encontradas no FEM.

7.2.7
Caso C-E1

Nesta subseção são apresentados os resultados STC do caso C-E1.



(a): C-E1 FEM tempo

(b): C-E1 experimental tempo

(c): C-E1 FEM STC

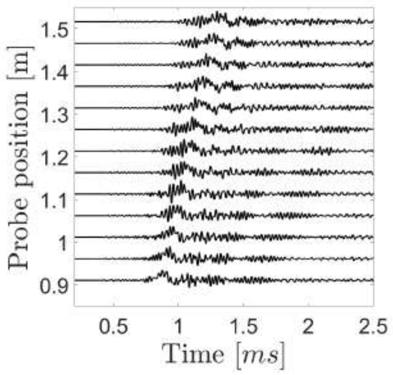
(d): C-E1 experimental STC

Figura 7.25: Resultado do modelo FEM e experimental no domínio do tempo com 13 receptores; e STC FEM e experimental, caso C-E1

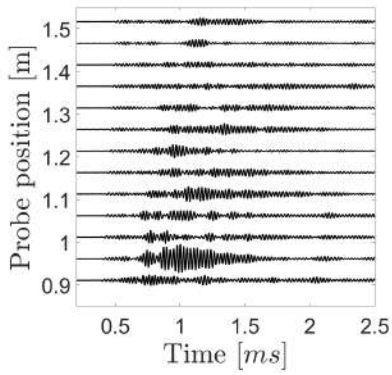
Observa-se na Figura 7.25 do caso C-E1 que, nos gráficos no domínio do tempo os resultados mostram tempos de chegada próximos porém com forma de onda diferente; nos gráficos de velocidade de fase os resultados mostram boa coerência, com exceção de que o tempo de chegada do primeiro modo para o caso experimental é maior e aparecem ondas com velocidade maiores dos que as encontradas no FEM.

7.2.8
Caso C-E2

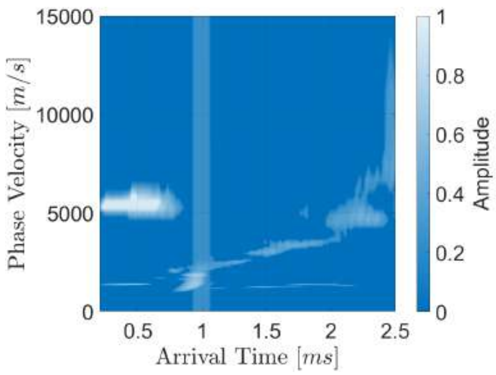
Nesta subseção são apresentados os resultados STC do caso C-E2.



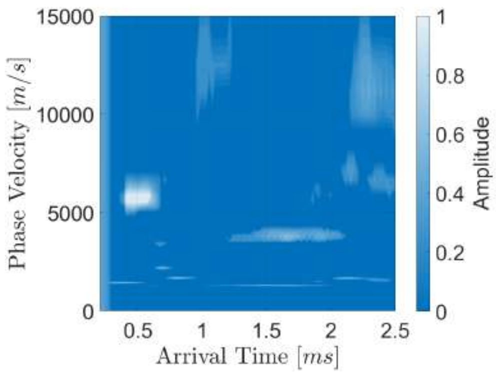
(a): C-E2 FEM tempo



(b): C-E2 experimental tempo



(c): C-E2 FEM STC



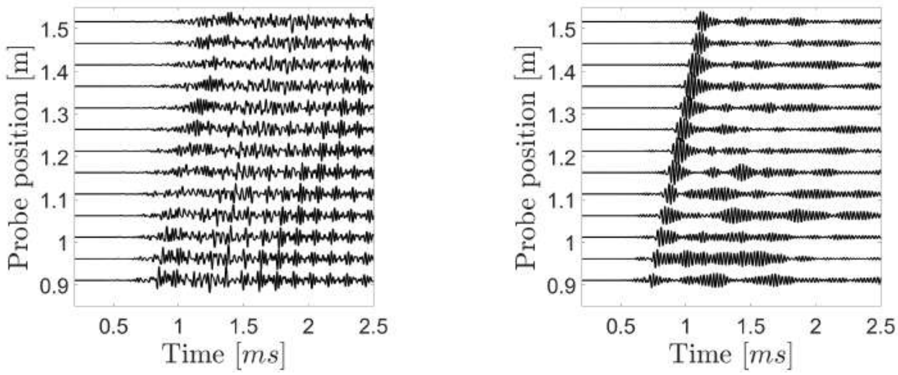
(d): C-E2 experimental STC

Figura 7.26: Resultado do modelo FEM e experimental no domínio do tempo com 13 receptores; e STC FEM e experimental, caso C-E2

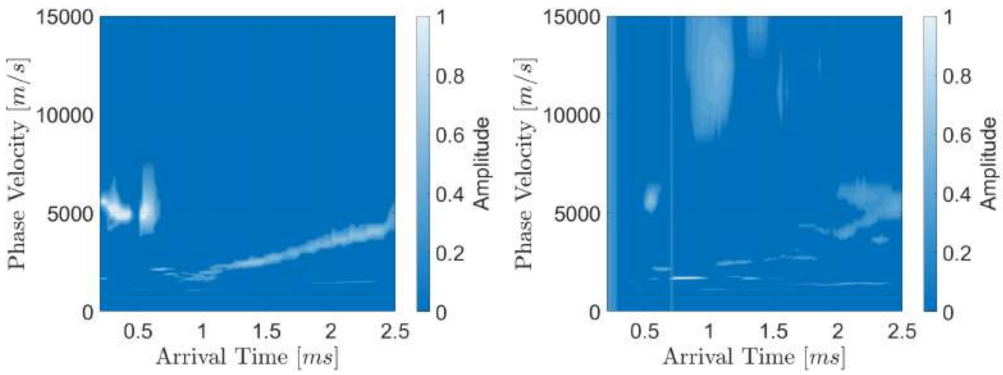
Observa-se na Figura 7.26 do caso C-E2 que, nos gráficos no domínio do tempo os resultados mostram tempos de chegada próximos porém com forma de onda diferente; nos gráficos de velocidade de fase os resultados mostram boa coerência, com exceção de que o tempo de chegada do primeiro modo para o caso experimental é maior e aparecem ondas com velocidade maiores dos que as encontradas no FEM.

7.2.9 Caso CH-NT

Nesta subseção são apresentados os resultados STC do caso CH-NT.



(a): CH-NT FEM tempo (b): CH-NT experimental tempo



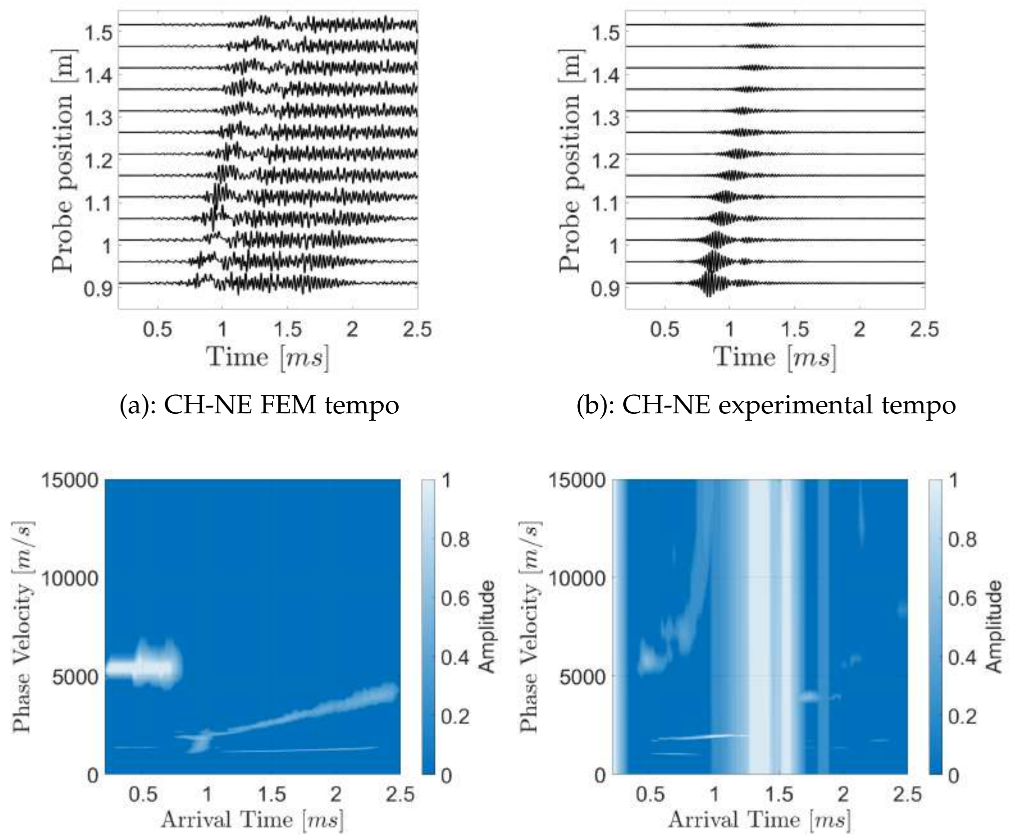
(c): CH-NT FEM STC (d): CH-NT experimental STC

Figura 7.27: Resultado do modelo FEM e experimental no domínio do tempo com 13 receptores; e STC FEM e experimental, caso CH-NT

Observa-se na Figura 7.27 do caso C-NT que, nos gráficos no domínio do tempo os resultados mostram tempos de chegada próximos porém com forma de onda diferente; nos gráficos de velocidade de fase os resultados mostram boa coerência, com exceção de que o tempo de chegada do primeiro modo para o caso experimental é maior e aparecem ondas com velocidade maiores dos que as encontradas no FEM.

7.2.10
Caso CH-NE

Nesta subseção são apresentados os resultados STC do caso CH-NE.



(a): CH-NE FEM tempo (b): CH-NE experimental tempo

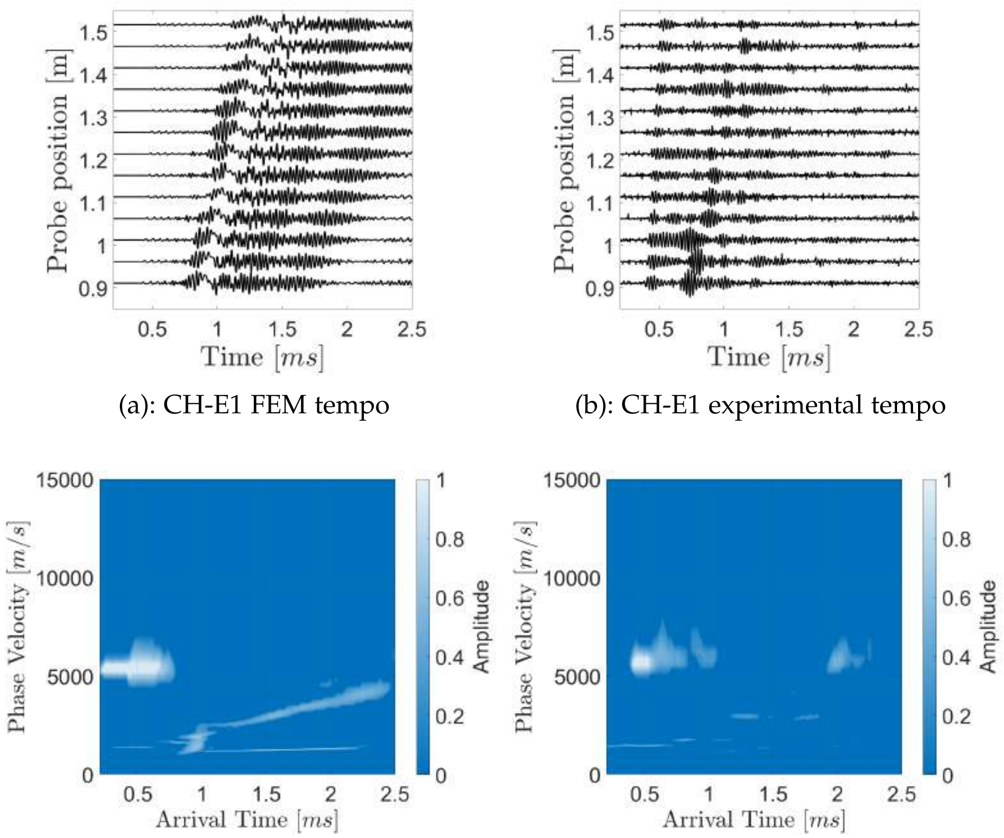
(c): CH-NE FEM STC (d): CH-NE experimental STC

Figura 7.28: Resultado do modelo FEM e experimental no domínio do tempo com 13 receptores; e STC FEM e experimental, caso CH-NE

Observa-se na Figura 7.28 do caso CH-NE que, nos gráficos no domínio do tempo os resultados mostram tempos de chegada próximos porém com forma de onda diferente; nos gráficos de velocidade de fase os resultados não mostram um boa coerência.

7.2.11 Caso CH-E1

Nesta subseção são apresentados os resultados STC do caso CH-E1.



(a): CH-E1 FEM tempo (b): CH-E1 experimental tempo

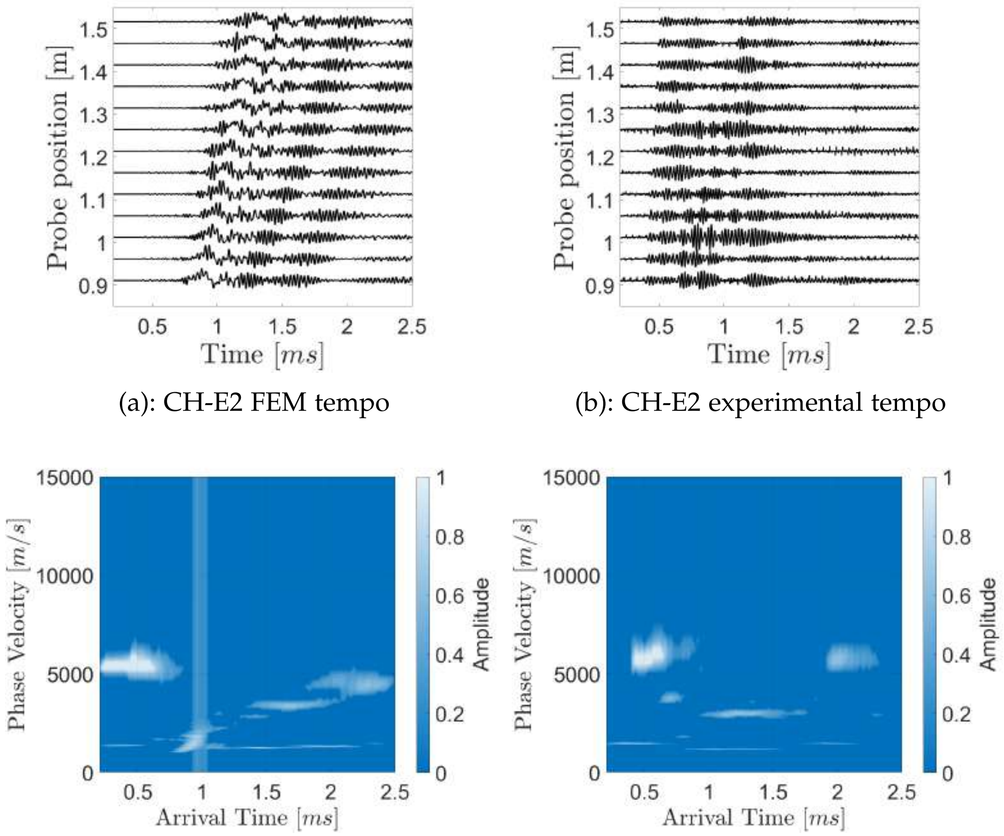
(c): CH-E1 FEM STC (d): CH-E1 experimental STC

Figura 7.29: Resultado do modelo FEM e experimental no domínio do tempo com 13 receptores; e STC FEM e experimental, caso CH-E1

Observa-se na Figura 7.29 do caso CH-E1 que, nos gráficos no domínio do tempo os resultados mostram tempos de chegada próximos porém com forma de onda diferente; nos gráficos de velocidade de fase os resultados mostram boa coerência, com exceção de que o tempo de chegada do primeiro modo para o caso experimental é maior.

7.2.12 Caso CH-E2

Nesta subseção são apresentados os resultados STC do caso CH-E2.



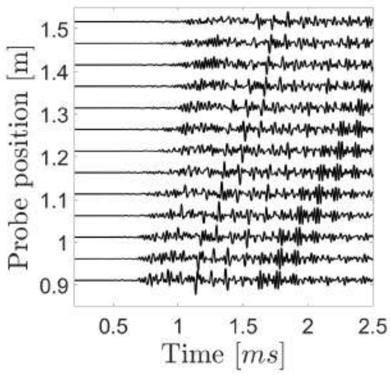
(a): CH-E2 FEM tempo
(b): CH-E2 experimental tempo
(c): CH-E2 FEM STC
(d): CH-E2 experimental STC

Figura 7.30: Resultado do modelo FEM e experimental no domínio do tempo com 13 receptores; e STC FEM e experimental, caso CH-E2

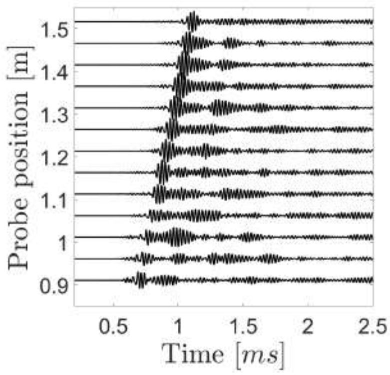
Observa-se na Figura 7.30 do caso CH-E2 que, nos gráficos no domínio do tempo os resultados mostram tempos de chegada próximos porém com forma de onda diferente; nos gráficos de velocidade de fase os resultados mostram boa coerência, com exceção de que o tempo de chegada do primeiro modo para o caso experimental é maior.

7.2.13
Caso CL-NT

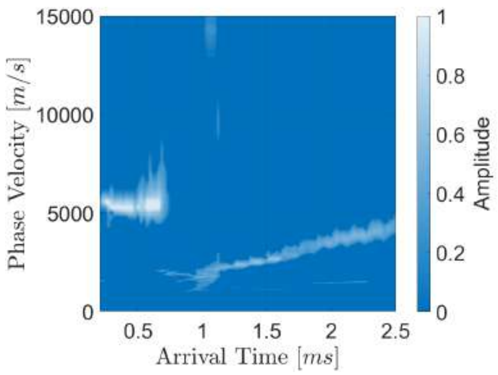
Nesta subseção são apresentados os resultados STC do caso CL-NT.



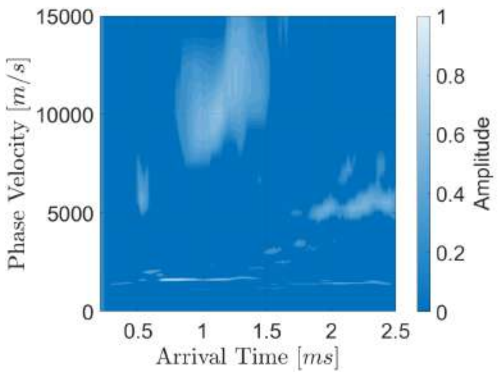
(a): CL-NT FEM tempo



(b): CL-NT experimental tempo



(c): CL-NT FEM STC



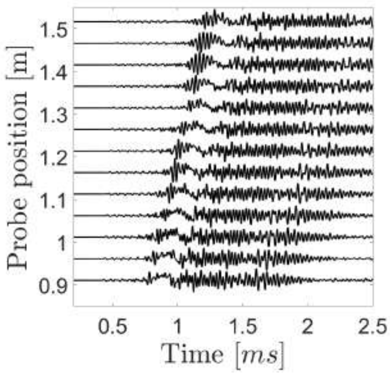
(d): CL-NT experimental STC

Figura 7.31: Resultado do modelo FEM e experimental no domínio do tempo com 13 receptores; e STC FEM e experimental, caso CL-NT

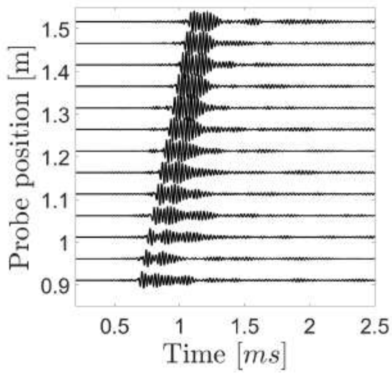
Observa-se na Figura 7.31 do caso CL-NT que, nos gráficos no domínio do tempo os resultados mostram tempos de chegada próximos porém com forma de onda diferente; nos gráficos de velocidade de fase os resultados mostram boa coerência, com exceção de que o tempo de chegada do primeiro modo para o caso experimental é maior e aparecem ondas com velocidade maiores dos que as encontradas no FEM.

7.2.14
Caso CL-NE

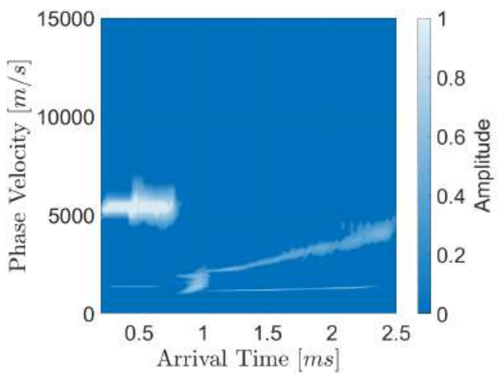
Nesta subseção são apresentados os resultados STC do caso CL-NE.



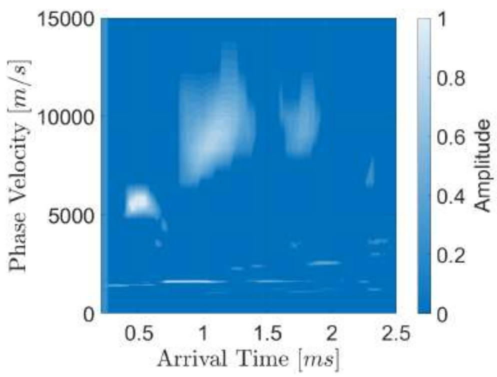
(a): CL-NE FEM tempo



(b): CL-NE experimental tempo



(c): CL-NE FEM STC



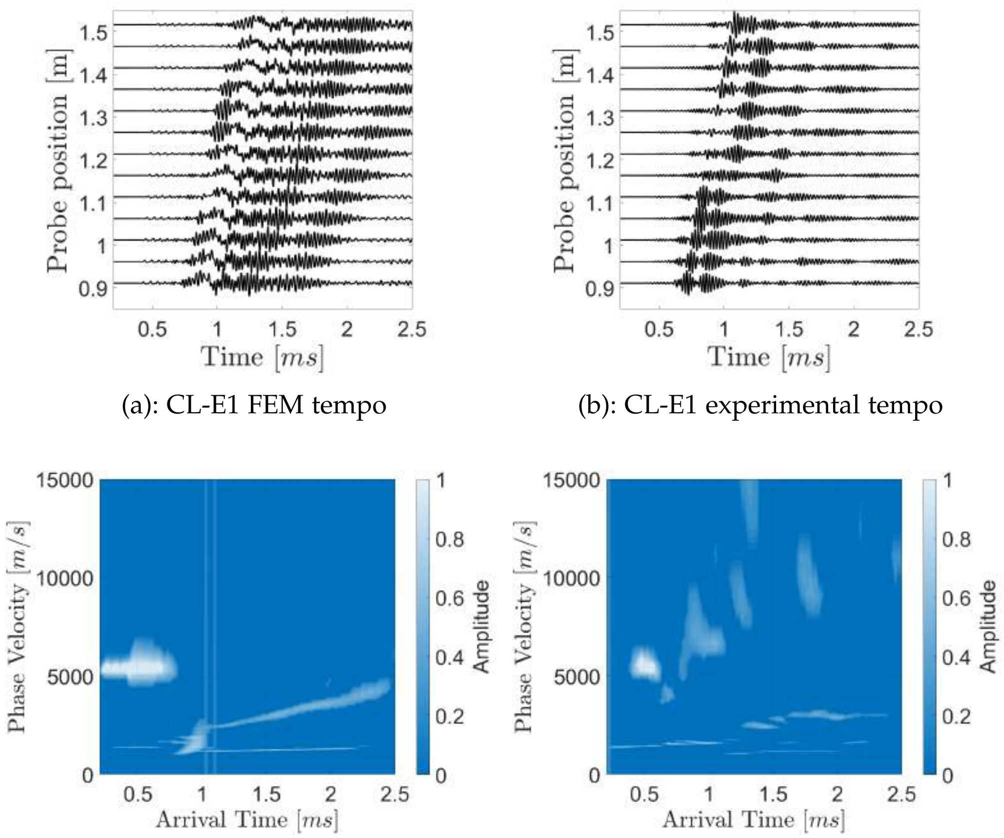
(d): CL-NE experimental STC

Figura 7.32: Resultado do modelo FEM e experimental no domínio do tempo com 13 receptores; e STC FEM e experimental, caso CL-NE

Observa-se na Figura 7.32 do caso CL-NE que, nos gráficos no domínio do tempo os resultados mostram tempos de chegada próximos porém com forma de onda diferente; nos gráficos de velocidade de fase os resultados mostram boa coerência, com exceção de que o tempo de chegada do primeiro modo para o caso experimental é maior e aparecem ondas com velocidade maiores dos que as encontradas no FEM.

7.2.15
Caso CL-E1

Nesta subseção são apresentados os resultados STC do caso CL-E1.



(a): CL-E1 FEM tempo (b): CL-E1 experimental tempo

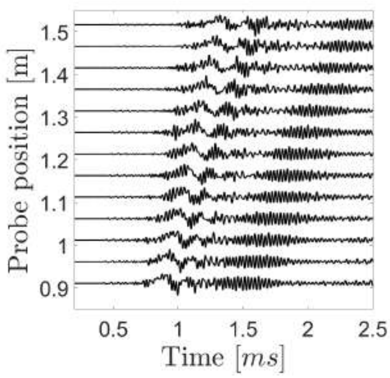
(c): CL-E1 FEM STC (d): CL-E1 experimental STC

Figura 7.33: Resultado do modelo FEM e experimental no domínio do tempo com 13 receptores; e STC FEM e experimental, caso CL-E1

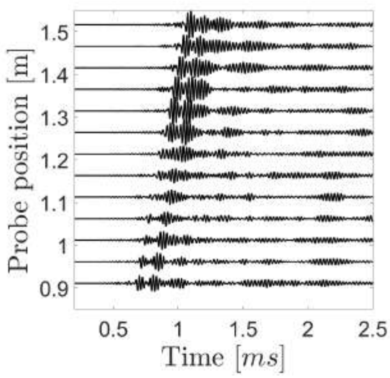
Observa-se na Figura 7.33 do caso CL-NT que, nos gráficos no domínio do tempo os resultados mostram tempos de chegada próximos porém com forma de onda diferente; nos gráficos de velocidade de fase os resultados mostram boa coerência, com exceção de que o tempo de chegada do primeiro modo para o caso experimental é maior e aparecem ondas com velocidade maiores dos que as encontradas no FEM.

7.2.16
Caso CL-E2

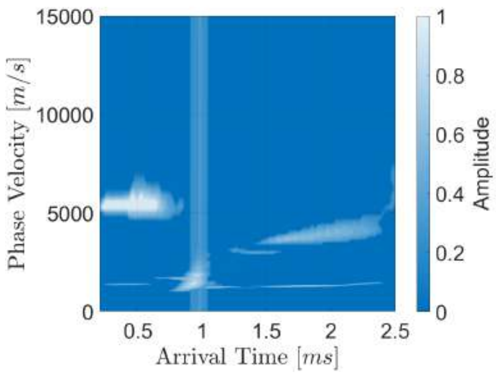
Nesta subseção são apresentados os resultados STC do caso CL-E2.



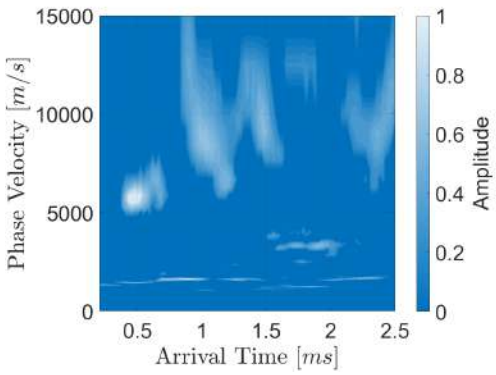
(a): CL-E2 FEM tempo



(b): CL-E2 experimental tempo



(c): CL-E2 FEM STC



(d): CL-E2 experimental STC

Figura 7.34: Resultado do modelo FEM e experimental no domínio do tempo com 13 receptores; e STC FEM e experimental, caso CL-E2

Observa-se na Figura 7.34 do caso CL-E2 que, nos gráficos no domínio do tempo os resultados mostram tempos de chegada próximos porém com forma de onda diferente; nos gráficos de velocidade de fase os resultados mostram boa coerência, com exceção de que o tempo de chegada do primeiro modo para o caso experimental é maior e aparecem ondas com velocidade maiores dos que as encontradas no FEM.

De maneira geral para os casos STC estudados, as simulações FEM não foram capazes de capturar altas velocidades de fases contidas nos casos experimentais. Também não foi possível achar nenhuma relação entre o defeito simulado com a curva STC correspondente.

8
Conclusões

Neste trabalho conseguiu-se aplicar um modelo semi-analítico em coordenadas cilíndricas para simulação de defeitos concêntricos na camada de revestimento de cimento de um poço de petróleo. A validação do modelo SAFE foi feita criando o SAFE para placas, como comentado no Capítulo 3, e comparando seus resultados com modelos analíticos simples de placas, depois com casos multicamadas, cujas comparações são mostradas no Capítulo 4. Posteriormente ao SAFE para placas, foi criado o SAFE para cilindros, como comentado no Capítulo 3, e comparado seus resultados com modelos analíticos obtidos através de Correia [12] e depois comparados com modelos semi-analíticos de placas, aplicando relações de diâmetro interno e espessura adequado, cujas soluções se aproximam das soluções para placas; depois comparados com casos e multicamadas de cilindros, e por fim, comparando os modelos SAFE para cilindros com as simulações FEM e experimentos. Vale ressaltar que só foram simulados com o SAFE casos concêntricos e que nos casos excêntricos o SAFE foi apenas usado com base para se verificar a mudança nos modos causada pelo nível de excentricidade submetido.

Conseguiu-se realizar simulações FEM, concêntricas e excêntricas, como comentado do Capítulo 5, obtendo os sinais no centro do modelo, assim como realizado pelas ferramentas comerciais de perfilagem acústica. Essas simulações serviram como dados para a geração das curvas de número de onda por frequência, vagarosidade por frequência e tempo de chegada por vagarosidade. Os dados no domínio do tempo obtidos pelas simulações FEM mostraram que as análises dos defeitos no domínio do tempo são complicadas, e não foi possível chegar a nenhuma conclusão apenas observando os sinais no domínio do tempo. Já no domínio da frequência, foi possível observar mudanças no formato e localização das curvas de dispersão causadas pelos defeitos, e por fim, através do gráfico tempo de chegada por vagarosidade foi possível perceber variações de velocidade pelo tempo.

Através das muitas simulações FEM e testes experimentais, foi possível construir uma bancada experimental, mostrada no Capitúlo 6, que imita um poço de petróleo, com a ressalva de que a camada de formação rochosa foi substituída por uma camada de fluido e uma de aço para atenuar as ondas, uma vez que criar fisicamente esta camada seria custoso e complicado. A bancada experimental se mostrou valiosa e seus dados ratificaram os resultados FEM e SAFE.

8.1 SAFE e FEM

Para todas as comparações feitas entre os resultados SAFE e FEM houve uma boa concordância entre os resultados. Porém houve alguns modos com pouca energia, e que não se propagaram e não foram mostrados nas curvas de dispersão. Além disso, os modelos SAFE e FEM mostram o comportamento da curva de dispersão quando há a inserção do tubo de produção, que pode ser resumido a diminuição do número de modos que se propagam no fluido dentro do tubo de produção aonde está a ferramenta e a mínima quantidade de energia que retorna. Com a ajuda da curva do SAFE, foi possível observar que as excentricidades aplicadas tendem a mover os modos na direção positiva da frequência e que são melhores ilustradas nas curvas de vagarosidade.

8.2 SAFE e Experimental

As comparações feitas entre os resultados SAFE e experimentais, de maneira geral, mostraram que houve uma boa concordância entre os resultados entre 10 e 25 kHz. Mostraram também que os casos NT são melhor vistos pelas curvas de dispersão, pois a inserção do tubo de produção (NE) promove a diminuição da amplitude do sinal e número de modos. Os casos mais afetados pela diminuição do sinal foram os casos CH e CL. O comportamento das curvas de dispersão para os casos E1 e E2 FEM tiveram os mesmo comportamento dos casos E1 e E2 experimental, e com a ajuda do SAFE foi possível observar que as curvas tendem a mover no sentido de crescimento da frequência, melhor ilustrado nas curvas de vagarosidade.

8.3 STC

Os resultados do método de coerência tempo e vagarosidade se mostram pouco eficaz nas análises de defeitos tanto para os casos simulados e tanto para os casos experimentais, uma vez que as simulações FEM não foram capaz de capturar as altas velocidades de fases mostradas nos casos experimentais.

8.4 Conclusão e Sugestões para Trabalhos Futuros

Conclui-se que o SAFE, validado através de diversos modelos analíticos, simulações FEM e com diversos experimentos, pode ser uma valiosa ferramenta na análise dos defeitos apresentados e, uma vez que conhecidas as propriedades e dimensões do poço, pode-se estimar o comportamento das ondas guidadas e analisar os possíveis defeitos na camada de revestimento do poço de petróleo.

Nos trabalhos futuros pretende-se desenvolver as seguintes subrotinas para o SAFE:

- Calcular o vetor de Poynting, responsável por informar o fluxo de energia, e no caso de defeitos em poços de petróleo, deverá informar a frequência ótima e o fluxo de energia em cada camada;
- Adicionar atenuação ao modelo e calcular a velocidade de energia de cada modo para se verificar quais são os modos que se propagaram;
- Criar uma camada semi-infinita ou PML para simular a condição da formação rochosa;
- Criar a uma modelagem do SAFE excêntrica com coordenadas bipolares.

Referências bibliográficas

[1] KELM, C. H.; FAUL, R. R.. **Well abandonment—a "best practices"approach can reduce environmental risk**. All Days:SPE–54344–MS, 04 1999.

[2] KHALIFEH, M.; SAASEN, A.. **Introduction to Permanent Plug and Abandonment of Wells**. Ocean Engineering & Oceanography. Springer Cham, 2020.

[3] VRÅLSTAD, T.; SAASEN, A.; FJÆR, E.; ØIA, T.; YTREHUS, J. D. ; KHALIFEH, M.. **Plug & abandonment of offshore wells: Ensuring long-term well integrity and cost-efficiency**. Journal of Petroleum Science and Engineering, 173:478–491, 2019.

[4] KIRAN, R.; TEODORIU, C.; DADMOHAMMADI, Y.; NYGAARD, R.; WOOD, D.; MOKHTARI, M. ; SALEHI, S.. **Identification and evaluation of well integrity and causes of failure of well integrity barriers (a review)**. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 45:511–526, 2017.

[5] OIL, G.. **Uk, 2021**. Oil & Gas UK Decommissioning Insight Report, 2021.

[6] CHUKWUEMEKA, A. O.; OLUYEMI, G.; MOHAMMED, A. I. ; NJUGUNA, J.. **Plug and abandonment of oil and gas wells – a comprehensive review of regulations, practices, and related impact of materials selection**. Geoenergy Science and Engineering, 226:211718, 2023.

[7] TALEGHANI, A. D.; SANTOS, L.. **Wellbore Integrity From Theory to Practice**. Springer Cham, 2023.

[8] ZHANG, B.; GUAN, Z.; LU, N.; HASAN, A. R.; WANG, Q. ; XU, B.. **Trapped annular pressure caused by thermal expansion in oil and gas wells: A review of prediction approaches, risk assessment and mitigation strategies**. Journal of Petroleum Science and Engineering, 172:70–82, 2019.

[9] ØSTERBØ, K.. **Cement bond evaluation**. Department of Mechanical and Stuctural Engineering and Materials Science University of Stavanger, Norway, 2014.

[10] BRONI-BEDIAKO, E.; JOEL, O. F. ; OFORI-SARPONG, G.. **Oil well cement additives: A review of the common types**. Oil & Gas Research, 2016.

[11] WU, Y.; ZHOU, J.; YANG, J.; QIN, W.; ZHANG, T. ; WU, Z.. **A study on the integrity evaluation of cement sheaths for deep wells in deep water**. Energies, 15(16), 2022.

[12] CORREIA, T. D. M.. **Analytical solution for the propagation of guided acoustic waves in multilayered cylinders applied to through-tubing cement bond logging in oil wells**. Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2017.

[13] WANG, D.; LI, J.; LIAN, W.; YANG, H.; LU, Z.; LIU, P. ; LIU, X.. **Simulation study of cement plug micro-annulus in milling section of abandoned wells**. Geoenergy Science and Engineering, 224:211606, 2023.

[14] AL RAMIS, H.; TEODORIU, C.; BELLO, O. ; AL MARHOON, Z.. **High definition optical method for evaluation of casing - cement microannulus (ccma)**. Journal of Petroleum Science and Engineering, 195:107719, 2020.

[15] DE ANDRADE, J.; SANGESLAND, S.. **Cement sheath failure mechanisms: Numerical estimates to design for long-term well integrity**. Journal of Petroleum Science and Engineering, 147:682–698, 2016.

[16] LIU, K.; GAO, D. ; TALEGHANI, A. D.. **Impact of casing eccentricity on cement sheath**. Energies, 11(10), 2018.

[17] SKADSEM, H. J.; GILJARHUS, K. E. T.; FREDHEIM, F. O.; VAN RIET, E. ; KEULTJES, W. J.. **Vibration-assisted annular fluid displacement for rig-less well abandonment operations**. Journal of Petroleum Science and Engineering, 215:110717, 2022.

[18] SLB. **Cement bond logging tools**. https://www.slb.com, 2007.

[19] ROUILLAC, D.. **Cement Evaluation Logging Handbook**. Technip Paris, 1994.

[20] WILSON, A.. **Technology trends in evaluating cement jobs using logging tools**. Journal of Petroleum Technology, 70(05):74–77, 05 2018.

[21] GOWIDA, A. H.; AHMAD, Z.; ELKATATNY, S. ; MAHMOUD, M.. **Cement evaluation challenges**. All Days:SPE–192360–MS, 04 2018.

[22] PROBE. **Online technical specification sheet, radii čement bond tool - hd - 2 3/4 in**. https://www.probe1.com/product/050-rb275-1000/, 2024.

[23] VIGGEN, E. M.; HÅRSTAD, E. ; KVALSVIK, J.. **Getting started with acoustic well log data using the dlisio python library on the volve data village dataset**. In: PHYSICAL ACOUSTICS, Geilo, Norway, 01 2020. Proceedings of the 43rd Scandinavian Symposium on Physical Acoustics.

[24] FRISCH, G.; FOX, P.; HUNT, D. ; KASPEREIT, D.. **Advances in cement evaluation tools and processing methods allow improved interpretation of complex cements**. All Days:SPE–97186–MS, 10 2005.

[25] BASSO, M.; SOUZA, J. P. P.; HONÓRIO, B. C. Z.; MELANI, L. H.; CHINELATTO, G. F.; BELILA, A. M. P. ; VIDAL, A. C.. **Acoustic image log facies and well log petrophysical evaluation of the barra velha formation carbonate reservoir from the santos basin, offshore brazil**. Carbonates Evaporites, 2022.

[26] ZHANG, J.; MAHBOD, P.; SHAFER, R.; MUELLER, D. ; ANDERSON, C.. **Multi-string isolation logging - a cost effective solution for p&a**. SPE, 2019.

[27] ZHANG, J.; MUELLER, D. T.; BRYCE, D.; BROCKWAY, T. A. ; ISKANDER, F.. **Case studies on multi-string isolation evaluation in p&a operations**. 2021.

[28] LIU, Y.; D'ANGELO, R. M.; SINHA, B. K. ; ZEROUG, S.. **Theoretical and experimental investigations of acoustic waves in embedded fluid-solid multi-string structures**. Applied Physics Letters, 110(10):101906, 03 2017.

[29] LIU, Y.; D'ANGELO, R. M.; CHOI, G.; ZHU, L.; BOSE, S. ; ZEROUG, S.. **Understanding acoustic physics in oil and gas wellbores with the presence of ubiquitous geometric eccentricity**. AIP Conference Proceedings, 1949(1):020018, 04 2018.

[30] DE SOUZA, L. P. B.; FERREIRA, G. R. B.; CAMERINI, I. G.; CORREIA, T. D. M.; RIBEIRO, M. G. D. C.; HIDALGO, J. A. S.; DE SÃO JOÃO, B. L. D.; LLERENA, R. W. A.; KUBRUSLY, A. C.; AYALA, H. V. H.; BRAGA, A. M. B. ; BATISTA, J. H. G.. **Machine learning-based cement integrity evaluation with a through-tubing logging experimental setup**. Geoenergy Science and Engineering, 227:211882, 2023.

[31] ZEGHLACHE, M. L.; MARROQUIN, I.; ROURKE, M.; YANG, Q. ; TARASOV, A.. **Real-time eccentricity correction of through-tubing cement log data using machine learning**. Day 3 Thu, February 29, 2024:D031S028R004, 02 2024.

[32] CAMERINI, I. G.; FERREIRA, G. R. B.; DE SOUZA, L. P. B.; HIDALGO, J. A. S.; CORREIA, T. M.; RODRIGUES, A. S. ; BATISTA, J. H. G.. **Machine learning assisted cement integrity evaluation during plugging and abandonment operations**. Day 4 Thu, October 05, 2023:D041S127R001, 10 2023.

[33] FERREIRA, G. R. B.; CAMERINI, I. G.; RODRIGUES, A. S.; CORREIA, T. M.; DE SOUZA, L. P. B.; HIDALGO, J. A. S.; PENATTI, J. R. R. ; SOARES, L. N. A. C.. **Supervised machine learning applied to cement integrity assessment – a comparison between models and feature extraction techniques**. Day 2 Wed, March 06, 2024:D022S004R001, 03 2024.

[34] FRANCO, J. L. A.; ORTIZ, M. A. M.. **Sonic investigations in and around the borehole**. 2006.

[35] SAKIYAMA, N.; KINOSHITA, T.; TORII, K.; ENDO, T. ; YAMAMOTO, H.. **Dipole sonic dispersion in poorly cemented and well-cemented cased holes**. In: SOCIETY OF EXPLORATION GEOPHYSICISTS SEG TECHNICAL PROGRAM EXPANDED ABSTRACTS 2017 - HOUSTON, TEXAS, 2017.

[36] YANG, J.; SINHA, B. K. ; HABASHY, T. M.. **Estimation of formation shear and borehole-fluid slownesses using sonic dispersion data in well-bonded cased boreholes**. GEOPHYSICS, 2011.

[37] MENG-EN, Y.; WEI-GUO, L.; YANG, W.; ZHI-WEN, C. ; JIN-XIA, L.. **Numerical study of dispersion characteristics of dipole flexural waves in a cased hole with different cement conditions**. APPLIED GEOPHYSICS, 2022.

[38] VIGGEN, E. M.; DIEZ, A. ; JOHANSEN, T. F.. **Pyintegrity: An open-source toolbox for processing ultrasonic pulse-echo well integrity log data**. Day 1 Wed, April 17, 2024:D011S003R007, 04 2024.

[39] BRAGA, A. M. B.; BARBONE, P. E. ; HERRMANN, G.. **Wave propagation in fluid-loaded laminated cylindrical shells**. Applied Mechanics Reviews, 43(5S):S359–S365, 05 1990.

[40] BRAGA, A. M. B.; ARONI, C. R.. **High-frequency response of isotropic-laminated cylindrical shells modeled by a layer-wise theory**. International journal of solids and structures, 42(14):4278–4294, 2005.

[41] CORREIA, T. D. M.; DE SOUZA, L. P. B.; HIDALGO, J. A. S.; RIBEIRO, M. G. D. C.; CAMERINI, I. G.; DE SOUSA, B. G.; KUBRUSLY, A. C.; AYALA, H. V. H.; BATISTA, DE ALMEIDA, J. H. G. ; VALLADARES, R.. **Analytical and numerical modeling of throughtubing acoustic logging**. In: RIO OIL & GAS EXPO AND CONFERENCE, RIO DE JANEIRO, RJ, BRAZIL, 2020.

[42] JUNQUEIRA, B. F.; LEIDERMAN, R. ; CASTELLO, D. A.. **An analytical–numerical formulation to modelling wave propagation in double-cased oil wells**. Wave Motion, 112:102942, 2022.

[43] SMOLARKIEWICZ, P. P.; NOGUEIRA, C. L. ; WILLAM, K. J.. **Ultrasonic evaluation of damage in heterogeneous concrete materials**. 2000.

[44] MOSER, F.; JACOBS, L. J. ; QU, J.. **Modeling elastic wave propagation in waveguides with the finite element method**. NDT & E International, 32(4):225–234, 1999.

[45] LYU, F.; ZHOU, X.; DING, Z.; QIAO, X. ; SONG, D.. **Application research of ultrasonic-guided wave technology in pipeline corrosion defect detection: A review**. Coatings, 14(3), 2024.

[46] OTERO, J.; GALARZA, N.; RUBIO, B. ; MORENO, E.. **Semi-analytical finite elements methods for dispersion curves using higher order elements for long range ultrasonic testing**. In: 2009 IEEE INTERNATIONAL ULTRASONICS SYMPOSIUM, p. 1966–1969, 2009.

[47] LIU, Y.; D'ANGELO, R. M.; SINHA, B. K. ; ZEROUG, S.. **Acoustic guided waves in cylindrical solid-fluid structures: Modeling with a sweeping frequency finite element method and experimental validation**. AIP Conference Proceedings, 1806(1):030004, 02 2017.

[48] KALKOWSKI, M. K.; MUGGLETON, J. M. ; RUSTIGHI, E.. **Axisymmetric semi-analytical finite elements for modelling waves in buried/submerged fluid-filled waveguides**. Computers & Structures, 196:327–340, 2018.

[49] VAN VELSOR, J. K.. **Circumferential Guided Waves in Elastic and Viscoelastic Multilayered Annuli**. PhD thesis, The Pennsylvania State University, 2009.

[50] VIOLA, E.. **Basic Equations of the Linearized Theory of Elasticity: a Brief Review**, p. 1–15. Springer Vienna, Vienna, 2007.

[51] KINSLER, L. E.; FREY, A. R.; COPPENS, A. B. ; SANDERS, J. V.. **Fundamentals of Acoustics**. John Wiley & Sons, fourth edition, 2000.

[52] DAVIDSSON, P.. **Structure-acoustic analysis; finite element modelling and reduction methods**. Doctoral Thesis Lund University, 2004.

[53] EVERSTINE, G.. **Finite element formulatons of structural acoustics problems**. Computers & Structures, 65(3):307–321, 1997.

[54] OLSON, L. G.; BATHE, K.-J.. **Analysis of fluid-structure interactions. a direct symmetric coupled formulation based on the fluid velocity potential**. Computers & Structures, 21(1):21–32, 1985.

[55] NIELSEN, C.. **Semi-analytical finite element method for guided waves in civil engineering plate-like structures**. Lund University, 2015.

[56] ROSE, J. L.. **Ultrasonic guided waves in solid media**. Cambridge University Press, pennsylvania state university edition, 2014.

[57] SCHMERR, L. W. J.. **Fundamentals of Ultrasonic Nondestructive Evaluation, A Modeling Approach**. Springer, second edition, 2016.

[58] ROYER, D.; DIEULESAINT, E.. **Free and Guided Propagation**. Spring-Verlag Berlin Heilberg, 2000.

[59] GROTH, E. B.; ITURRIOZ, I. ; CLARKE, T. G. R.. **The dispersion curve applied in guided wave propagation in prismatic rods.** Latin American Journal of Solids and Structures, 15(6):e83, 2018.

[60] NILSSON, C.; FINNVEDEN, S.. **Waves in thin-walled fluid-filled ducts with arbitrary cross-sections**. Journal of Sound and Vibration, 310(1):58–76, 2008.

[61] VIOLA, E.; MARZANI, A. ; BARTOLI, I.. **Semi-analytical Formulation for Guided Wave Propagation**, p. 105–121. Springer Vienna, Vienna, 2007.

[62] AKYOL, C. G.. **Semi-analytical finite element modeling for dispersion analysis of multilayered structures**. Izmir Institute of Technology, 2017.

[63] DUAN, W.; KIRBY, R.. **Guided wave propagation in buried and immersed fluid-filled pipes: Application of the semi analytic finite element method**. Computers & Structures, 212:236–247, 2019.

[64] YAPURA, C. L.; KINRA, V. K.. **Guided waves in a fluid-solid bilayer**. Wave Motion, 1995.

[65] GIURGIUTIU, V.; HAIDER, M. F.. **Propagating, evanescent, and complex wavenumber guided waves in high-performance composites**. Materials, 2019.

[66] VIGGEN, E. M.; JOHANSEN, T. F. ; MERCIU, I.-A.. **Simulation and modeling of ultrasonic pitch-catch through-tubing logging**. Geophysics, 81(4):D383–D393, 2016.

[67] NANDY, A.; MULLICK, S.; DE, S. ; DATTA, D.. **Numerical simulation of ultrasonic wave propagation in flawed domain**. National Siminar & Exhibition on NDE, India, 2009.

[68] BARTOLI, I.; LANZA DI SCALEA, F.; FATEH, M. ; VIOLA, E.. **Modeling guided wave propagation with application to the long-range defect detection in railroad tracks**. NDT & E International, 38(5):325–334, 2005.

[69] OPPENHEIM, A. V.; WILLSKY, A. S.; NAWAB, S. H.; HERNÁNDEZ, G. M. ; OTHERS. **Signals & systems**. Pearson Educación, 1997.

[70] XU, S.. **Integrated multipole acoustic modeling and processing in general stressed formations, part 2: A well case study**. Geoenergy Science and Engineering, 233:212484, 2024.

[71] KIMBALL, C. V.; MARZETTA, T. L.. **Semblance processing of borehole acoustic array data**. Geophysics, 49(3):274–281, 03 1984.

[72] REYNA, C. A. B.. **Determinação de teor de água em emulsões de água em petróleo usando técnicas ultrassônicas**. Escola Politécnica, University of São Paulo, 2024.

[73] WANG, H.; TAO, G. ; SHANG, X.. **Understanding acoustic methods for cement bond logginga**. The Journal of the Acoustical Society of America, 139(5):2407–2416, 05 2016.

A
Dados FEM

Neste apêndice apresenta-se os dados brutos FEM, seguindo a ordem, figura (a) o caso NT, figura (b) o caso NE, figura (c) o caso E1 e figura (d) o caso E2.

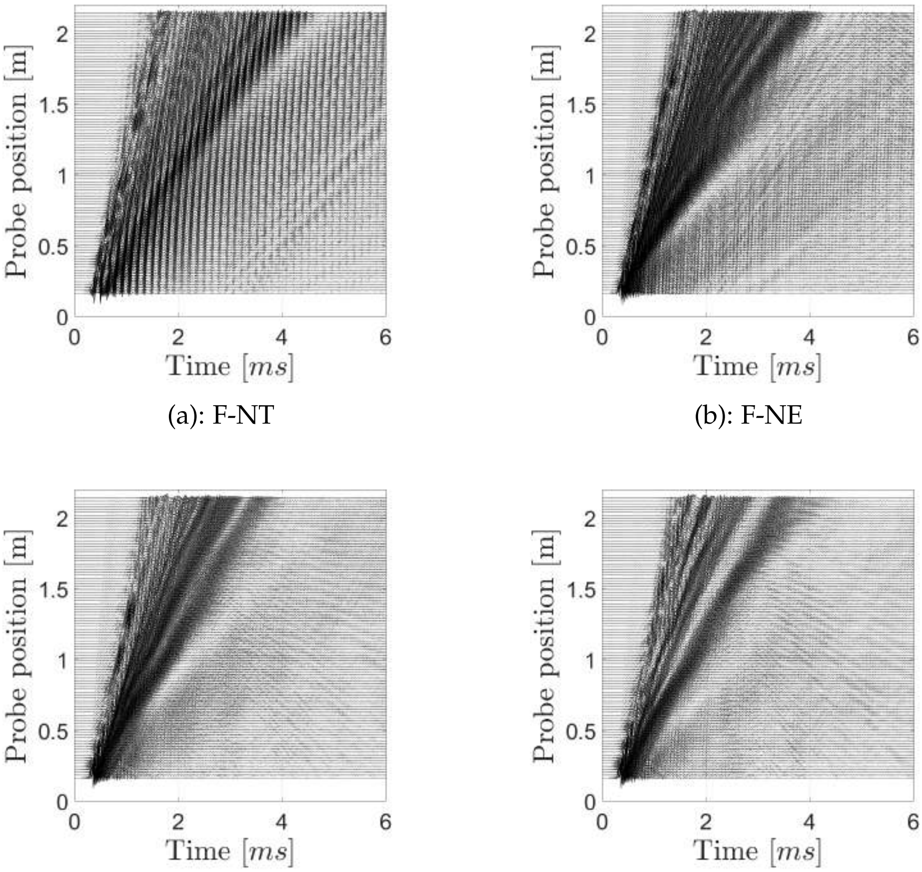
A.1
Domínio do Tempo, Posição-Tempo

Nesta seção são mostrados os resultados FEM no domínio do tempo.

Continua na próxima página.

A.1.1
Caso F

Nesta subseção apresenta-se os resultados FEM para o caso F no domínio do tempo.

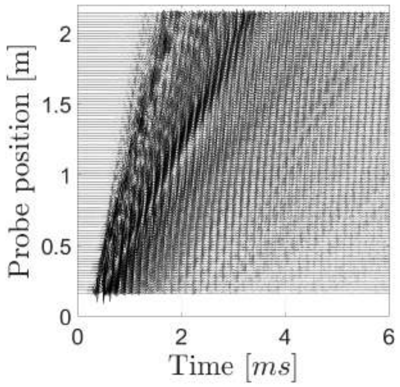


(a): F-NT
(b): F-NE
(c): F-E1
(d): F-E2

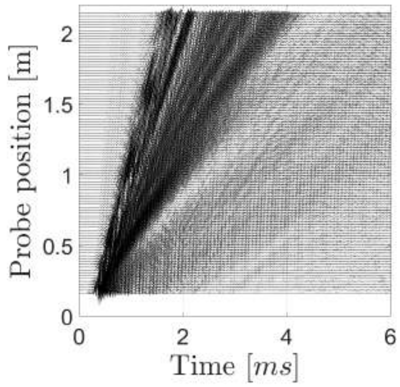
Figura A.1: Simulação, domínio do tempo, caso F

A.1.2
Caso C

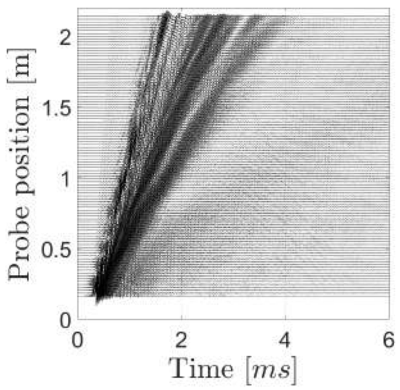
Nesta subseção são mostrados os resultados FEM para o caso C no domínio do tempo.



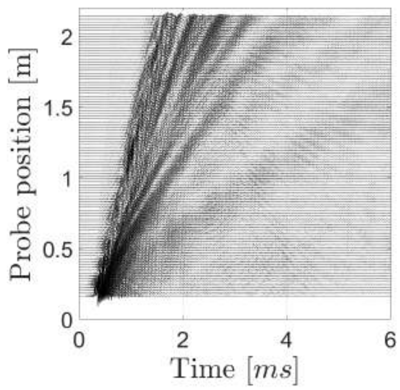
(a): C-NT



(b): C-NE



(c): C-E1



(d): C-E2

Figura A.2: Simulação, domínio do tempo, caso C

A.1.3
Caso CH

Nesta subseção são mostrados os resultados FEM para o caso CH no domínio do tempo.

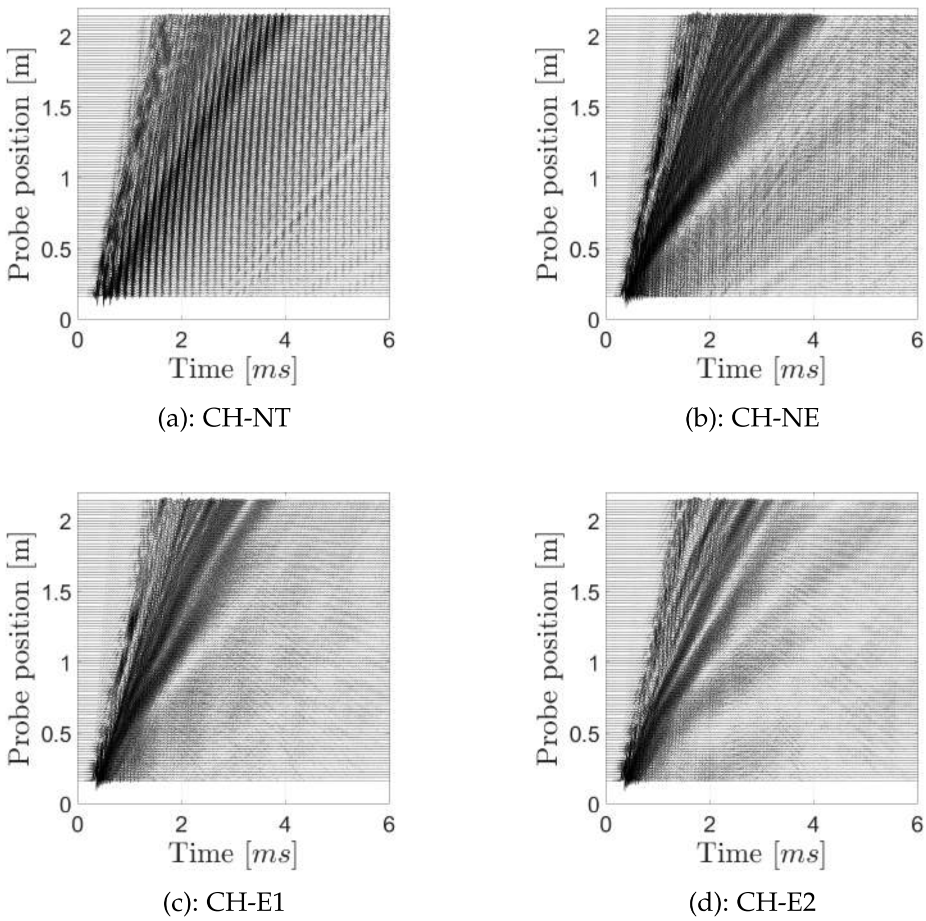
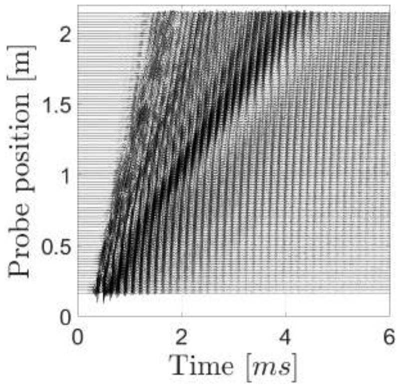


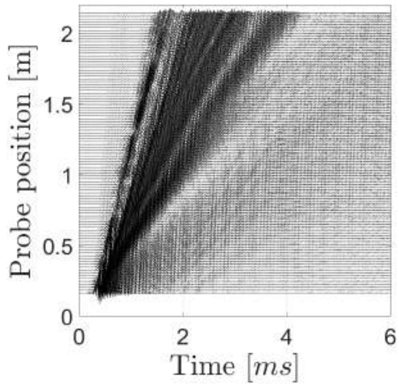
Figura A.3: Simulação, domínio do tempo, caso CH

A.1.4
Caso CL

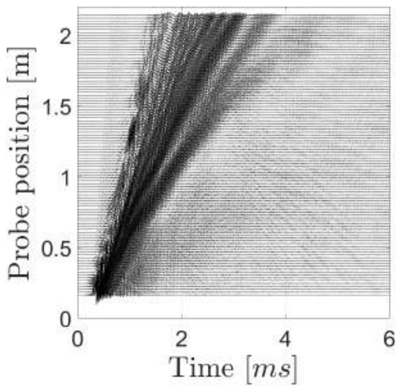
Nesta subseção são mostrados os resultados FEM para o caso CL no domínio do tempo.



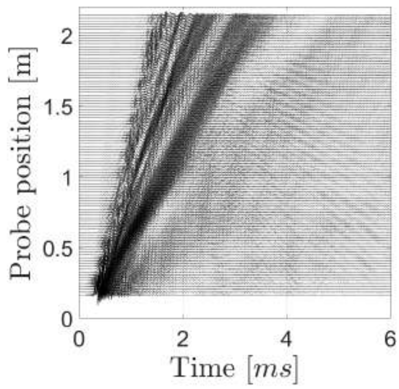
(a): CL-NT



(b): CL-NE



(c): CL-E1



(d): CL-E2

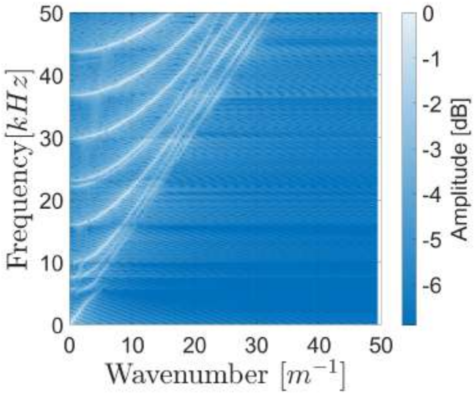
Figura A.4: Simulação, domínio do tempo, caso CL

A.2
Domínio da Frequência, Número de onda - Frequência

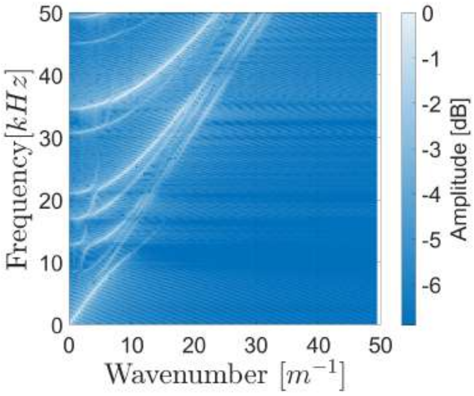
Nesta seção são mostrados os resultados FEM no domínio da frequência para gráfico número de onda por frequência.

A.2.1
Caso F

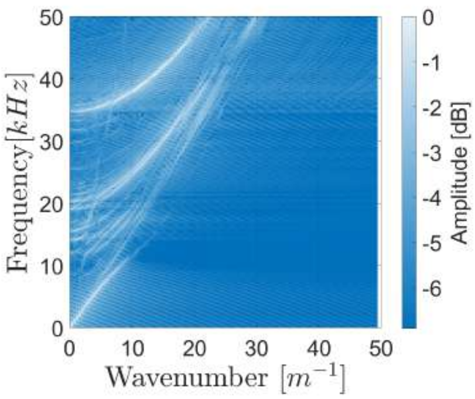
Nesta subseção são mostrados os resultados FEM para o caso F no domínio da frequência para gráfico número de onda por frequência.



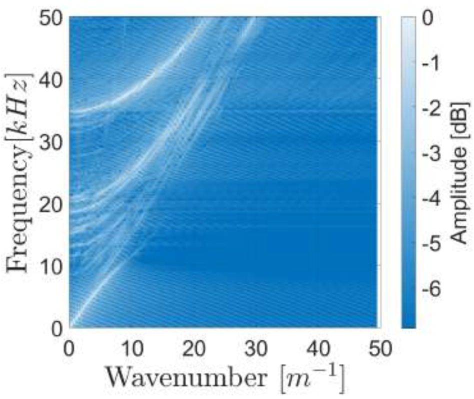
(a): F-NT



(b): F-NE



(c): F-E1

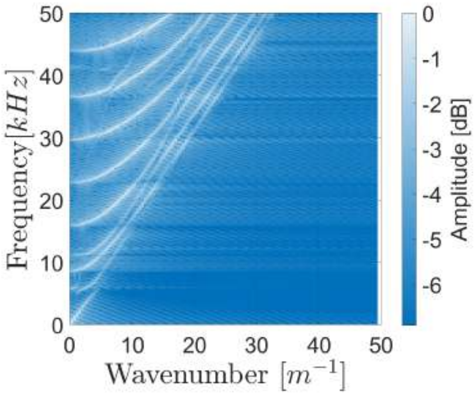


(d): F-E2

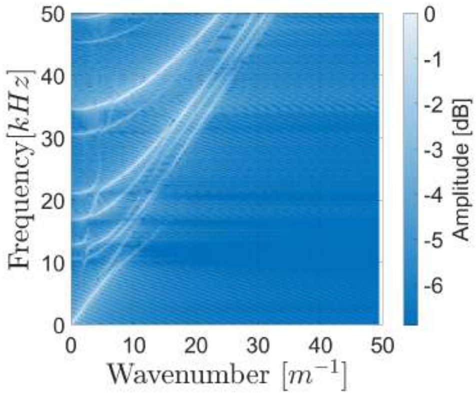
Figura A.5: Simulação, domínio da frequência, caso F

A.2.2
Caso C

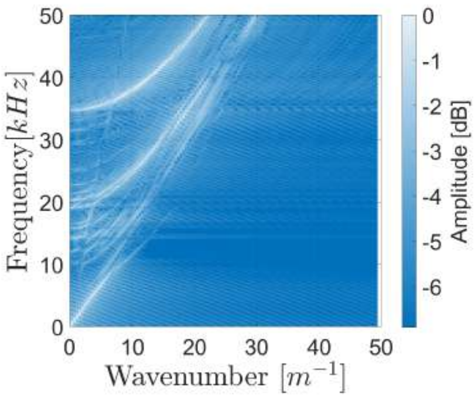
Nesta subseção são mostrados os resultados FEM para o caso C no domínio da frequência para gráfico número de onda por frequência.



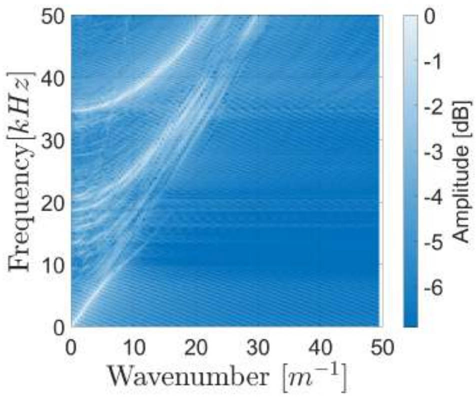
(a): C-NT



(b): C-NE



(c): C-E1

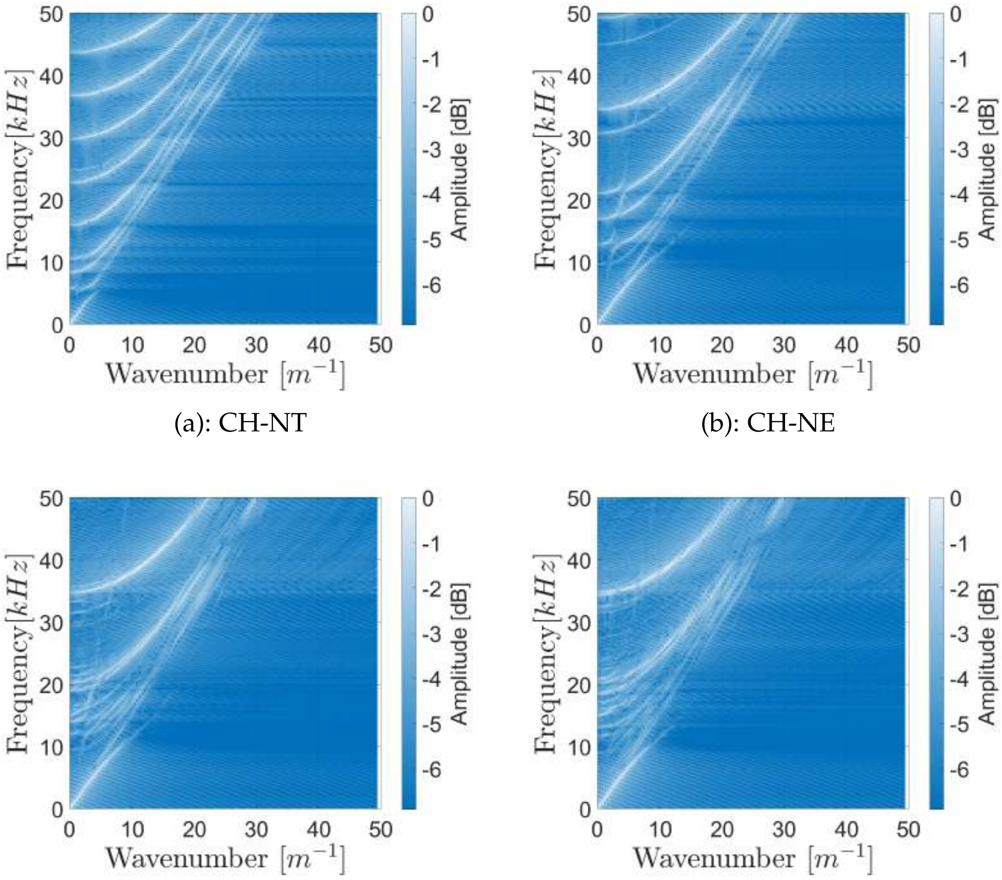


(d): C-E2

Figura A.6: Simulação, domínio da frequência, caso C

A.2.3
Caso CH

Nesta subseção são mostrados os resultados FEM para o caso CH no domínio da frequência para gráfico número de onda por frequência.



(a): CH-NT

(b): CH-NE

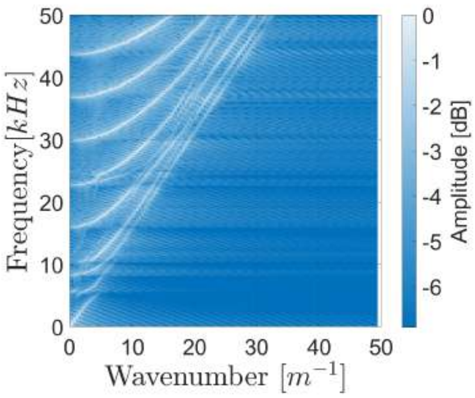
(c): CH-E1

(d): CH-E2

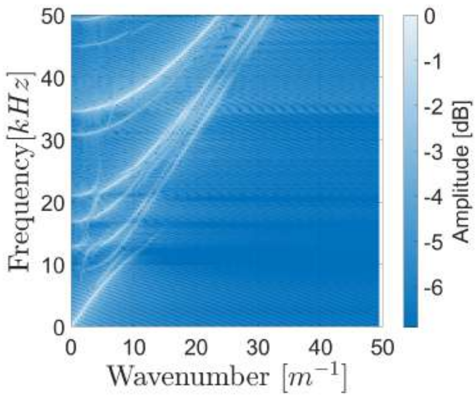
Figura A.7: Simulação, domínio da frequência, caso CH

A.2.4
Caso CL

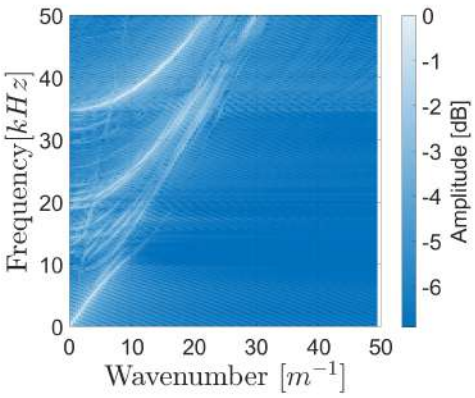
Nesta subseção são mostrados os resultados FEM para o caso CL no domínio da frequência para gráfico número de onda por frequência.



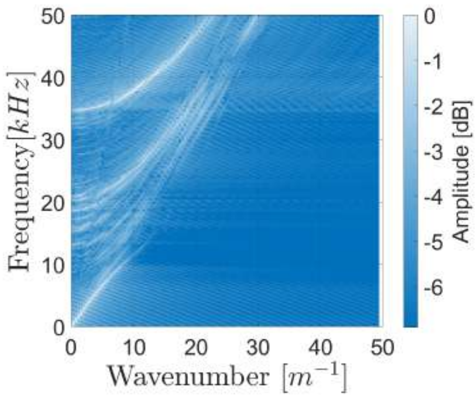
(a): CL-NT



(b): CL-NE



(c): CL-E1



(d): CL-E2

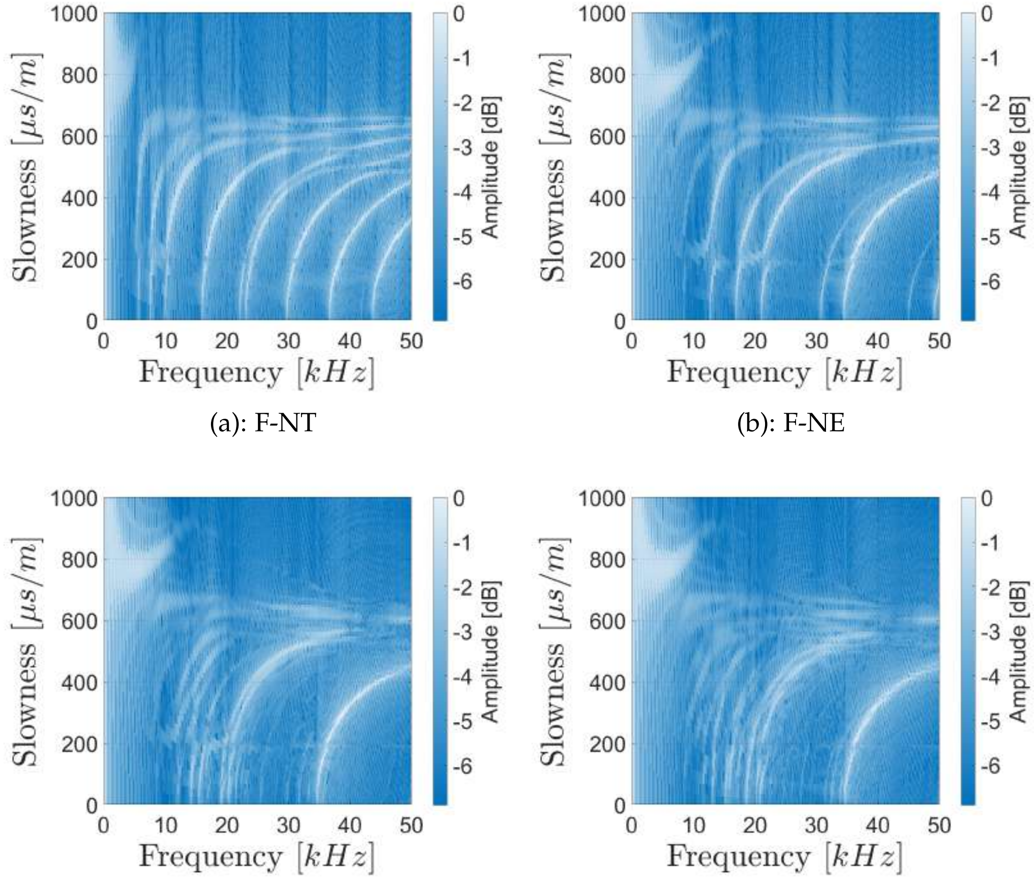
Figura A.8: Simulação, domínio da frequência, caso CL

A.3
Domínio da Frequência, Frequência - Vagarosidade

Nesta seção são mostrados os resultados FEM no domínio da frequência para gráfico frequência por vagarosidade.

A.3.1
Caso F

Nesta subseção são mostrados os resultados FEM para o caso F no domínio da frequência para gráfico frequência por vagarosidade.



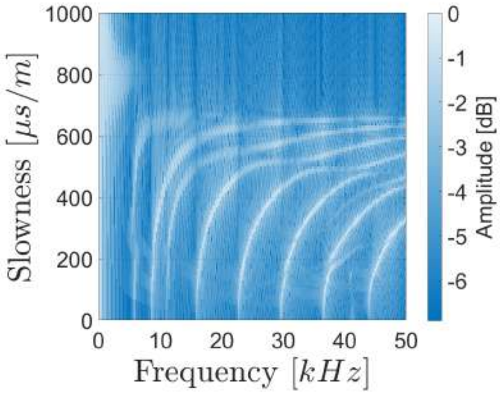
(a): F-NT (b): F-NE

(c): F-E1 (d): F-E2

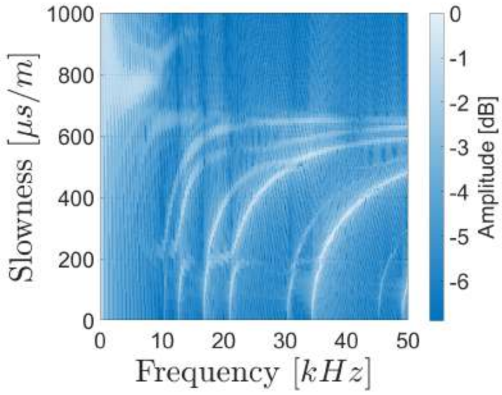
Figura A.9: Simulação, domínio da frequência, caso F

A.3.2
Caso C

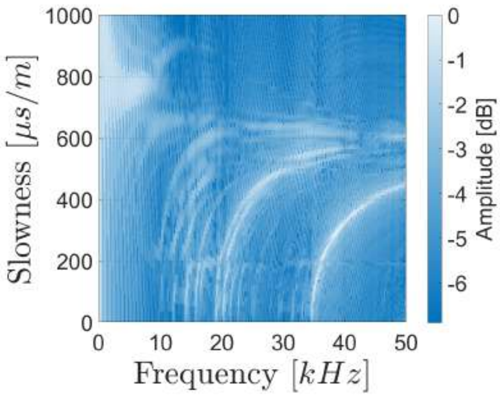
Nesta subseção são mostrados os resultados FEM para o caso C no domínio da frequência para gráfico frequência por vagarosidade.



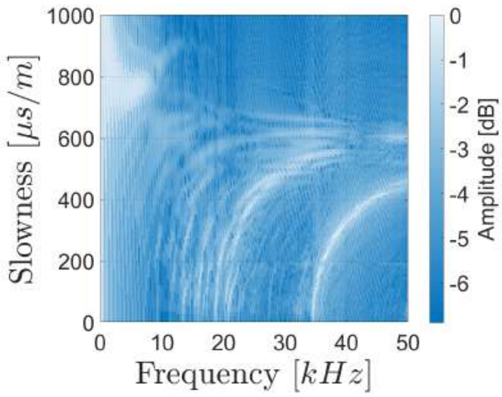
(a): C-NT



(b): C-NE



(c): C-E1

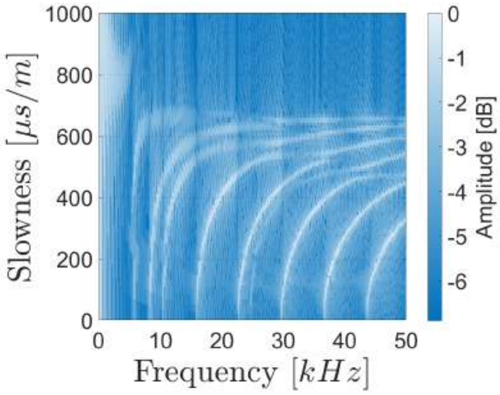


(d): C-E2

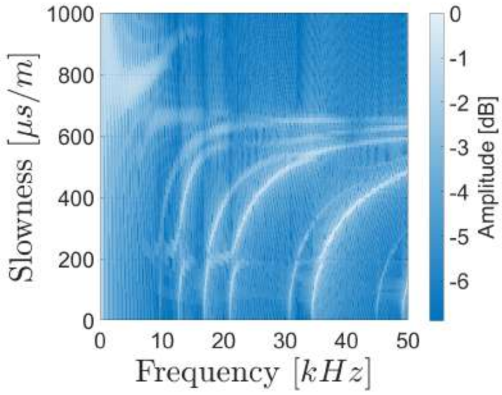
Figura A.10: Simulação, domínio da frequência, caso C

A.3.3
Caso CH

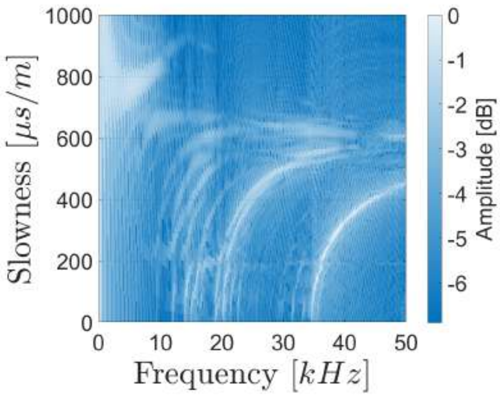
Nesta subseção são mostrados os resultados FEM para o caso CH no domínio da frequência para gráfico frequência por vagarosidade.



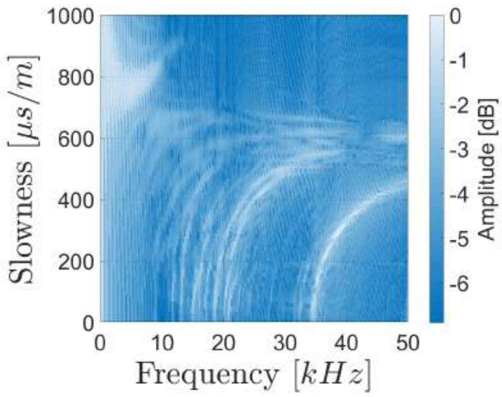
(a): CH-NT



(b): CH-NE



(c): CH-E1

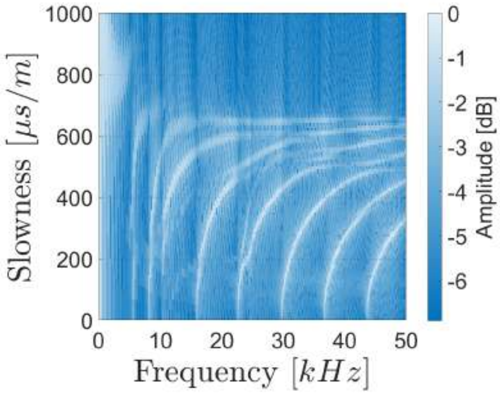


(d): CH-E2

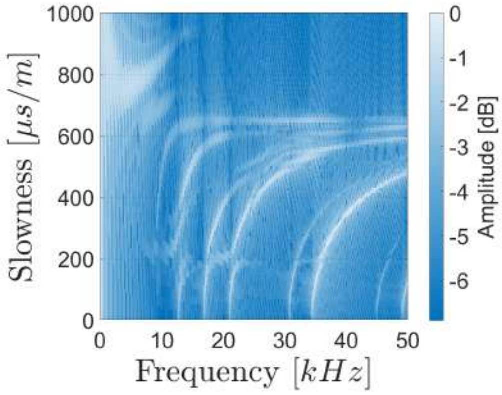
Figura A.11: Simulação, domínio da frequência, caso CH

A.3.4
Caso CL

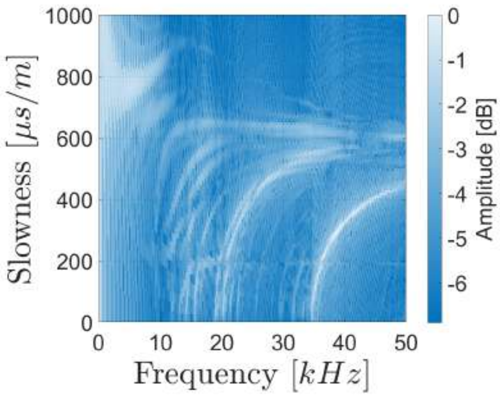
Nesta subseção são mostrados os resultados FEM para o caso CL no domínio da frequência para gráfico frequência por vagarosidade.



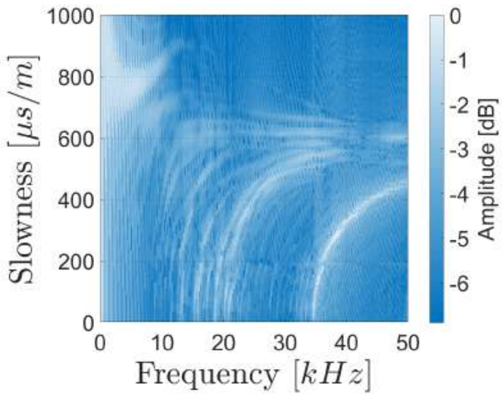
(a): CL-NT



(b): CL-NE



(c): CL-E1



(d): CL-E2

Figura A.12: Simulação, domínio da frequência, caso CL

B
Dados Experimentais

Neste apêndice apresenta-se os dados brutos experimentais, sendo, figura (a) o caso NT, figura (b) o caso NE, figura (c) o caso E1 e figura (d) o caso E2.

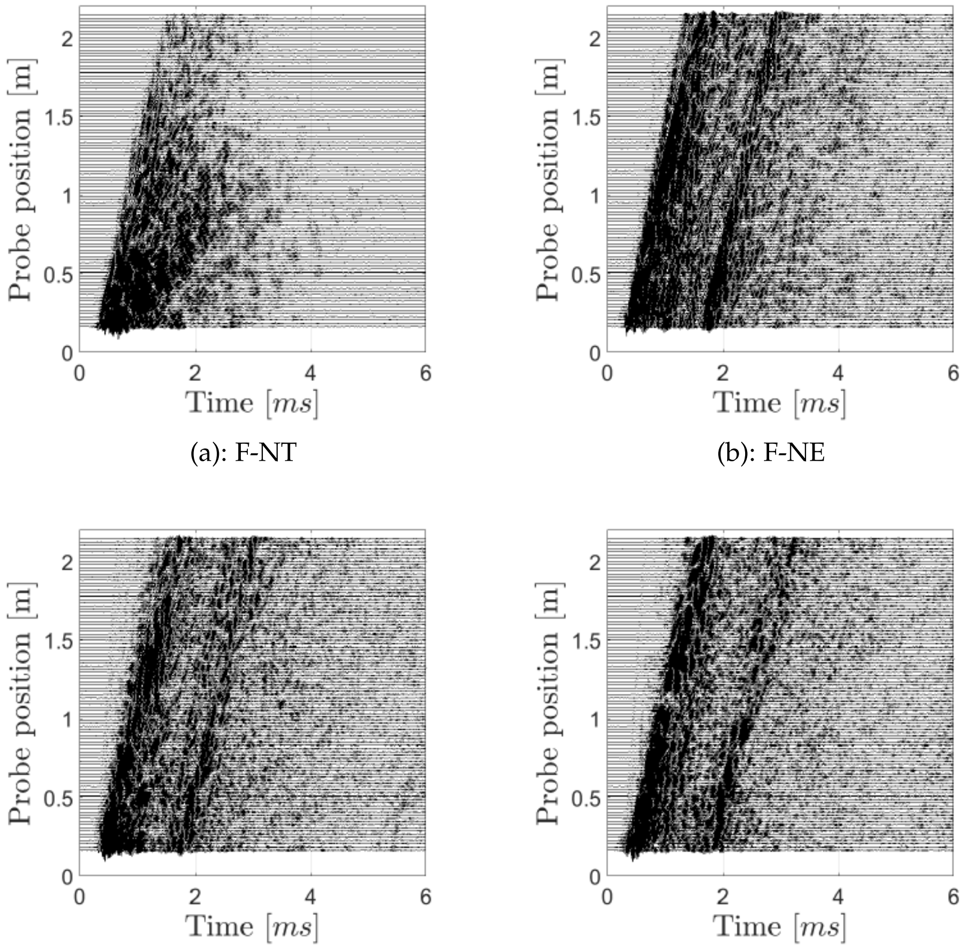
B.1
Domínio do Tempo, Posição-Tempo

Nesta seção são mostrados os resultados experimentais no domínio do tempo.

Continua na próxima página.

B.1.1
Caso F

Nesta subseção são mostrados os resultados experimentais para o caso F no domínio do tempo.



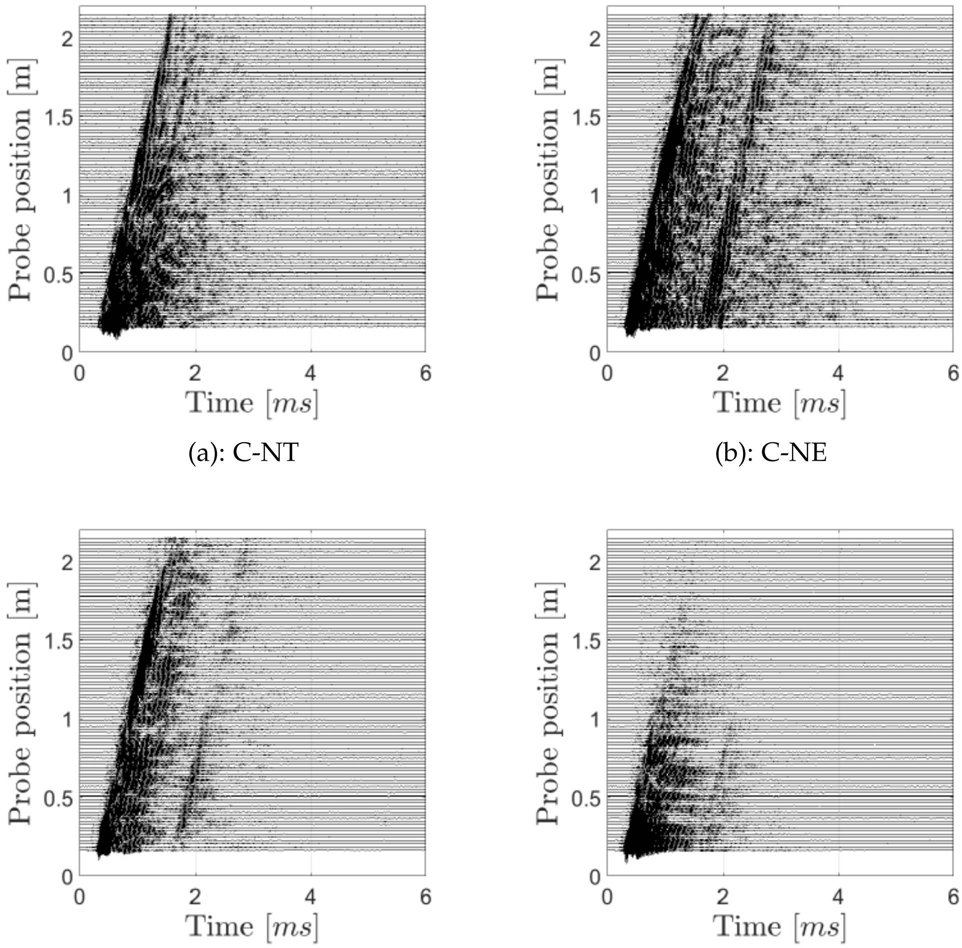
(a): F-NT (b): F-NE

(c): F-E1 (d): F-E2

Figura B.1: Experimento, domínio do tempo, caso F

B.1.2
Caso C

Nesta subseção são mostrados os resultados experimentais para o caso C no domínio do tempo.



(a): C-NT

(b): C-NE

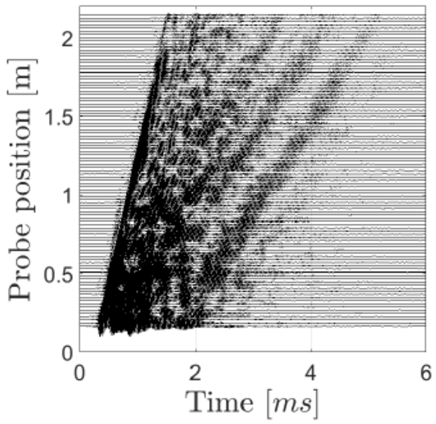
(c): C-E1

(d): C-E2

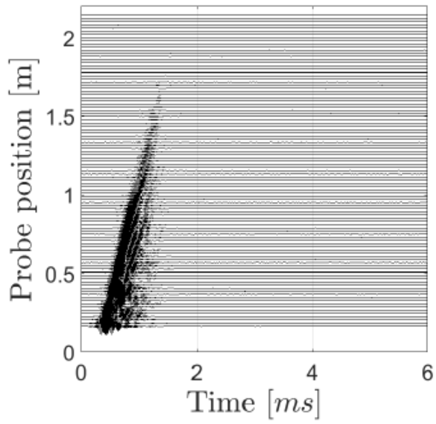
Figura B.2: Experimento, domínio do tempo, caso C

B.1.3
Caso CH

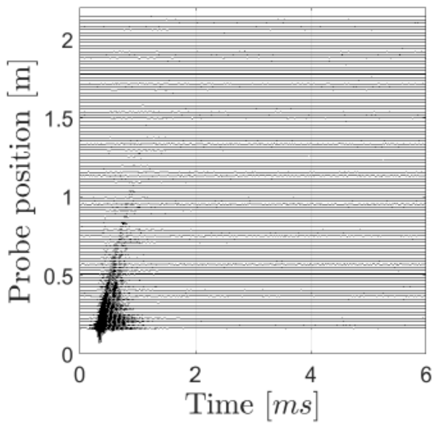
Nesta subseção são mostrados os resultados experimentais para o caso CH no domínio do tempo.



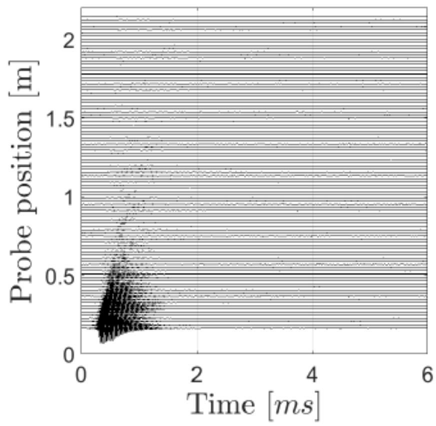
(a): CH-NT



(b): CH-NE



(c): CH-E1

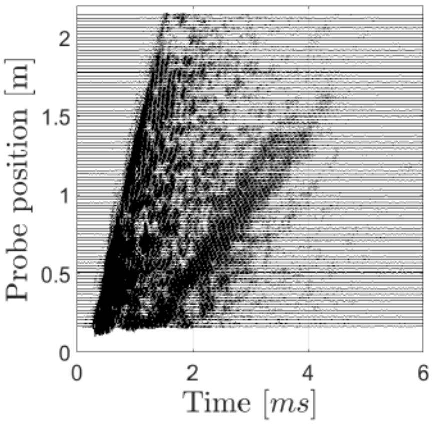


(d): CH-E2

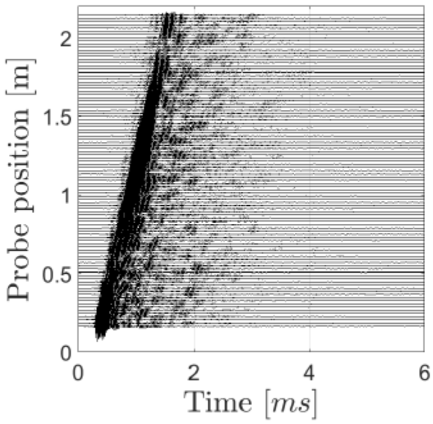
Figura B.3: Experimento, domínio do tempo, caso CH

B.1.4
Caso CL

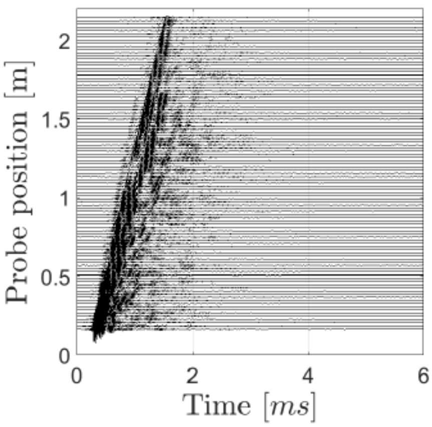
Nesta subseção são mostrados os resultados experimentais para o caso CL no domínio do tempo.



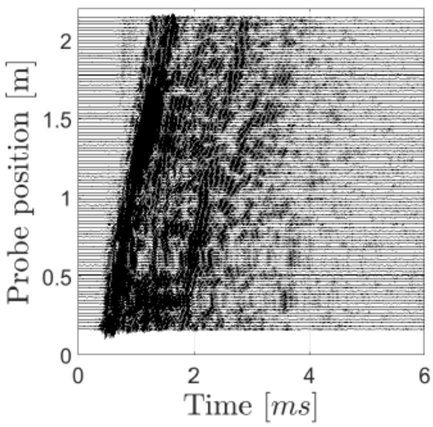
(a): CL-NT



(b): CL-NE



(c): CL-E1



(d): CL-E2

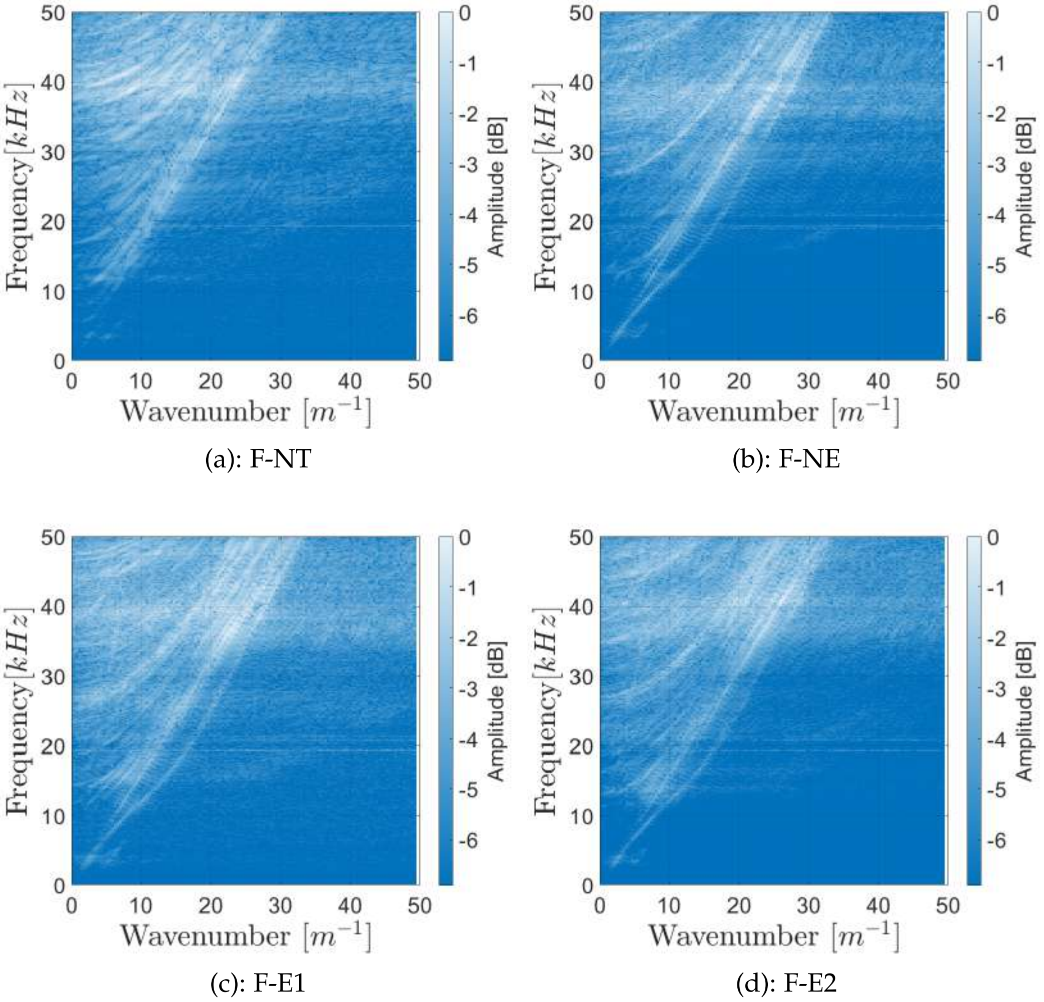
Figura B.4: Experimento, domínio do tempo, caso CL

B.2
Domínio da Frequência, Número de onda - Frequência

Nesta seção são mostrados os resultados experimentais no domínio da frequência para gráfico número de onda por frequência.

B.2.1
Caso F

Nesta subseção são mostrados os resultados experimentais para o caso F no domínio da frequência para gráfico número de onda por frequência.



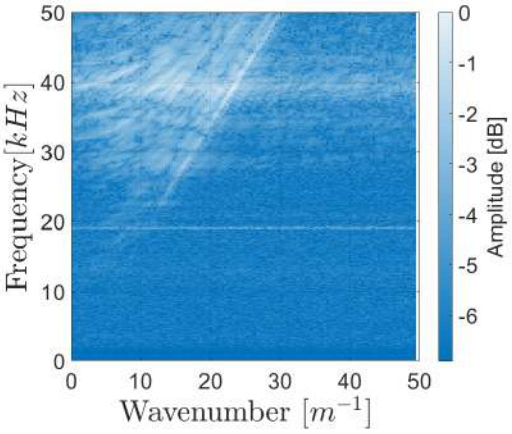
(a): F-NT (b): F-NE

(c): F-E1 (d): F-E2

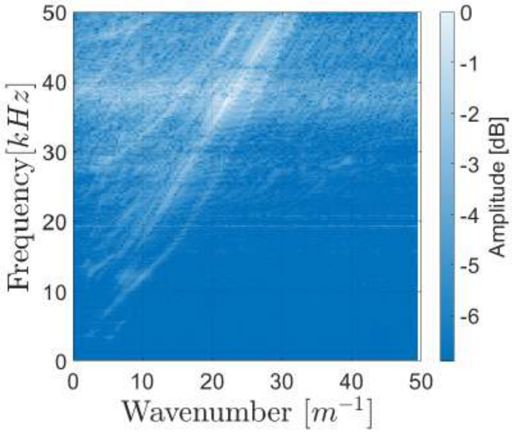
Figura B.5: Experimento, domínio da frequência, caso F

B.2.2 Caso C

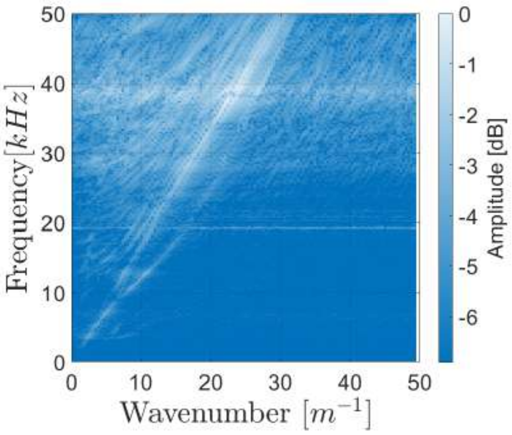
Nesta subseção são mostrados os resultados experimentais para o caso C no domínio da frequência para gráfico número de onda por frequência.



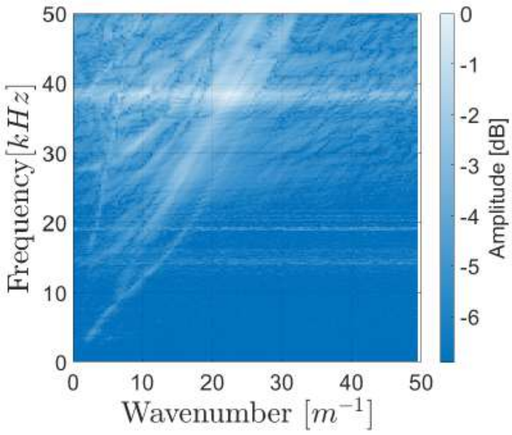
(a): C-NT



(b): C-NE



(c): C-E1

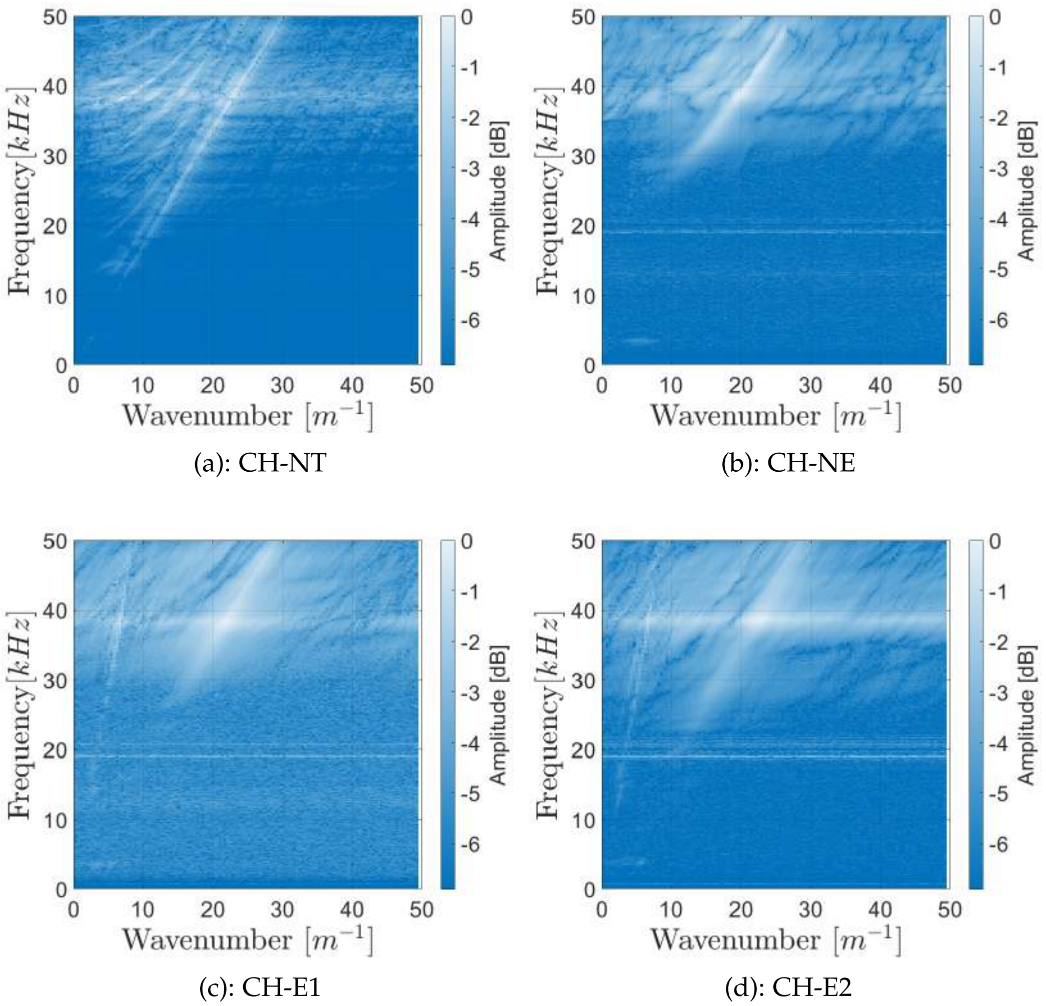


(d): C-E2

Figura B.6: Experimento, domínio da frequência, caso C

B.2.3 Caso CH

Nesta subseção são mostrados os resultados experimentais para o caso CH no domínio da frequência para gráfico número de onda por frequência.

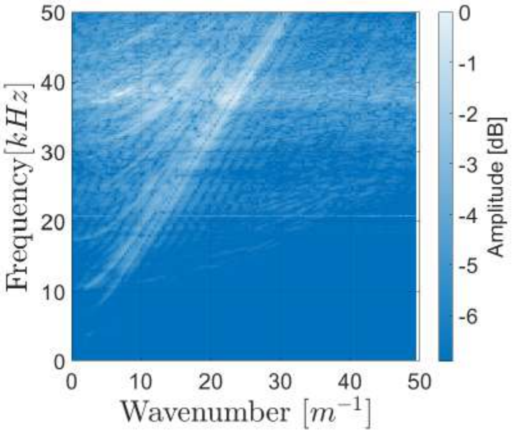


(a): CH-NT
(b): CH-NE
(c): CH-E1
(d): CH-E2

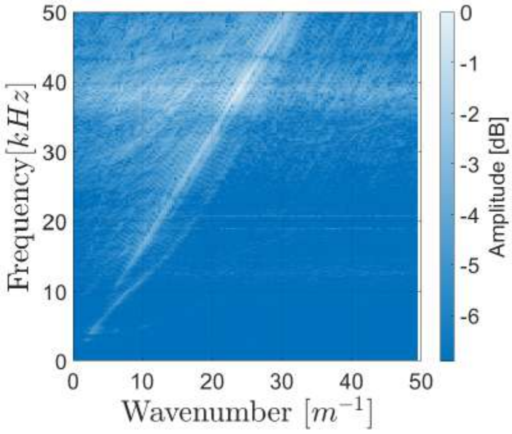
Figura B.7: Experimento, domínio da frequência, caso CH

B.2.4
Caso CL

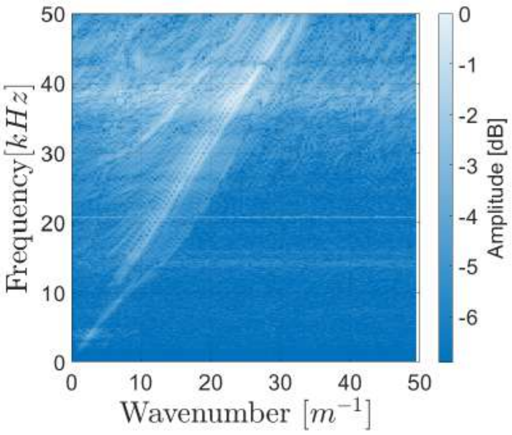
Nesta subseção são mostrados os resultados experimentais para o caso CL no domínio da frequência para gráfico número de onda por frequência.



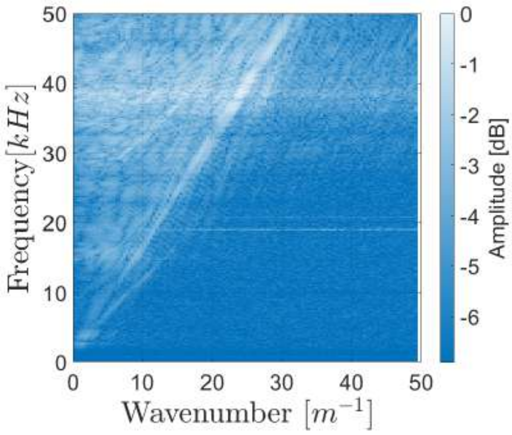
(a): CL-NT



(b): CL-NE



(c): CL-E1



(d): CL-E2

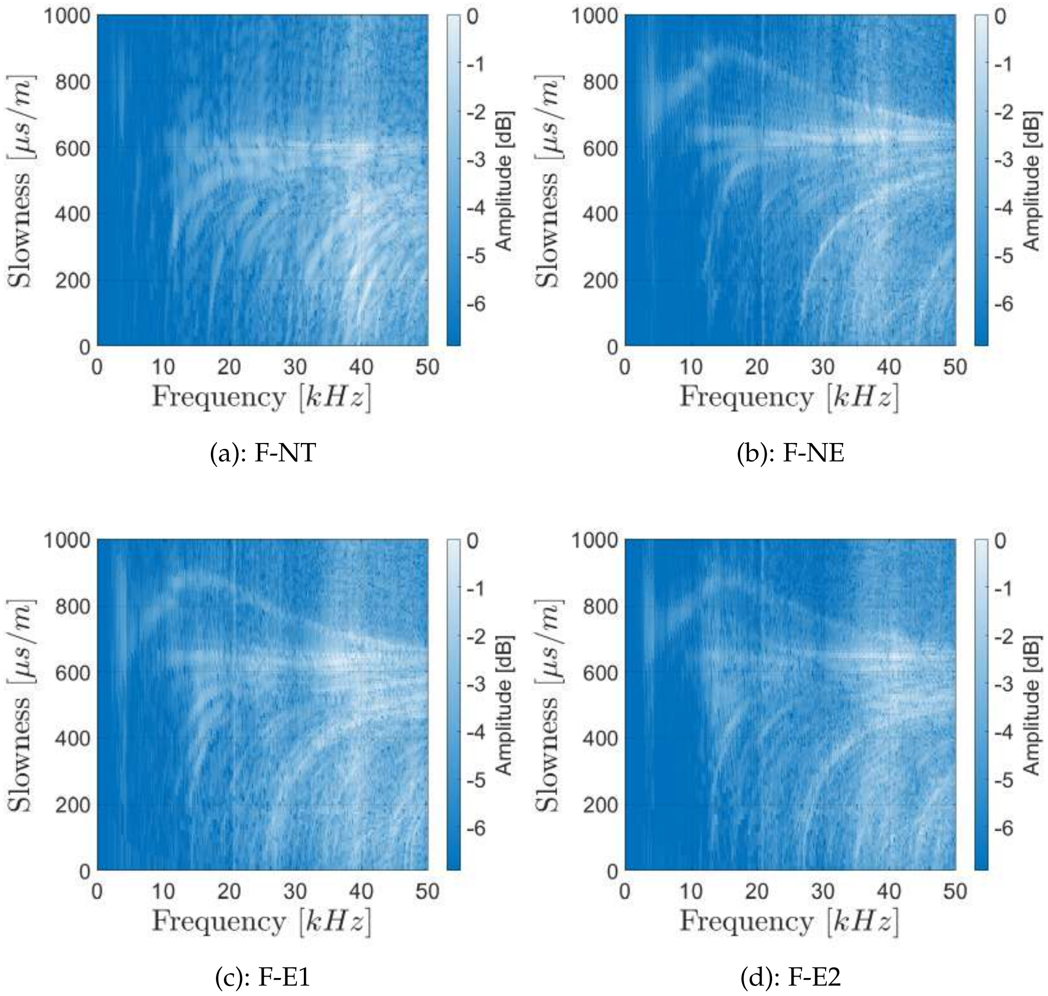
Figura B.8: Experimento, domínio da frequência, caso CL

B.3
Domínio da Frequência, Frequência - Vagarosidade

Nesta seção são mostrados os resultados experimentais no domínio da frequência para gráfico frequência por vagarosidade.

B.3.1
Caso F

Nesta subseção são mostrados os resultados experimentais para o caso F no domínio da frequência para gráfico frequência por vagarosidade.



(a): F-NT

(b): F-NE

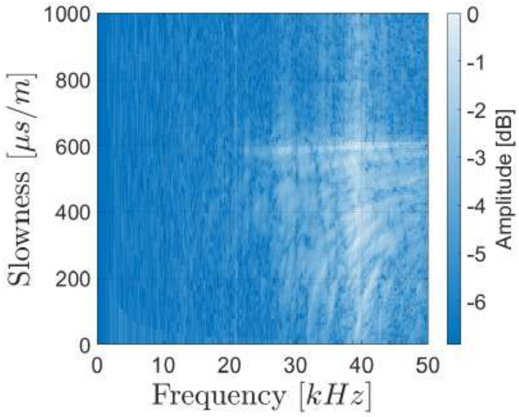
(c): F-E1

(d): F-E2

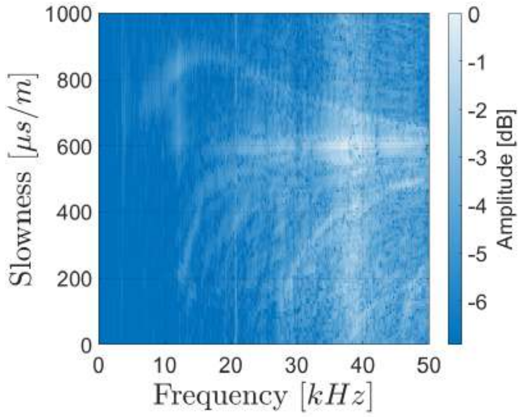
Figura B.9: Experimento, domínio da frequência, caso F

B.3.2
Caso C

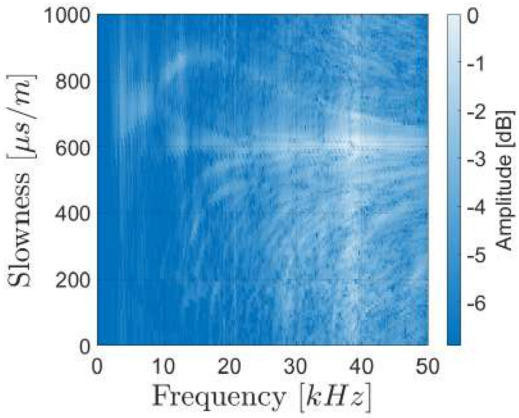
Nesta subseção são mostrados os resultados experimentais para o caso C no domínio da frequência para gráfico frequência por vagarosidade.



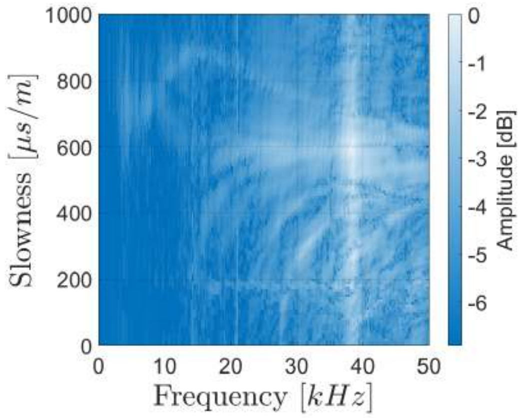
(a): C-NT



(b): C-NE



(c): C-E1

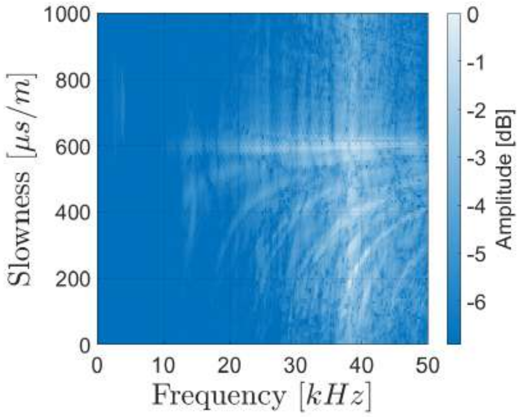


(d): C-E2

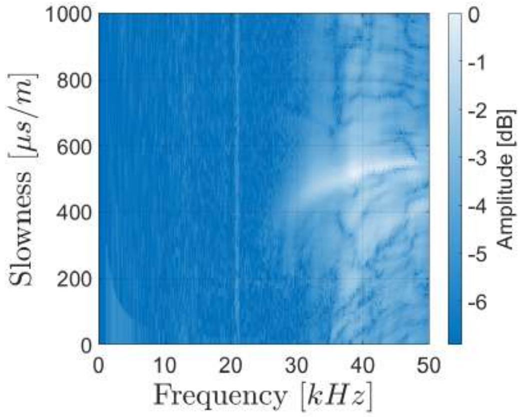
Figura B.10: Experimento, domínio da frequência, caso C

B.3.3
Caso CH

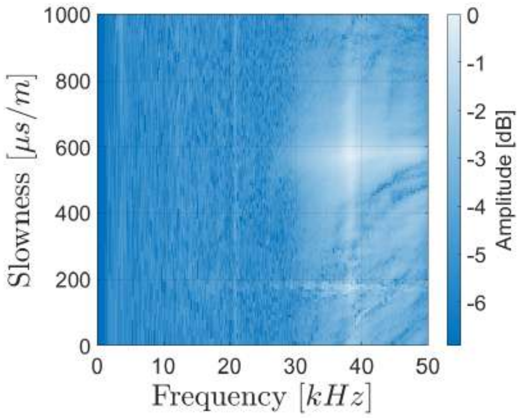
Nesta subseção são mostrados os resultados experimentais para o caso CH no domínio da frequência para gráfico frequência por vagarosidade.



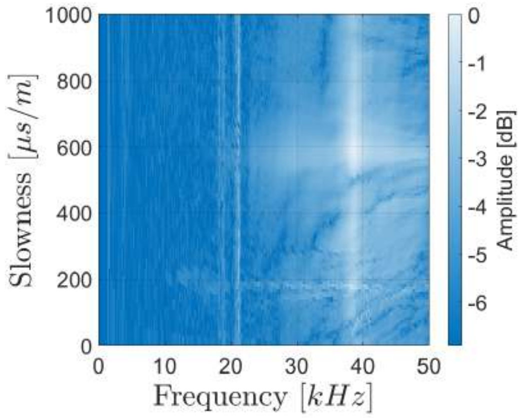
(a): CH-NT



(b): CH-NE



(c): CH-E1

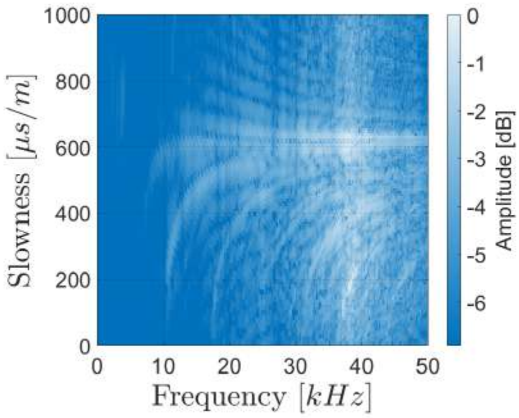


(d): CH-E2

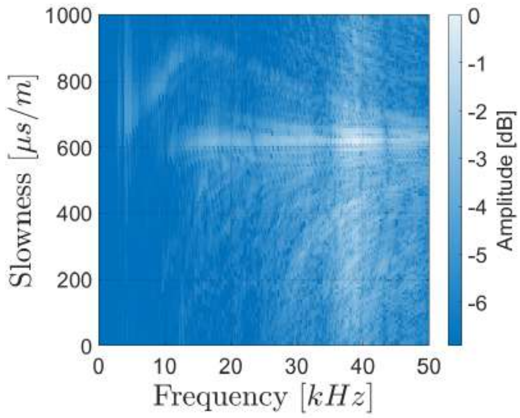
Figura B.11: Experimento, domínio da frequência, caso CH

B.3.4
Caso CL

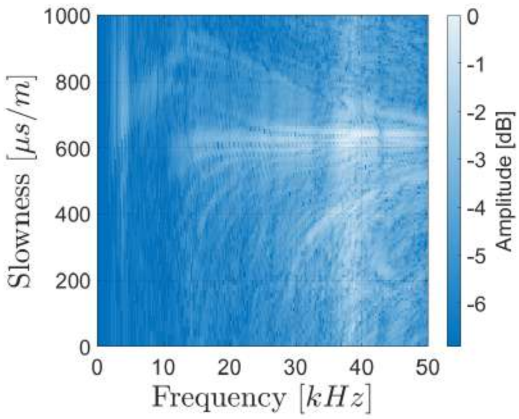
Nesta subseção são mostrados os resultados experimentais para o caso CL no domínio da frequência para gráfico frequência por vagarosidade.



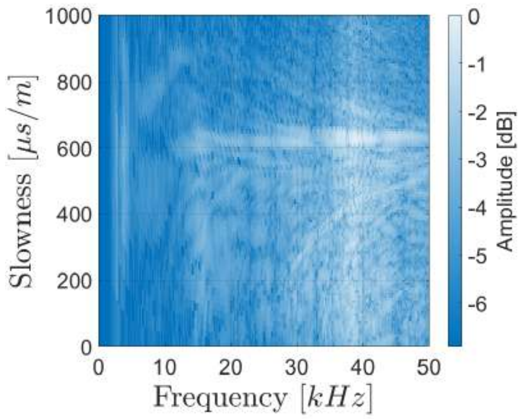
(a): CL-NT



(b): CL-NE



(c): CL-E1



(d): CL-E2

Figura B.12: Experimento, domínio da frequência, caso CL

C
Dados FEM e SAFE

Neste apêndice apresenta-se os dados FEM com SAFE sobrepostos, seguindo a ordem, figura (a) caso NT, figura (b) caso NE, figura (c) caso E1 e figura (d) caso E2.

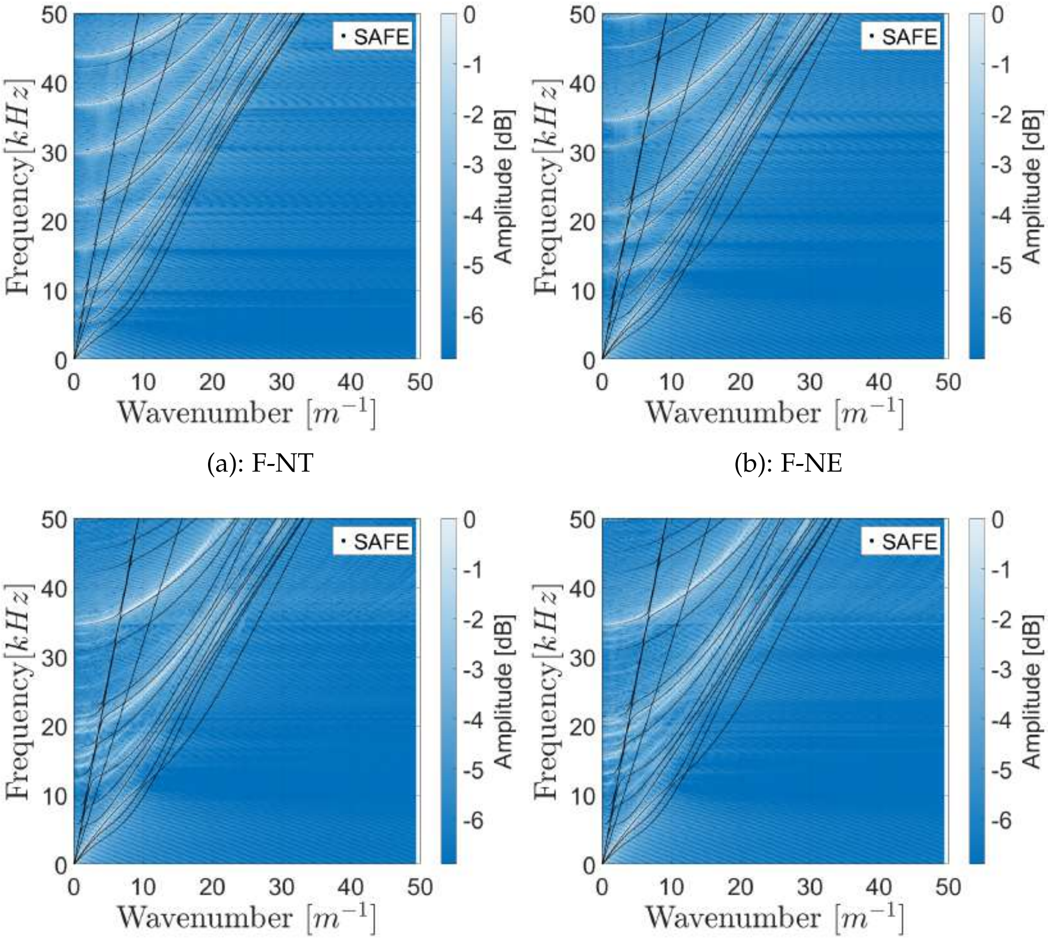
C.1
Domínio da Frequência, Número de onda - Frequência

Nesta seção apresenta-se os resultados FEM no domínio da frequência com o SAFE sobrepostos para o gráfico número de onda por frequência.

Continua na próxima página.

C.1.1 Caso F

Nesta subseção apresenta-se os resultados FEM e SAFE para o caso F no domínio da frequência para gráfico número de onda por frequência.



(a): F-NT

(b): F-NE

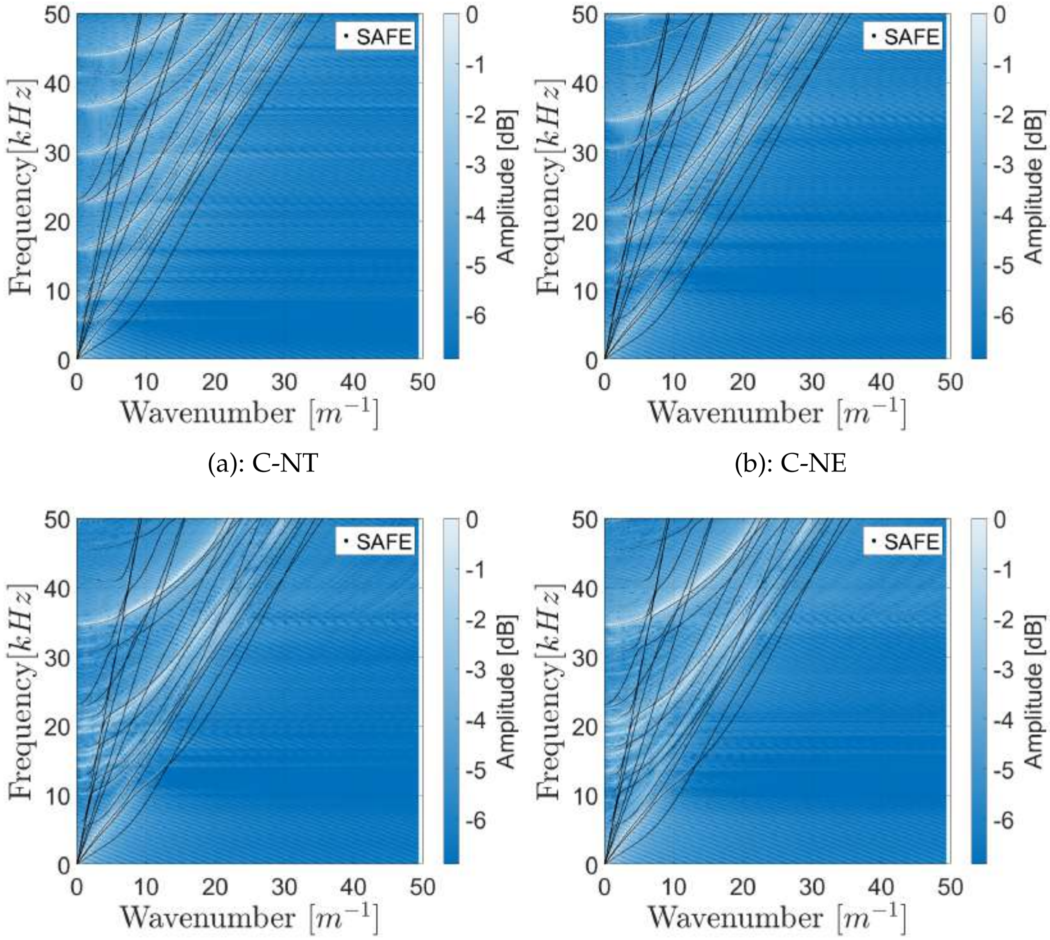
(c): F-E1

(d): F-E2

Figura C.1: Simulação, domínio da frequência, caso F

C.1.2
Caso C

Nesta subseção são mostrados os resultados FEM e SAFE sobrepostos para o caso C no domínio da frequência para gráfico número de onda por frequência.



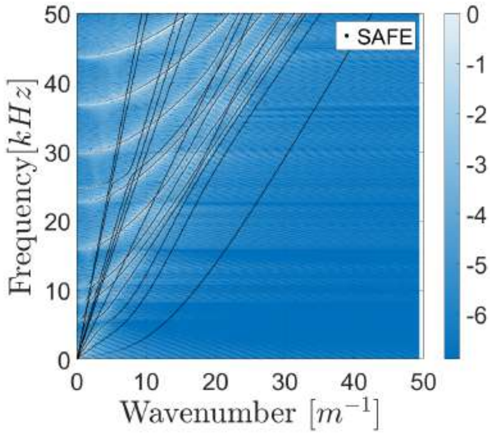
(a): C-NT (b): C-NE

(c): C-E1 (d): C-E2

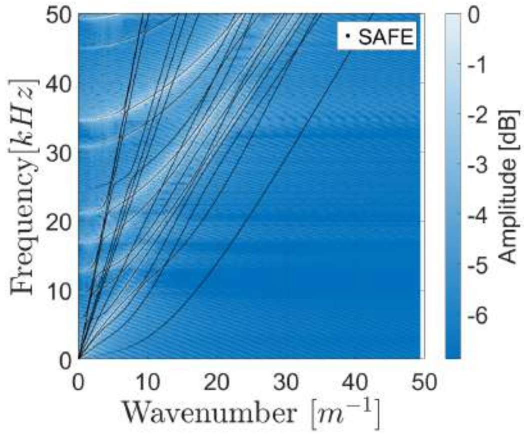
Figura C.2: Simulação, domínio da frequência, caso C

C.1.3
Caso CH

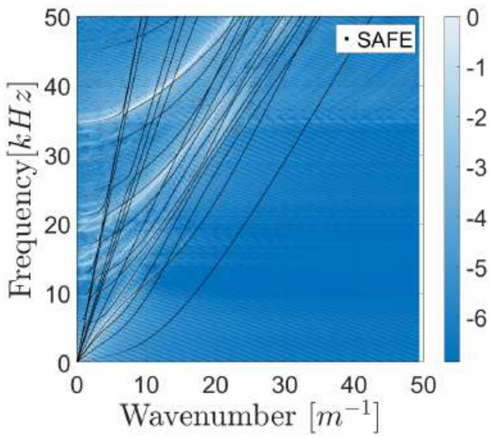
Nesta subseção são mostrados os resultados FEM e SAFE sobrepostos para o caso CH no domínio da frequência para gráfico número de onda por frequência.



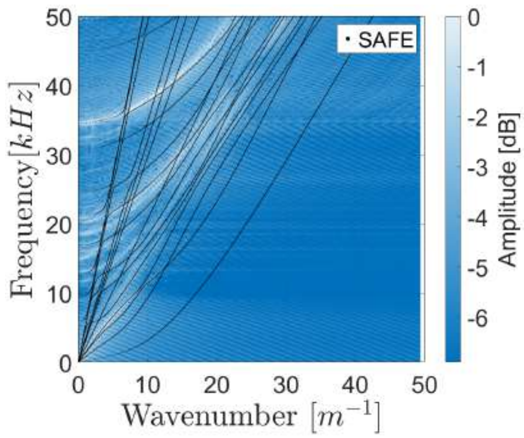
(a): CH-NT



(b): CH-NE



(c): CH-E1

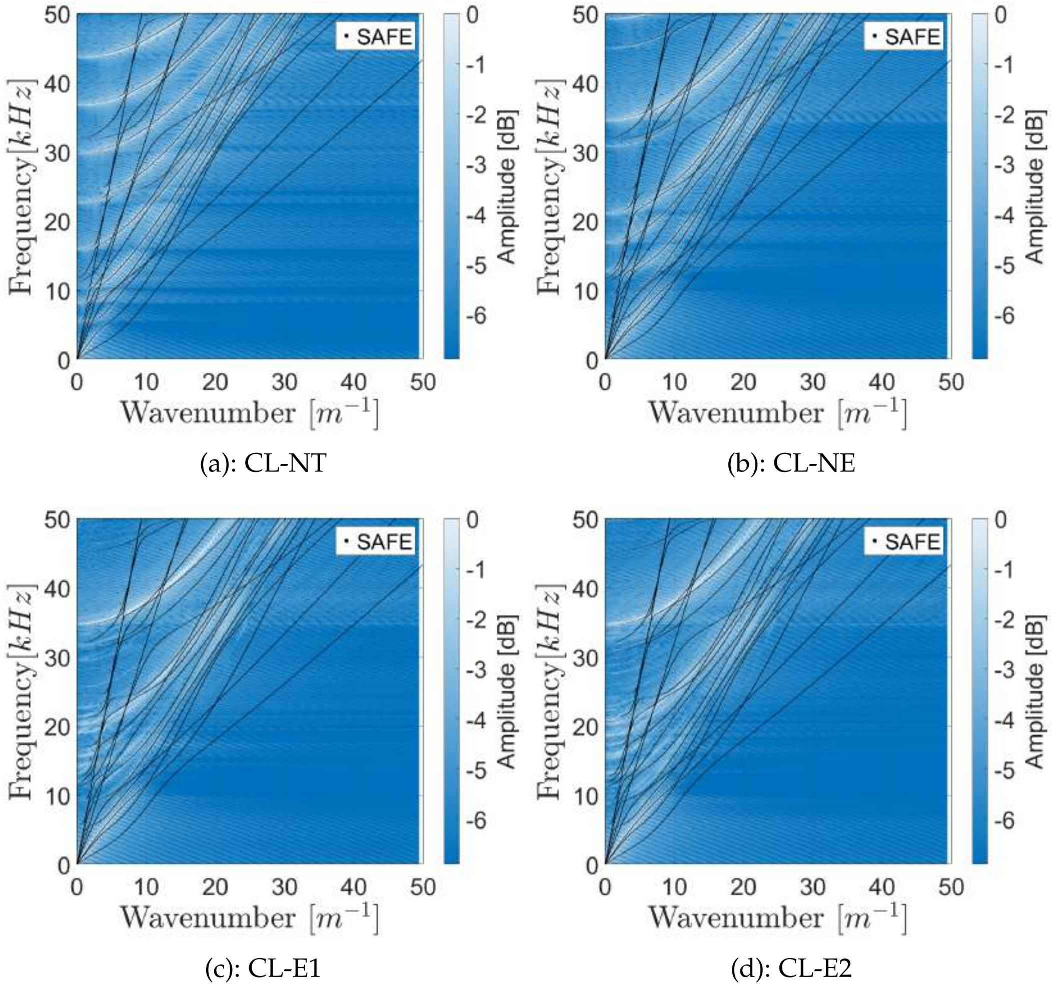


(d): CH-E2

Figura C.3: Simulação, domínio da frequência, caso CH

C.1.4
Caso CL

Nesta subseção são mostrados os resultados FEM e SAFE sobrepostos para o caso CL no domínio da frequência para gráfico número de onda por frequência.



(a): CL-NT

(b): CL-NE

(c): CL-E1

(d): CL-E2

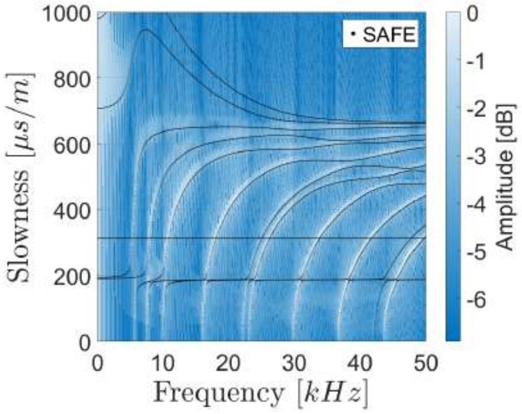
Figura C.4: Simulação, domínio da frequência, caso CL

C.2
Domínio da Frequência, Frequência - Vagarosidade

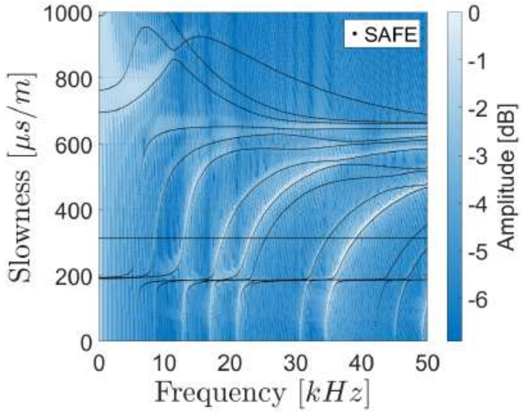
Nesta seção são mostrados os resultados FEM no domínio da frequência sobrepostos com o SAFE para gráfico frequência por vagarosidade.

C.2.1
Caso F

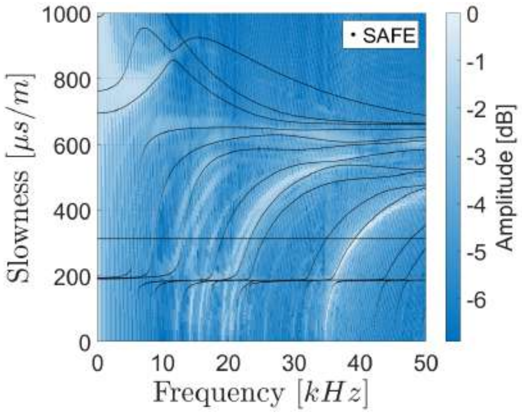
Nesta subseção são mostrados os resultados FEM e SAFE sobrepostos para o caso F no domínio da frequência para gráfico frequência por vagarosidade.



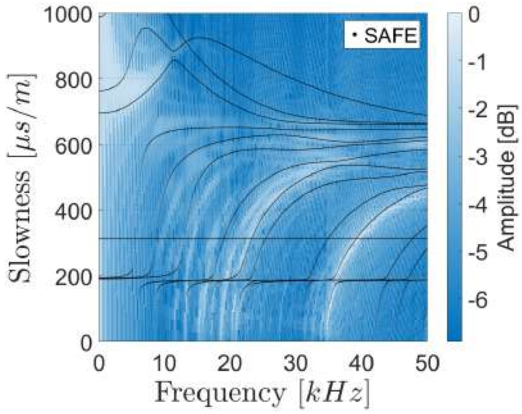
(a): F-NT



(b): F-NE



(c): F-E1

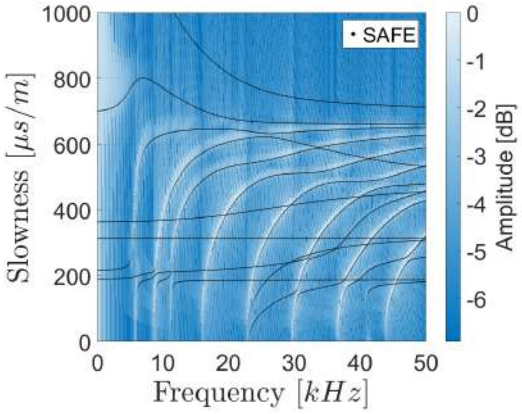


(d): F-E2

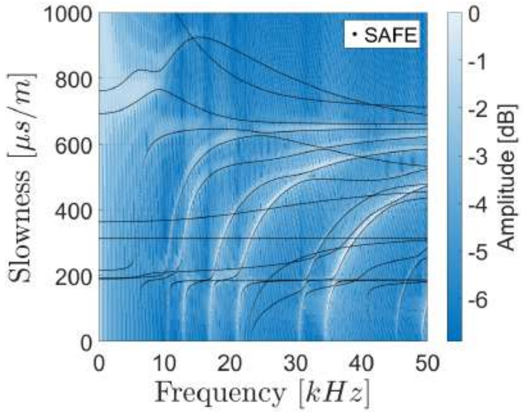
Figura C.5: Simulação, domínio da frequência, caso F

C.2.2
Caso C

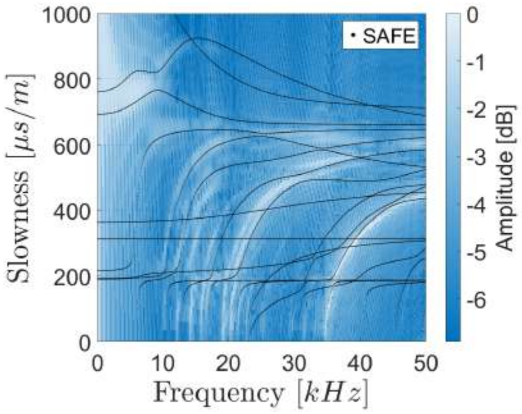
Nesta subseção são mostrados os resultados FEM e SAFE sobrepostos para o caso C no domínio da frequência para gráfico frequência por vagarosidade.



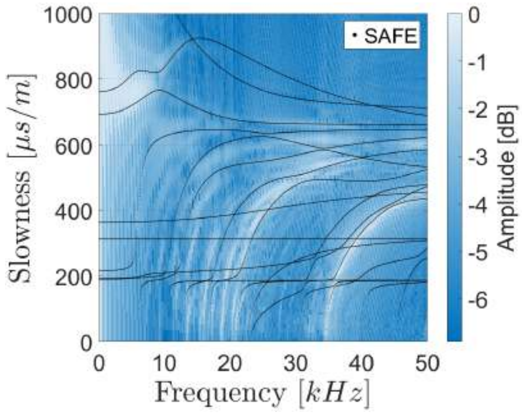
(a): C-NT



(b): C-NE



(c): C-E1

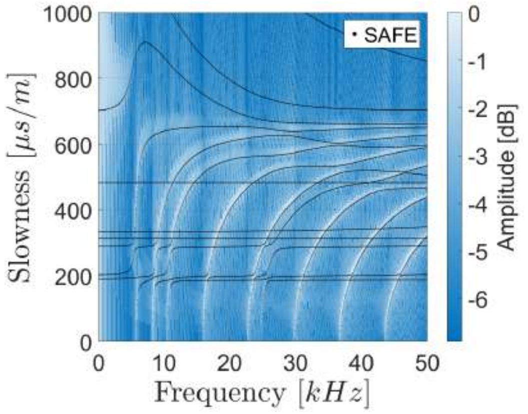


(d): C-E2

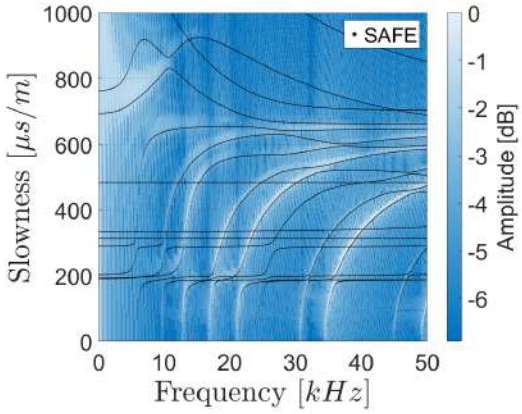
Figura C.6: Simulação, domínio da frequência, caso C

C.2.3
Caso CH

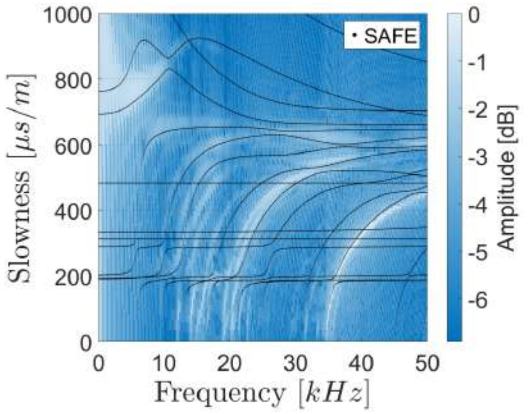
Nesta subseção são mostrados os resultados FEM e SAFE sobrepostos para o caso CH no domínio da frequência para gráfico frequência por vagarosidade.



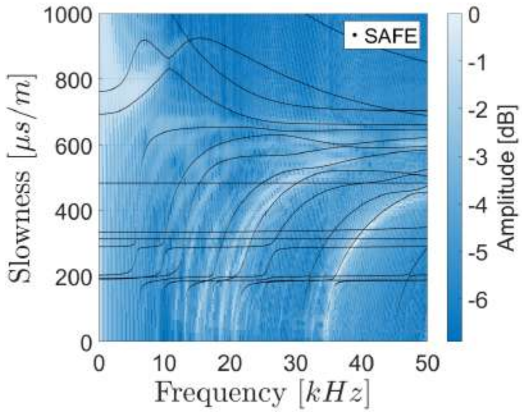
(a): CH-NT



(b): CH-NE



(c): CH-E1

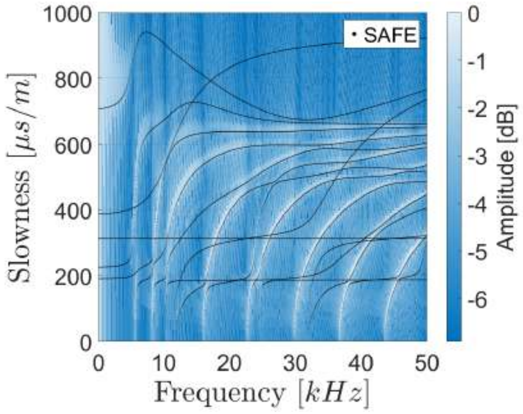


(d): CH-E2

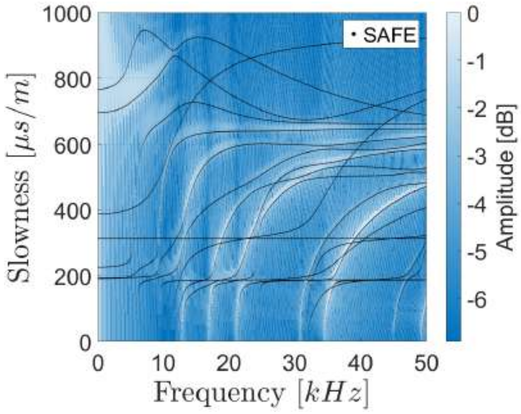
Figura C.7: Simulação, domínio da frequência, caso CH

C.2.4
Caso CL

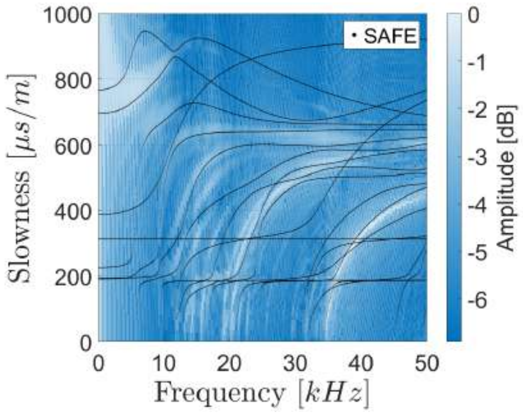
Nesta subseção são mostrados os resultados FEM e SAFE sobrepostos para o caso CL no domínio da frequência para gráfico frequência por vagarosidade.



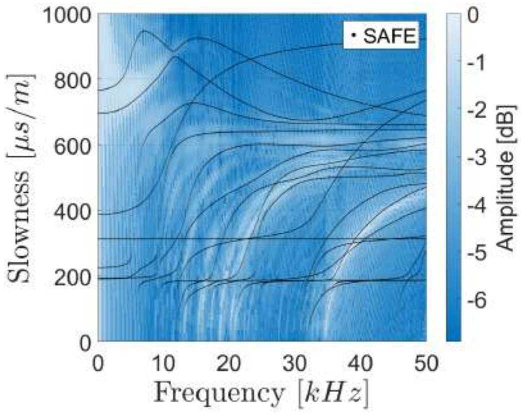
(a): CL-NT



(b): CL-NE



(c): CL-E1



(d): CL-E2

Figura C.8: Simulação, domínio da frequência, caso CL

D
Dados Experimentais e SAFE

Neste apêndice são apresentados os dados experimentais com SAFE sobrepostos, seguindo a ordem, figura (a) o caso NT, figura (b) o caso NE, figura (c) o caso E1 e figura (d) o caso E2.

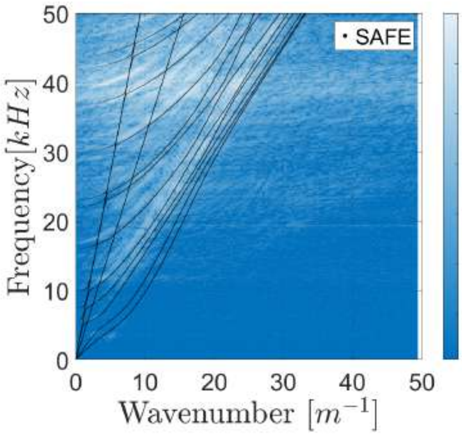
D.1
Domínio da Frequência, Número de onda - Frequência

Nesta seção são mostrados os resultados experimentais no domínio da frequência sobrepostos com o SAFE para gráfico número de onda por frequência.

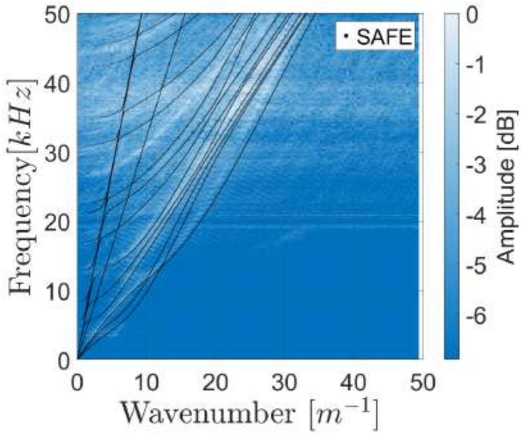
Continua na próxima página.

D.1.1
Caso F

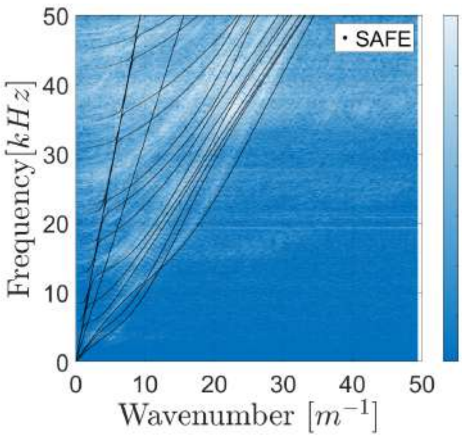
Nesta subseção são mostrados resultados experimentais e SAFE sobrepostos para o caso F no domínio da frequência, gráfico número de onda por frequência.



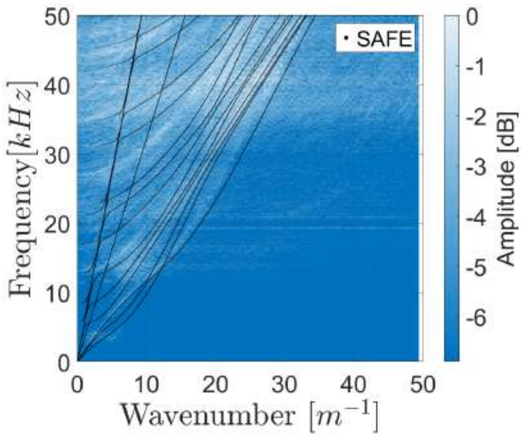
(a): F-NT



(b): F-NE



(c): F-E1

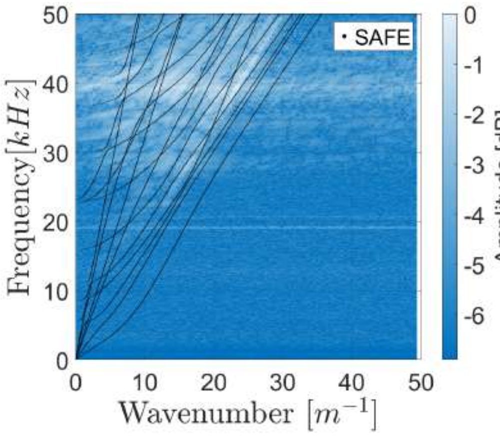


(d): F-E2

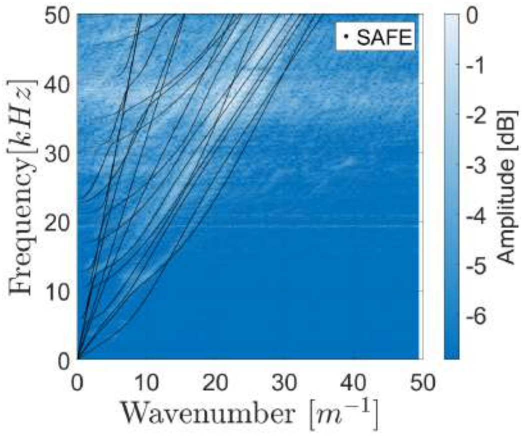
Figura D.1: Experimento, domínio da frequência, caso F

D.1.2 Caso C

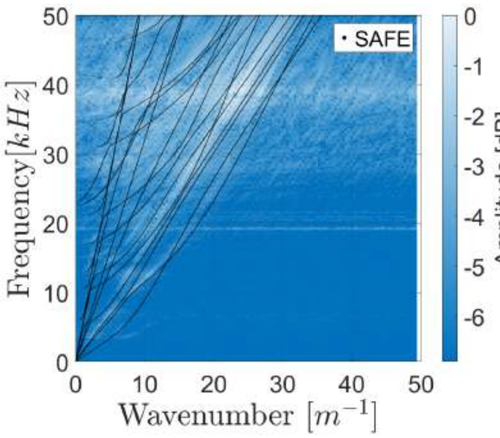
Nesta subseção são mostrados os resultados experimentais e SAFE sobrepostos para o caso C no domínio da frequência para gráfico número de onda por frequência.



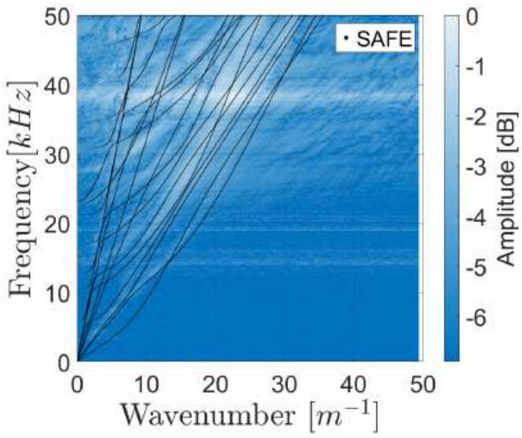
(a): C-NT



(b): C-NE



(c): C-E1

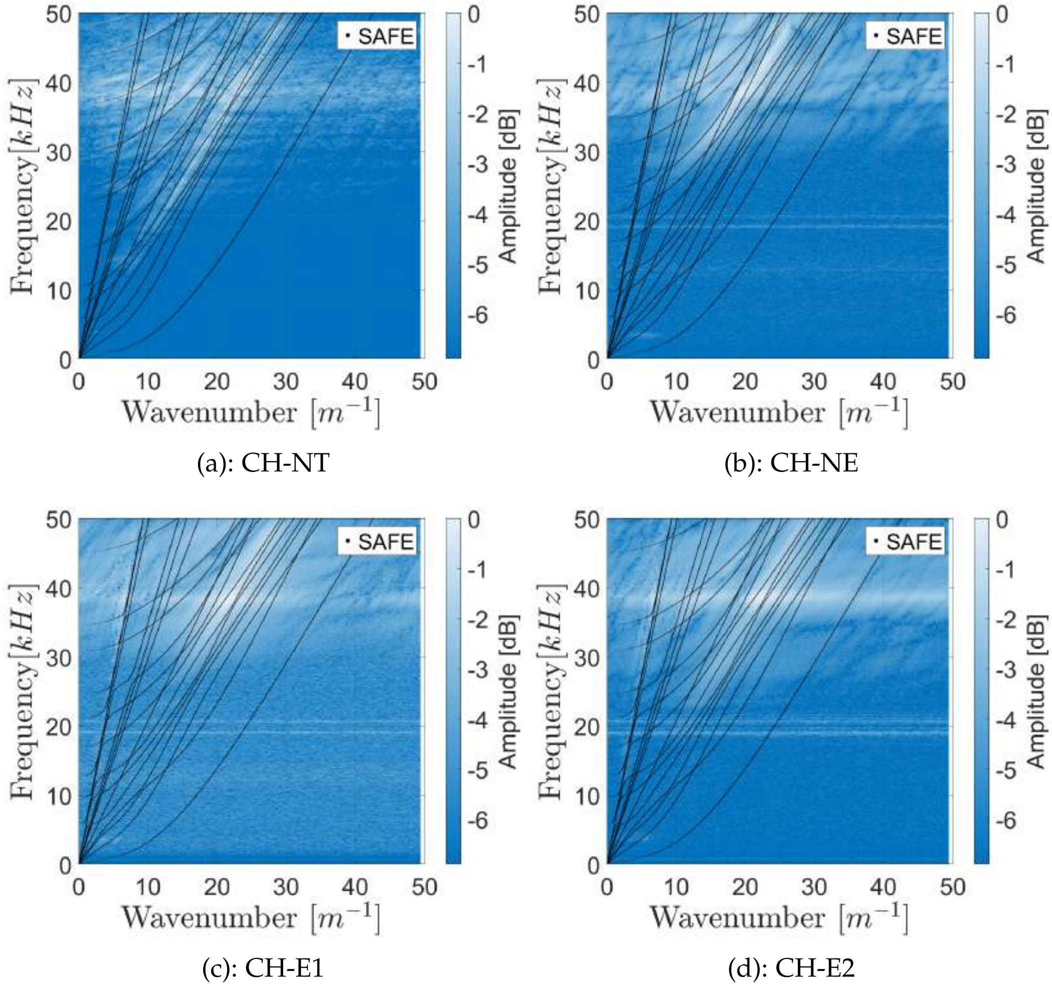


(d): C-E2

Figura D.2: Experimento, domínio da frequência, caso C

D.1.3
Caso CH

Nesta subseção são mostrados os resultados experimentais e SAFE sobrepostos para o caso CH no domínio da frequência para gráfico número de onda por frequência.



(a): CH-NT

(b): CH-NE

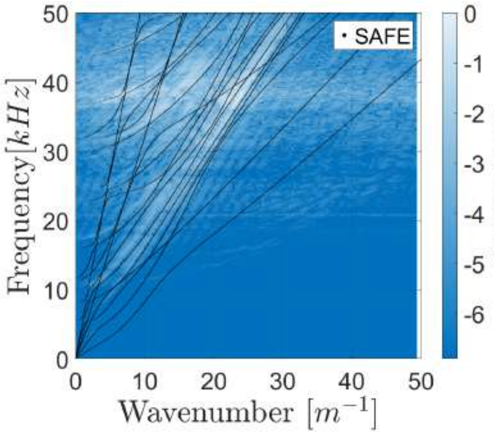
(c): CH-E1

(d): CH-E2

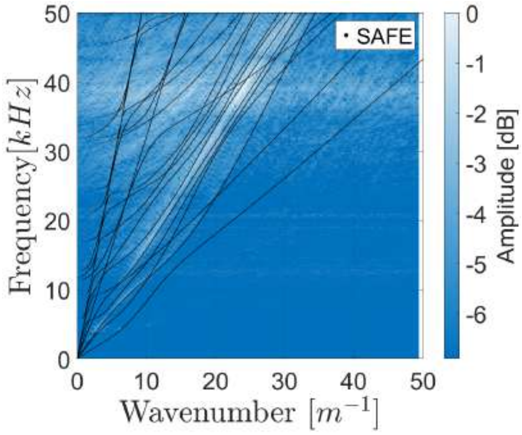
Figura D.3: Experimento, domínio da frequência, caso CH

D.1.4
Caso CL

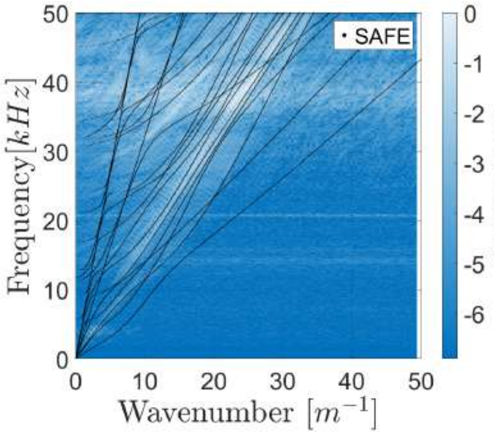
Nesta subseção são mostrados os resultados experimentais e SAFE sobrepostos para o caso CL no domínio da frequência para gráfico número de onda por frequência.



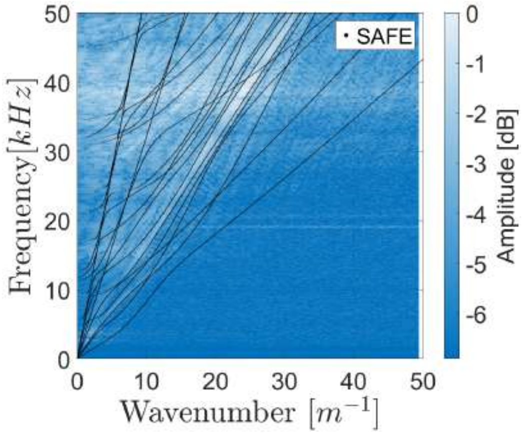
(a): CL-NT



(b): CL-NE



(c): CL-E1



(d): CL-E2

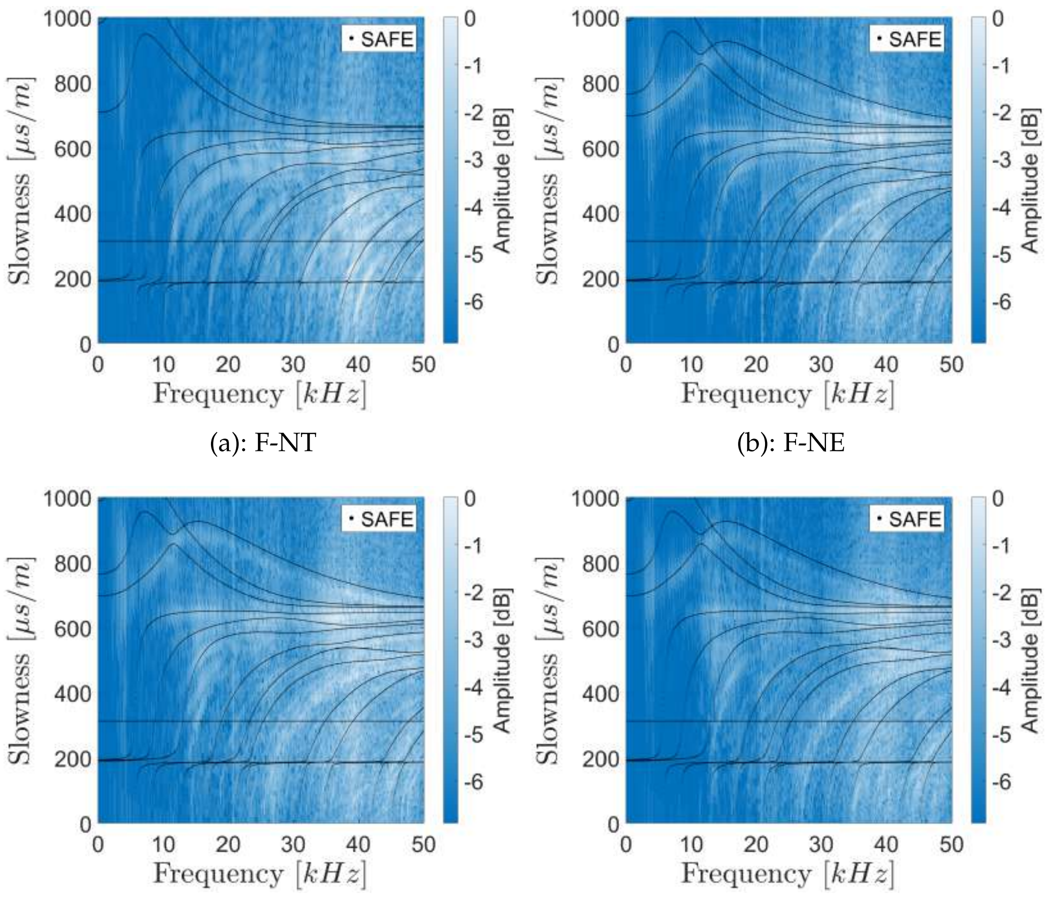
Figura D.4: Experimento, domínio da frequência, caso CL

D.2
Domínio da Frequência, Frequência - Vagarosidade

Nesta seção são mostrados os resultados experimentais no domínio da frequência sobrepostos com o SAFE para gráfico frequência por vagarosidade.

D.2.1
Caso F

Nesta subseção são mostrados os resultados experimentais e SAFE sobrepostos para o caso F no domínio da frequência para gráfico frequência por vagarosidade



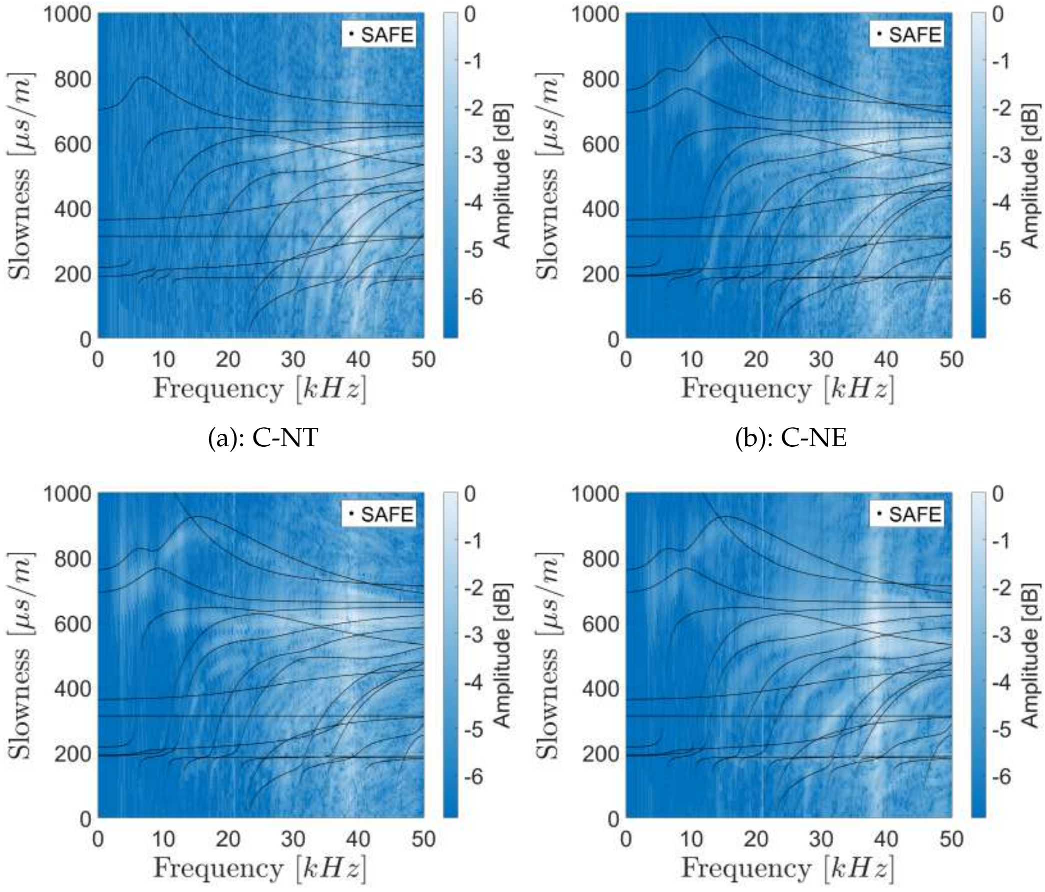
(a): F-NT (b): F-NE

(c): F-E1 (d): F-E2

Figura D.5: Experimento, domínio da frequência, caso F

D.2.2
Caso C

Nesta subseção são mostrados os resultados experimentais e SAFE sobrepostos para o caso C no domínio da frequência para gráfico frequência por vagarosidade



(a): C-NT

(b): C-NE

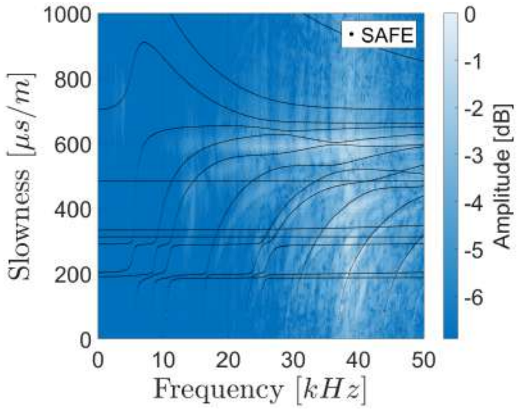
(c): C-E1

(d): C-E2

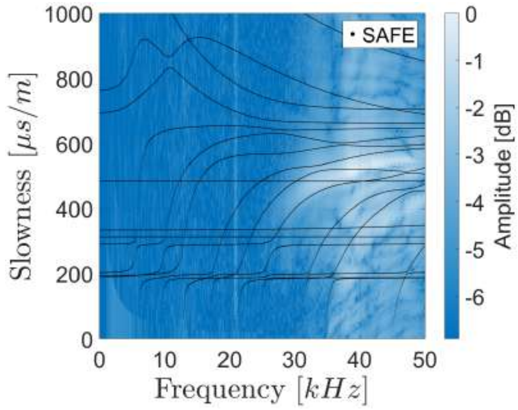
Figura D.6: Experimento, domínio da frequência, caso C

D.2.3
Caso CH

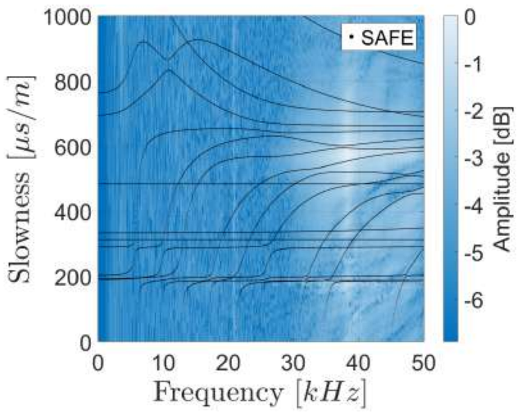
Nesta subseção são mostrados os resultados experimentais e SAFE sobrepostos para o caso CH no domínio da frequência para gráfico frequência por vagarosidade



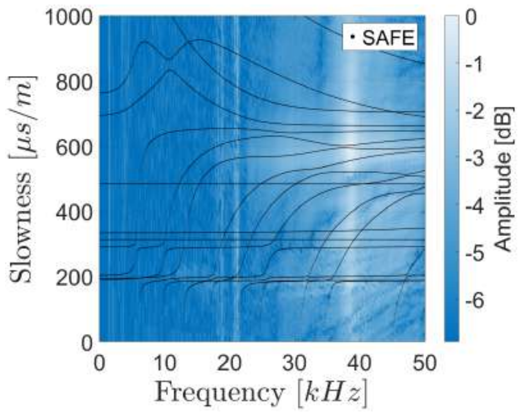
(a): CH-NT



(b): CH-NE



(c): CH-E1

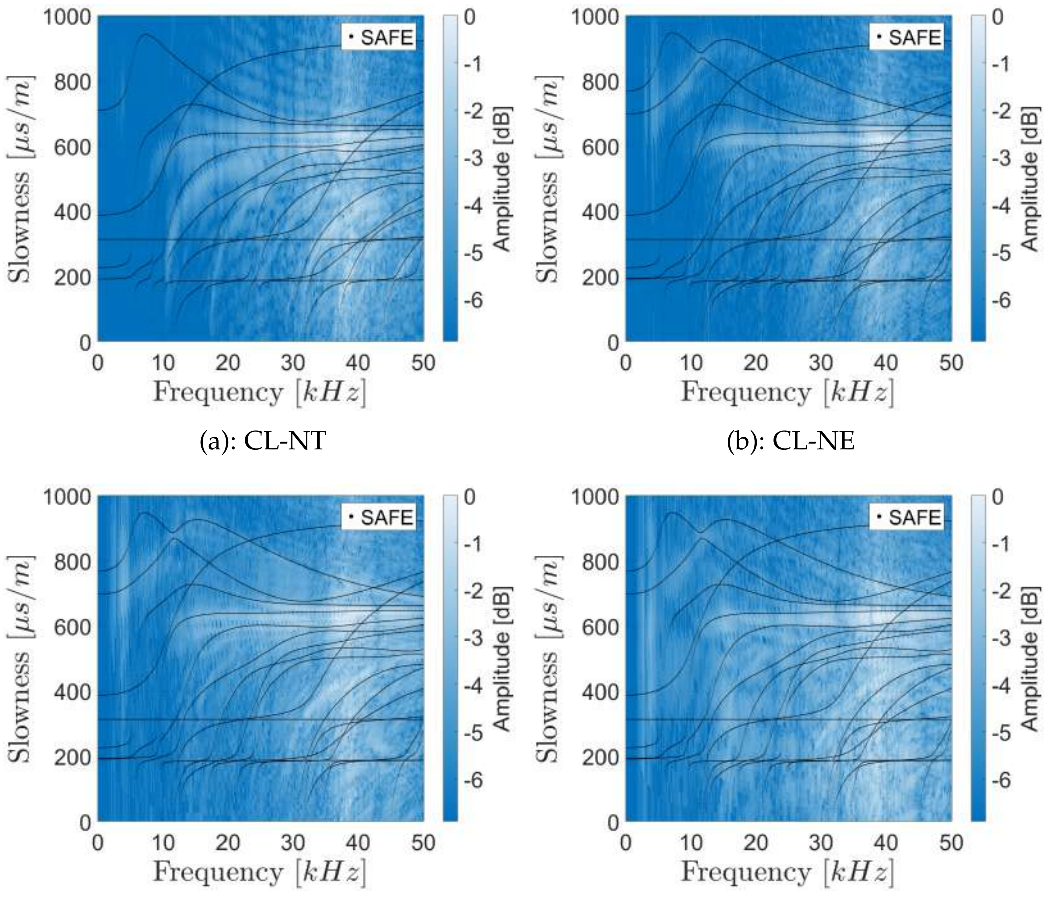


(d): CH-E2

Figura D.7: Experimento, domínio da frequência, caso CH

D.2.4
Caso CL

Nesta subseção são mostrados os resultados experimentais e SAFE sobrepostos para o caso CL no domínio da frequência para gráfico frequência por vagarosidade



(a): CL-NT

(b): CL-NE

(c): CL-E1

(d): CL-E2

Figura D.8: Experimento, domínio da frequência, caso CL

E
STC

Neste apêndice são apresentados os dados STC FEM e STC experimentais, seguindo a ordem, figura (a) o caso NT, figura (b) o caso NE, figura (c) o caso E1 e figura (d) o caso E2.

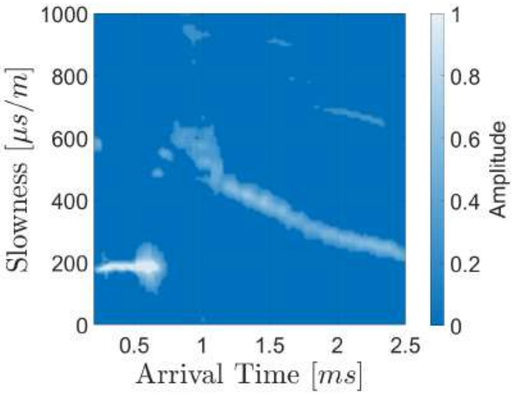
E.1
STC FEM

Nesta seção são mostrados os resultados STC FEM para os casos de estudo.

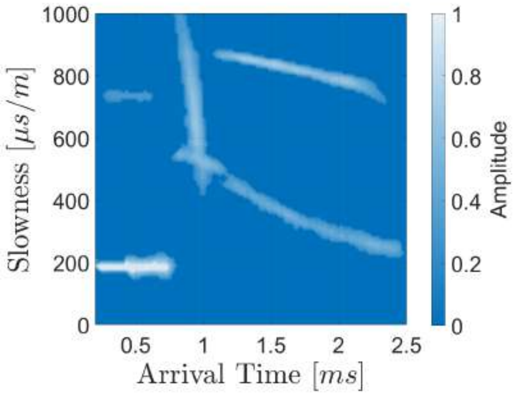
Continua na próxima página.

E.1.1 Caso F

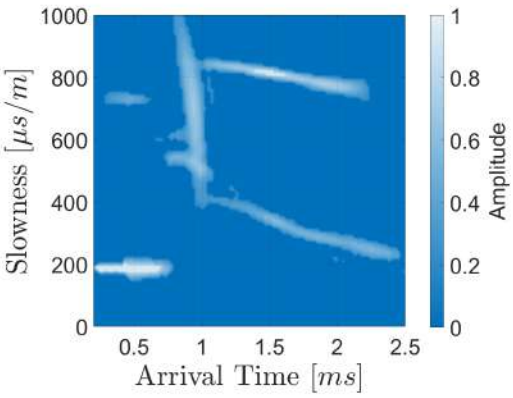
Nesta subseção são mostrados resultados STC FEM para o caso F.



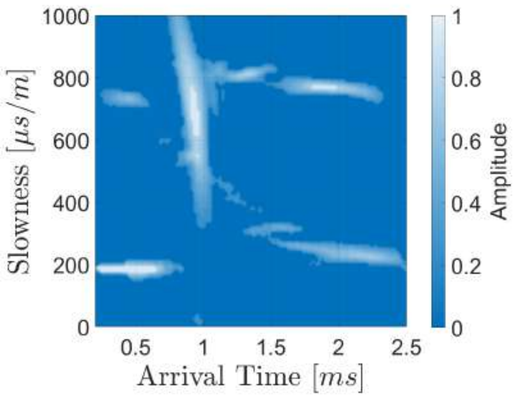
(a): F-NT



(b): F-NE



(c): F-E1

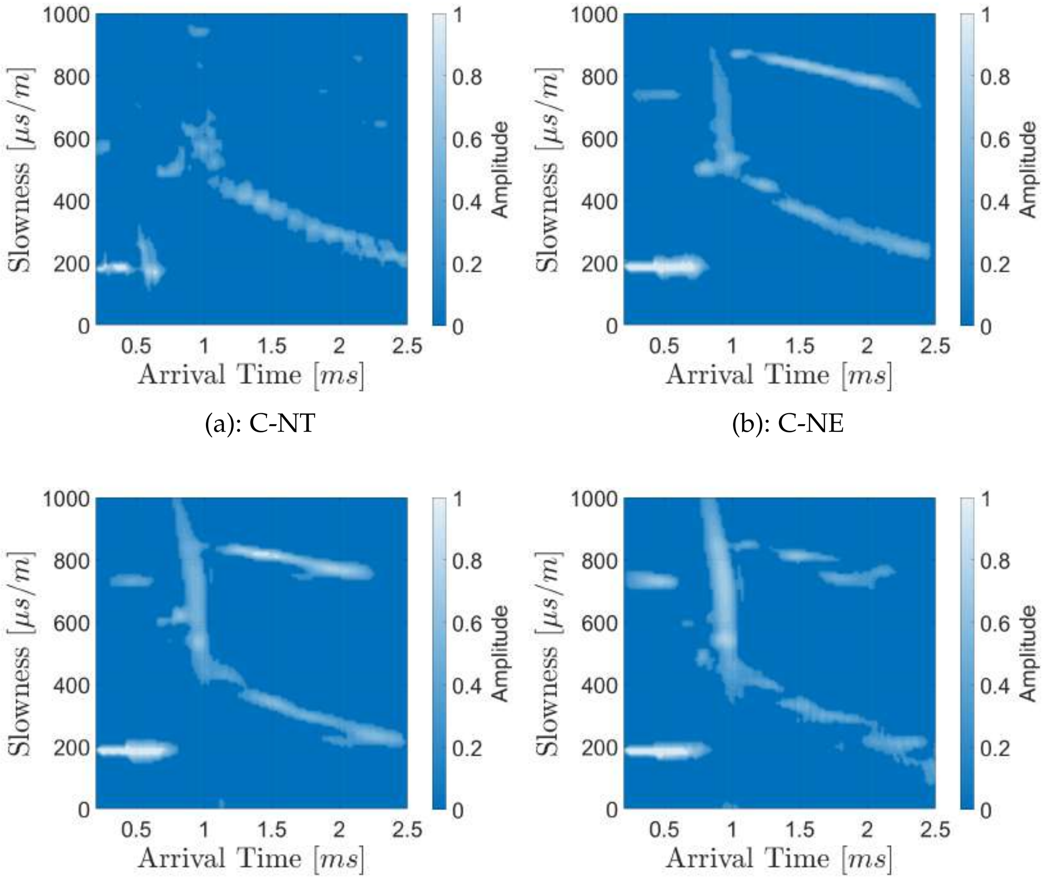


(d): F-E2

Figura E.1: STC FEM, caso F

E.1.2 Caso C

Nesta subseção são mostrados resultados STC FEM para o caso C.



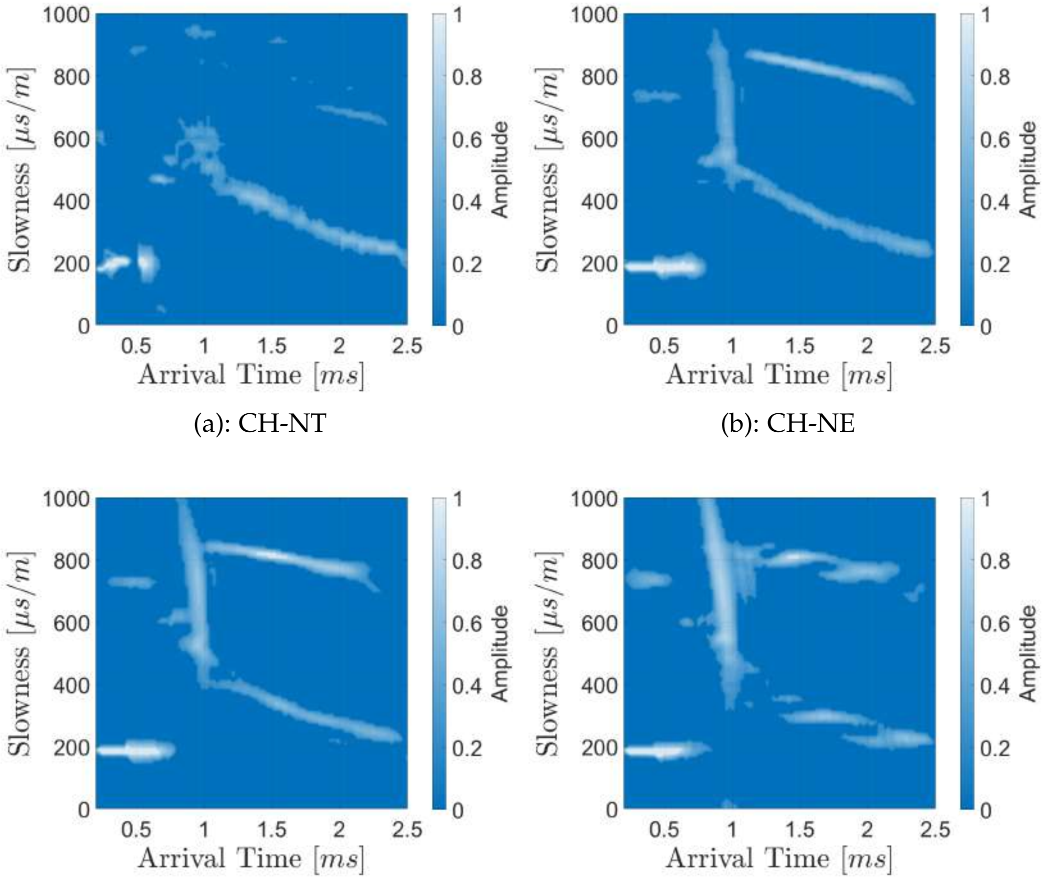
(a): C-NT (b): C-NE

(c): C-E1 (d): C-E2

Figura E.2: STC FEM, caso C

E.1.3
Caso CH

Nesta subseção são mostrados resultados STC FEM para o caso CH.



(a): CH-NT

(b): CH-NE

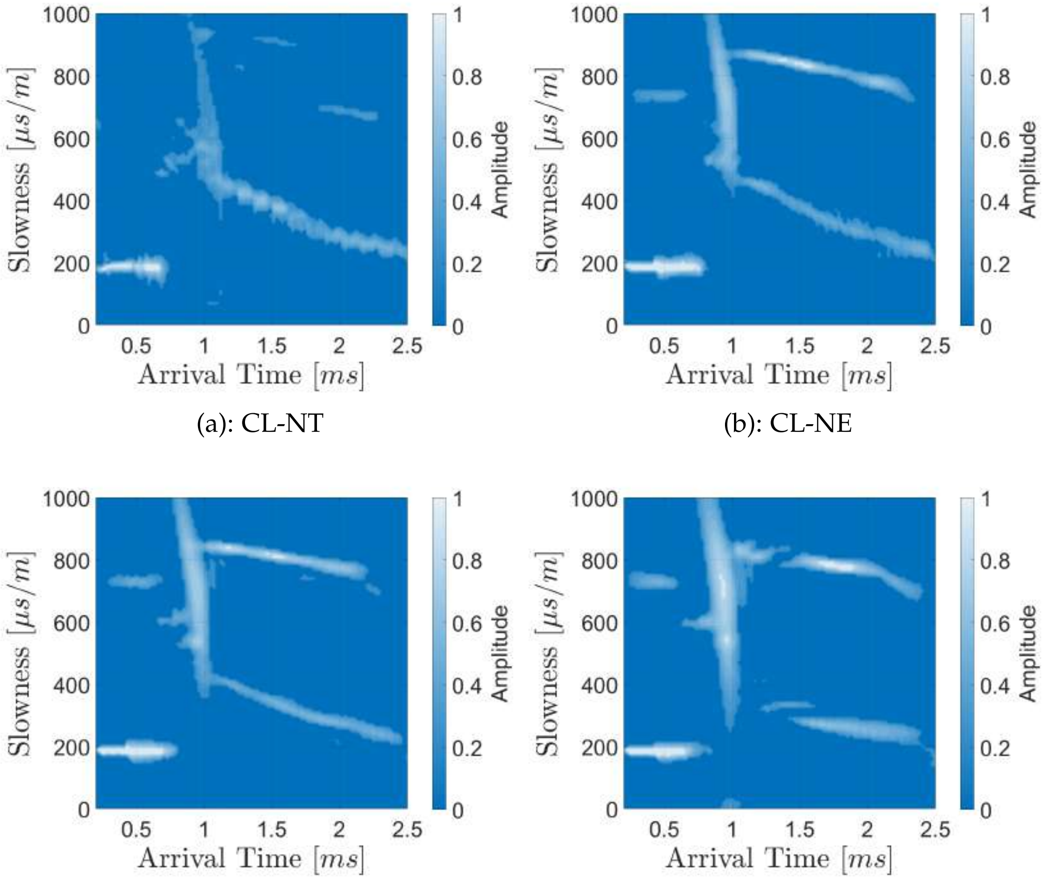
(c): CH-E1

(d): CH-E2

Figura E.3: STC FEM, caso CH

E.1.4
Caso CL

Nesta subseção são mostrados resultados STC FEM para o caso CL.



(a): CL-NT

(b): CL-NE

(c): CL-E1

(d): CL-E2

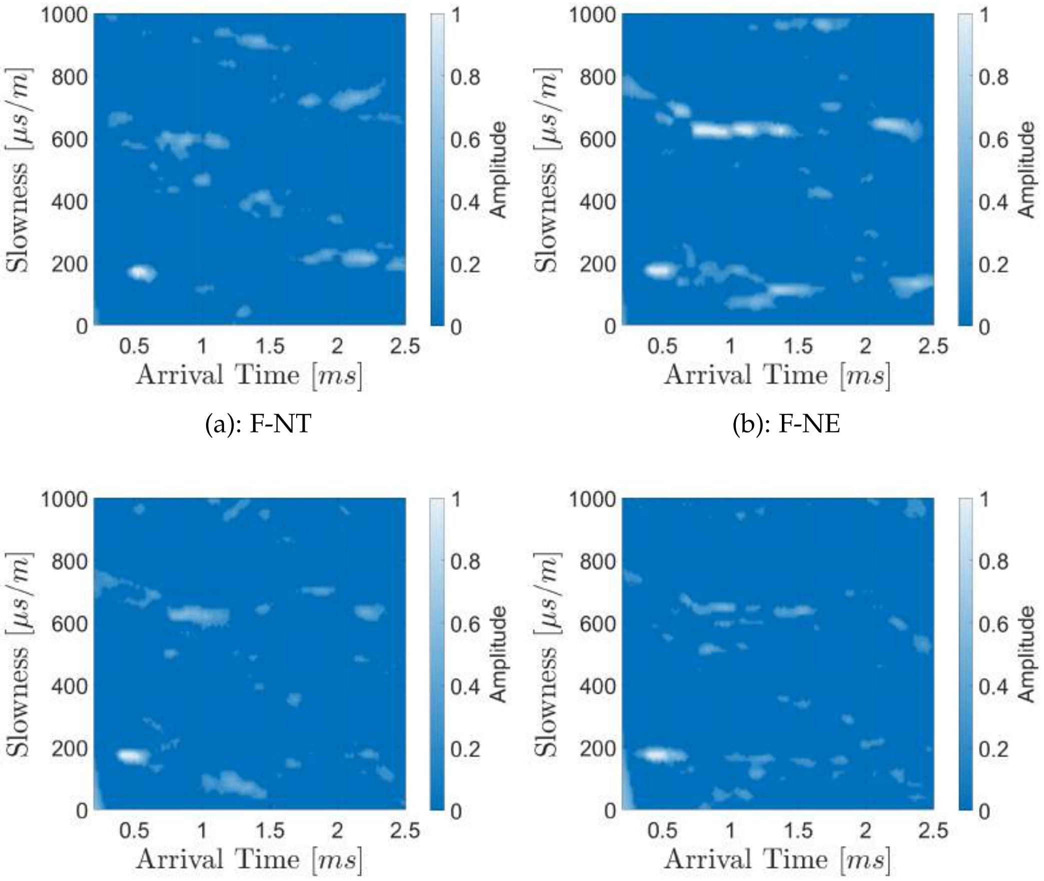
Figura E.4: STC FEM, caso CL

E.2
STC experimental

Nesta seção são mostrados os resultados STC experimental para os casos de estudo.

E.2.1
Caso F

Nesta subseção são mostrados resultados STC experimental para o caso F.



(a): F-NT

(b): F-NE

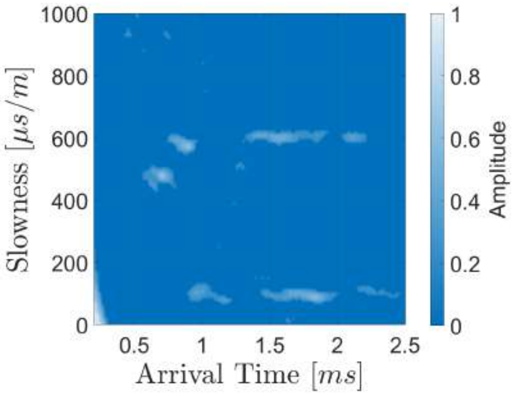
(c): F-E1

(d): F-E2

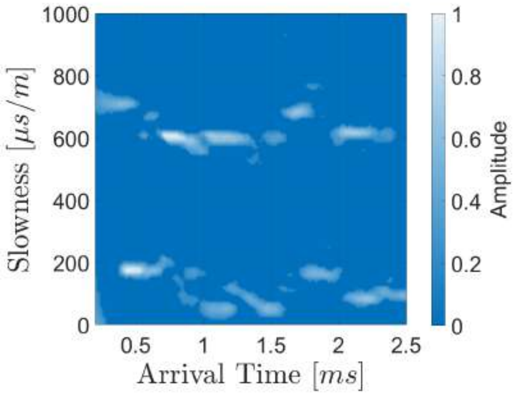
Figura E.5: STC experimental, caso F

E.2.2 Caso C

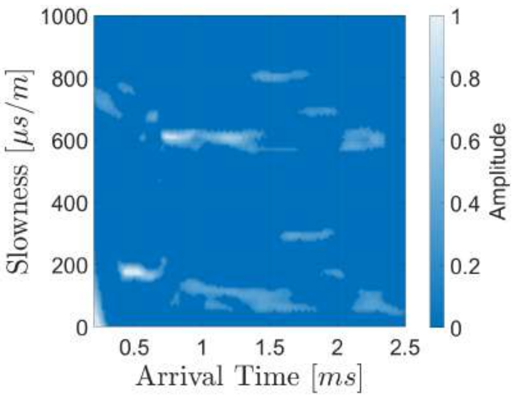
Nesta subseção são mostrados resultados STC experimental para o caso C.



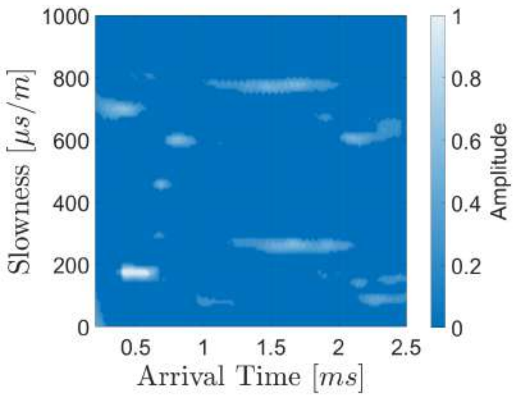
(a): C-NT



(b): C-NE



(c): C-E1

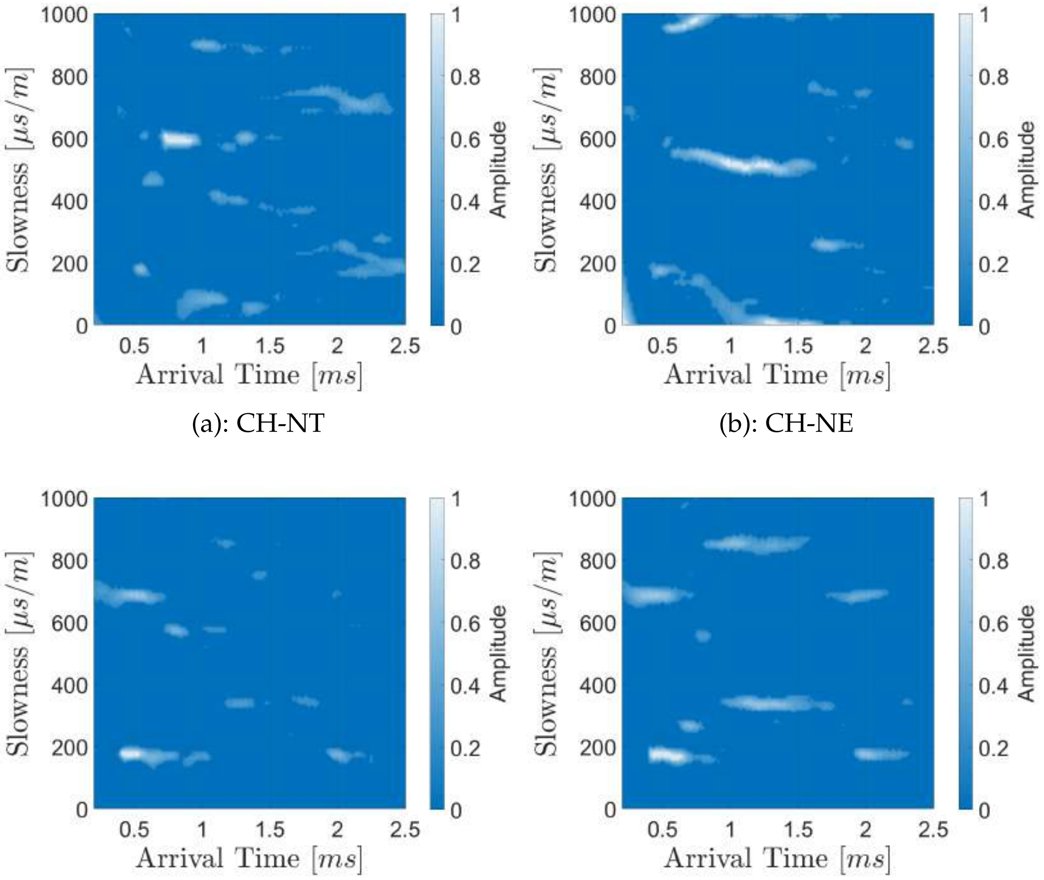


(d): C-E2

Figura E.6: STC experimental, caso C

E.2.3 Caso CH

Nesta subseção são mostrados resultados STC experimental para o caso CH.



(a): CH-NT

(b): CH-NE

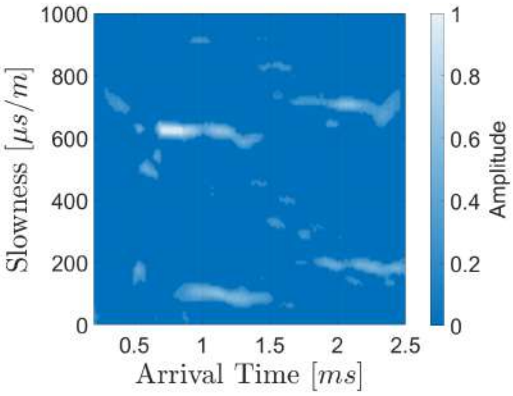
(c): CH-E1

(d): CH-E2

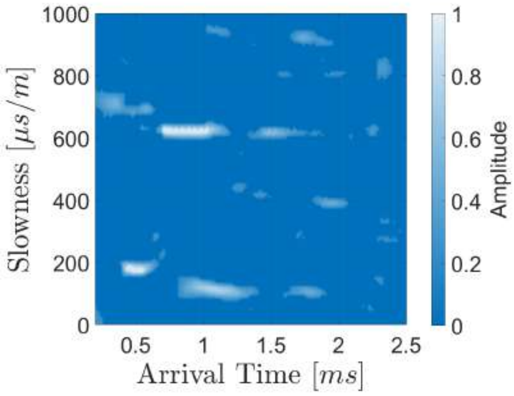
Figura E.7: STC experimental, caso CH

E.2.4
Caso CL

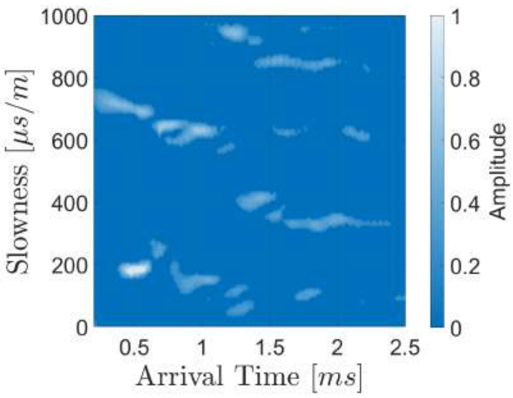
Nesta subseção são mostrados resultados STC experimental para o caso CL.



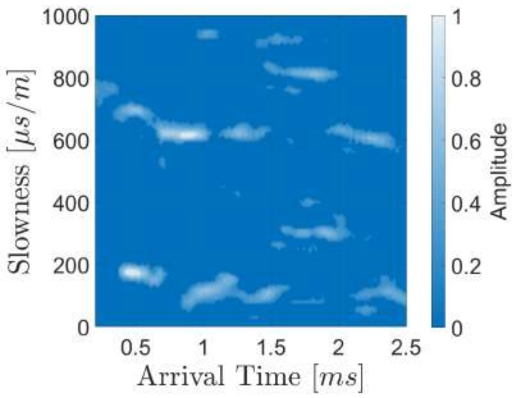
(a): CL-NT



(b): CL-NE



(c): CL-E1



(d): CL-E2

Figura E.8: STC experimental, caso CL