



## APLICAÇÕES DE PULSOS CODIFICADOS E NOVOS ARRANJOS ULTRASSÔNICOS PARA CONCRETO

Tiago Costa Dourado

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil.

Orientadores: Webe João Mansur  
Rodrigo Pereira Barretto da  
Costa-Félix

Rio de Janeiro  
Abril de 2022

APLICAÇÕES DE PULSOS CODIFICADOS E NOVOS ARRANJOS  
ULTRASSÔNICOS PARA CONCRETO

Tiago Costa Dourado

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

Orientadores: Webe João Mansur

Rodrigo Pereira Barretto da Costa-Félix

Aprovada por: Prof. Webe João Mansur

Prof. Rodrigo Pereira Barretto da Costa-Félix

Prof. Francisco Thiago Sacramento Aragão

Prof. André Victor Alvarenga

Prof. Sandro Lemos Machado

Prof. Wagner Coelho de Albuquerque Pereira

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

ABRIL DE 2022

Dourado, Tiago Costa

Aplicações de pulsos codificados e novos arranjos ultrassônicos para concreto/Tiago Costa Dourado. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2022.

XVIII, 117 p.: il.; 29,7cm.

Orientadores: Webe João Mansur

Rodrigo Pereira Barreto da Costa-Félix

Tese (doutorado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Civil, 2022.

Referências Bibliográficas: p. 96 – 104.

1. Ultrassom.
  2. Ensaios não destrutivos.
  3. Concreto.
  4. Chirp.
  5. Coeficiente de reflexão.
  6. Atenuação acústica.
- I. Mansur, Webe João *et al.*  
II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE,  
Programa de Engenharia Civil. III. Título.

*É de coração que dedico este  
trabalho aos meus pais Agenor e  
Maria Elizabeth, aos meus  
irmãos Mitre e Sarita, à minha  
esposa Tatiane e à minha cópia e  
filha Yasmin.*

# Agradecimentos

Aos meus orientadores Webe e Rodrigo sou muito grato por todo suporte e orientação magistral no desenvolvimento desta tese. À minha orientadora Franciane, que nos deixou tão precocemente, eu não posso deixar de agradecer os ensinamentos sempre com muita simplicidade e firmeza nas palavras. À UFRJ e todo o corpo funcional, principalmente à equipe do LAMEMO por darem subsídios em todos os momentos em que precisei, em especial à Ivone que me auxiliou de forma exemplar. A todos os professores e pesquisadores do LAMEMO, com destaque ao Jandyr que me orientou nos primeiros 02 anos desta pesquisa. Ao INMETRO, principalmente à equipe da Divisão de Engenharia (DIENG) e Divisão de Acústica (DIAVI), através do apoio e paciência no desenvolvimento da pesquisa. Aos bolsistas do Labus que auxiliaram muito durante as etapas de execução dos ensaios e divagações sobre vários tópicos da pesquisa. À Universidade Católica de Petrópolis, por ter aberto as portas para realização de ensaios e trocas de conhecimentos acadêmicos e profissionais. E em especial à minha família que além de demonstrarem paciência nos meus momentos de isolamento e concentração, me apoiaram continuamente, especialmente à minha esposa Tatiane e à minha filha Yasmin.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

## APLICAÇÕES DE PULSOS CODIFICADOS E NOVOS ARRANJOS ULTRASSÔNICOS PARA CONCRETO

Tiago Costa Dourado

Abril/2022

Orientadores: Webe João Mansur  
Rodrigo Pereira Barretto da Costa-Félix

Programa: Engenharia Civil

Esse trabalho objetiva ampliar o entendimento da aplicação do ultrassom em materiais cimentícios por meio do estudo dos arranjos clássicos e da avaliação da capacidade dos pulsos codificados como sinais de excitação em relação aos convencionais tons puros, na medição dos tempos de percurso da frente de onda.

Adicionalmente, a partir da revisão bibliográfica foi possível agrupar os principais métodos ultrassônicos e apresentar um novo método que permite aperfeiçoamento destas medições em ensaios não destrutivos de ultrassom por contato.

Foram realizadas simulações, a partir de cenários que se aproximaram de argamassas e concretos, empregando os referidos sinais de excitação com banda de frequências lineares variando de 20 kHz a 750 kHz e confrontados com tons puros de 50 kHz, 100 kHz, 300 kHz, 500 kHz, 700 kHz e 1000 kHz.

Também foram realizados ensaios em amostras de concreto para verificar a superior resolução dos pulsos codificados. Experimentos em amostras de alumínio foram usados para validar a aplicação do novo método e expressões desenvolvidas para cálculo de um coeficiente de reflexão combinado (CRC) e da atenuação acústica em meios de baixa perda, os quais poderão proporcionar contribuições em norma.

Enfim, a partir dos resultados encontrados verificou-se a superior capacidade do uso dos pulsos codificados na obtenção de menores erros relativos (simulações) e desvios padrões (experimentos) na determinação dos tempos de trânsito ultrassônico. Também se comprovou por meio de simulações e experimentos a aplicação de um novo método e a determinação do CRC que permite melhor estimativa na determinação da atenuação acústica em meios de baixa perda.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

APPLICATIONS OF CODED PULSES AND NEW ULTRASONIC  
ARRANGEMENTS FOR CONCRETE

Tiago Costa Dourado

April/2022

Advisors: Webe João Mansur  
Rodrigo Pereira Barretto da Costa-Félix

Department: Civil Engineering

This work aims to expand the understanding of the application of ultrasound in cementitious materials through the study of classical arrangements and the evaluation of capacity of coded pulses as excitation signals with respect to conventional pure tones, in the measurement of the wavefront travel times.

Additionally, from the literature review it was possible to group the main ultrasonic methods and to present a new method that allows improvement of these measurements in non-destructive contact ultrasound tests.

Simulations were carried out, based on scenarios that approximated to masses and concretes, using the aforementioned excitation signals with a band of linear frequencies ranging from 20 kHz to 750 kHz and faced with pure tones of 50 kHz, 100 kHz, 300 kHz, 500 kHz, 700 kHz and 1000 kHz.

Tests were also carried out on concrete samples to verify the lower resolution of the encoded pulses. Experiments on aluminum samples were used to validate the application of the new method and expressions developed to calculation of a combined reflection coefficient (CRC) and acoustic attenuation in low-loss means, which may provide standard contributions.

Finally, from the results found, it was verified the superior capacity the use of coded pulses to obtain smaller relative errors (simulations) and standard deviations (experiments) in the determination of ultrasonic transit times. It was also proved through simulations and experiments the application of a new method and the determination of the CRC that allows better estimation in the determination attenuation of acoustic attenuation in low-loss media.

# Sumário

<b>Lista de Figuras</b>	<b>xi</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>xv</b>
<b>Lista de Abreviaturas</b>	<b>xvii</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Motivação para o estudo dos ensaios não destrutivos em concreto . . . . .	3
1.2 Objetivo . . . . .	4
1.3 Estrutura da tese . . . . .	5
<b>2 Fundamentação teórica</b>	<b>6</b>
2.1 O material concreto, seus elementos constituintes e principais propriedades . . . . .	6
2.1.1 O concreto de pós reativos (CPR) . . . . .	8
2.2 Propagação do sinal ultrassônico . . . . .	9
2.3 Perdas da energia do sinal ultrassônico . . . . .	12
2.4 Disposição dos transdutores e principais métodos ultrassônicos . . . . .	19
2.5 Sinais de excitação utilizados em ultrassom . . . . .	21
2.5.1 Sinais impulsivos . . . . .	22
2.5.2 Sinais aleatórios ou pseudo-aleatórios . . . . .	22
2.5.3 Sinais determinísticos . . . . .	23
2.5.4 Sinais codificados em frequência linear . . . . .	23
2.6 O modelo convolucional ultrassônico . . . . .	26
2.7 Histórico dos <i>chirps</i> em aplicações médicas . . . . .	28
2.8 Histórico dos <i>chirps</i> para ensaios não-destrutivos . . . . .	31
2.9 <i>Chirps</i> em aplicações de materiais cimentícios . . . . .	32
2.10 Normas relativas à determinação da velocidade ultrassônica em concreto . . . . .	34
2.10.1 Normas técnicas de aplicação de ultrassom em concreto . . . . .	34
<b>3 Materiais e métodos</b>	<b>37</b>
3.1 Fatores influenciadores da propagação ultrassônica em concreto . . . . .	37

3.2	Apresentação do método combinado ou <i>1T2R</i>	37
3.3	Gráficos e equações de decaimento da amplitude, CRC e atenuação acústica	38
3.4	Métricas de comparação dos tempos de percurso e diagrama das medições ultrassônicas	39
3.4.1	Apresentação das métricas utilizadas	39
3.4.2	Diagrama das medições ultrassônicas	40
3.5	Simulações computacionais	40
3.5.1	Introdução	40
3.5.2	Considerações para as modelagens	41
3.5.3	Simulações 1D - 03 Grupos	42
3.5.4	Simulações 2D - Grupo único	50
3.6	Experimentos ultrassônicos	51
3.6.1	Descrição do UC em CPR para comparação da resposta dos sinais de excitação	51
3.6.2	Descrição do UC em amostras de alumínio	52
<b>4</b>	<b>Resultados</b>	<b>54</b>
4.1	Apresentação dos fatores influenciadores da propagação ultrassônica em concreto	54
4.2	Gráficos e equações de decaimento da amplitude e atenuação acústica	55
4.2.1	Definições, gráficos e desenvolvimento matemático	55
4.2.2	Protocolo para o cálculo do CRC	64
4.2.3	Determinação da atenuação acústica para meios de baixa perda	64
4.3	Resultados das simulações computacionais	65
4.3.1	Resultados 1D - 03 Grupos	65
4.3.2	Resultados 2D - Grupo único	83
4.4	Resultados dos experimentos ultrassônicos	84
4.4.1	Ensaios no CPR para comparação da resposta dos sinais de excitação	84
4.4.2	Ensaios em alumínio para determinação do CRC	87
<b>5</b>	<b>Discussões</b>	<b>92</b>
<b>6</b>	<b>Conclusões</b>	<b>94</b>
6.1	Contribuições da pesquisa para o estado da arte e normas	95
<b>Referências Bibliográficas</b>		<b>96</b>

<b>A</b>	<b>105</b>
A.1 Revisitando conceitos de perdas da energia dos sinais . . . . .	105
A.2 Detalhamento do protocolo para o cálculo da atenuação acústica . . .	106
A.3 Função Janela . . . . .	107
A.4 Sistemas de equações acopladas no k-Wave . . . . .	107
A.4.1 O método pseudoespectral do espaço-k . . . . .	111
A.5 Introdução ao conceito de incerteza . . . . .	112
A.5.1 Requisitos para um modelo matemático . . . . .	112
A.5.2 Parcelas da incerteza de medição . . . . .	113
A.5.3 Incertezas do tipo A . . . . .	113
A.5.4 Incertezas do tipo B . . . . .	113
A.6 Selecionando frequências mais efetivas para ultrassom em concreto .	114
A.7 Artigos desenvolvidos . . . . .	116
A.7.1 Artigo 1 . . . . .	116
A.7.2 Artigo 2 . . . . .	117

# Listas de Figuras

2.1	Principais tipo de ondas. Em a) Modelo de propagação da onda longitudinal; b) Modelo de propagação da onda transversal; c) Modelo de propagação da onda Rayleigh; e d) Modelo de propagação da onda Love. Adaptado de PANAMETRICS (2022)	12
2.2	Formas de propagação de ondas.	13
2.3	Incidência da onda numa interface. Em a) incidência normal à superfície divisória dos meios 1 e 2 e b) a incidência ocorre em um ângulo oblíquo à superfície da fronteira entre os meios.	18
2.4	Ilustração com indicação dos principais fatores responsáveis pelas perdas do sinal.	19
2.5	Métodos de propagação dos pulsos ultrassônicos recomendados pela norma BS-EN-12504-4 (2004).	20
2.6	Método de propagação pulso-eco ou impulso-eco.	21
2.7	Representação da função delta de Dirac.	22
2.8	Representação de um ponto <b>A</b> no campo de pressões acústicas de um transdutor plano de raio $a$ .	27
2.9	Representação do processo convolucional a partir de um pulso de excitação convolvendo com a função refletividade para gerar a resposta de um sistema no domínio temporal e os equivalentes espectros de frequências possibilitados pela aplicação da FFT (adaptado de COSTA-FÉLIX (2005)).	29
2.10	Principais vantagens da utilização de pulsos codificados.	34
3.1	Representação do arranjo de aquisição seguindo o método <i>1T2R</i> .	38
3.2	Infográfico representativo das medições ultrassônicas desenvolvidas.	40
3.3	Esboço dos possíveis sinais da partição de amplitude, com incidência perpendicular em uma interface de um sistema ultrassônico de contato.	43
3.4	Métodos empregados na simulação do chamado grupo 1. Em: a) Pulso-eco; b) Pulso-eco <i>1T2R</i> ; c) Transmissão direta; e d) <i>1T2R</i> .	44

3.5	Modelos para a simulação do chamado grupo 2. Esboço representando em: a) uma peça de argamassa; b) uma peça de concreto; c) uma peça de concreto armado; e d) uma peça de concreto armado em processo de corrosão. . . . .	47
3.6	Esboço dos modelos de simulação referentes ao caso 5 do grupo 3, correspondendo a um meio cimentício imerso em água com agregados e uma barra de aço. . . . .	50
3.7	As imagens mostram em a) a amostra paralelepípedica de CPR com 68,33 mm de largura e referente ao caminho acústico; b) Aparato experimental para garantir alinhamento e força de contato constante; c) Sistema de aquisição montado na amostra; e d) Tela do aplicativo do software LabView <sup>TM</sup> usado para gerar e comprimir os <i>chirps</i> medidos. . . . .	52
3.8	Aparato de aquisição ultrassônico para os métodos PE, PE-1T2R e TT. . . . .	53
4.1	Principais fatores influenciadores do pulso ultrassônico no concreto. . . . .	54
4.2	Esboço da redução de amplitude ao longo do tempo para: a) Método de PE; b) método de TT; e c) método 1T2R. . . . .	57
4.3	Sinais temporais de excitação antes e após aplicação da função janela Gaussiana (acima) e respectivos espectros de frequência (abaixo) utilizados para o grupo 1. . . . .	66
4.4	Sinais temporais dos três métodos aplicados em simulação. . . . .	67
4.5	Espectro de frequência dos sinais nos três métodos aplicados neste grupo. . . . .	69
4.6	Pulso codificado do <i>chirp</i> 1 de 100 a 700 kHz. Em a) <i>Chirp</i> original no domínio temporal; b) o espectro de frequências antes de a); c) <i>Chirp</i> após aplicação da função janela do tipo Hanning; e d) Espectro de c) e que foi utilizado como sinal de excitação no software k-Wave. . . . .	71
4.7	Tons puros empregados neste grupo de simulações. Em a) o sinal no tempo para 100 kHz; b) o espectro de frequências de a); Em c) o sinal no tempo para 300 kHz; d) o espectro de frequências de c); Em e) o sinal no tempo para 500 kHz; f) o espectro de frequências de e). . . . .	71
4.8	Arranjo de aquisição do modelo 1 utilizando o k-Wave. . . . .	72
4.9	Sinais recebidos a partir do modelo 1. . . . .	72
4.10	Arranjo de aquisição do modelo 2 utilizando o k-Wave. . . . .	73
4.11	Sinais recebidos a partir do modelo 2. . . . .	73
4.12	Arranjo de aquisição do modelo 3 utilizando o k-Wave. . . . .	74
4.13	Sinais recebidos a partir do modelo 3. . . . .	74
4.14	Arranjo de aquisição do modelo 4 utilizando o k-Wave. . . . .	75

4.15 Sinais recebidos a partir do modelo 4. . . . .	75
4.16 Em a) Sinal temporal do <i>chirp</i> crescente linear de 20 a 720 kHz; em b) Sinal a) após aplicação de uma função janela Tukey; c) Espectro de frequências de a); e d) Espectro de frequências de b). . . . .	76
4.17 Em a) o sinal temporal capturado a partir de tom puro de 500 kHz; e b) Espectro de frequência de a). . . . .	77
4.18 Em a) o sinal temporal refletido e capturado em R1 após o <i>chirp</i> de 20 e 700 kHz cruzar o modelo 1; em b) Zoom do retângulo indicado em a). . . . .	77
4.19 Em a) o sinal temporal refletido e capturado em R1 após o tom puro de 500 kHz cruzar o modelo 1; em b) Zoom do retângulo indicado em a). . . . .	78
4.20 Em a) o sinal temporal medido em R2 a partir do <i>chirp</i> de 20 a 700 kHz; em b) Zoom do retângulo indicado em a). . . . .	78
4.21 Em a) o sinal temporal medido em R2 a partir do tom puro de 500 kHz; em b) zoom do retângulo indicado em a). . . . .	79
4.22 Instantâneos do modelo 1 empregando tons puros de 500 kHz. Em a) para o caso 0 (apenas barra de aço); b) para o caso 5 (barra de aço mais 5 elementos quadrados); c) para o caso 0 (apenas barra de aço) usando LFMP com uma faixa de 100 kHz a 750 kHz sem compressão por deconvolução); e d) para o caso 5 (barra de aço mais 5 elementos quadrados). . . . .	84
4.23 a) Sinais temporais medidos da resposta da excitação por <i>chirp</i> na amostra CRC; b) respectivos espectros de frequência a partir do janelamento do primeiro sinal recebido para cada uma das 5 aquisições. Em c) e d) são as mesmas representações para os tons puros nas frequências de 100 kHz, 300 kHz e 500 kHz. . . . .	85
4.24 Sinais temporais dos três métodos empregados no bloco de alumínio com espessura em torno de B1=40 mm seguindo as frequências indicadas. . . . .	88
4.25 Sinais temporais dos três métodos empregados no bloco de alumínio com espessura em torno de B1=70 mm seguindo as frequências indicadas. . . . .	88
4.26 Espectro de frequência (FFT) para cada um dos quatro sinais de tempo janelados para os três métodos utilizados nas simulações no bloco com espessura em torno de B1=40 mm seguindo as frequências indicadas. . . . .	89



# Listas de Tabelas

2.1	Classificação das britas de acordo com a dimensão do agregado. . . . .	7
2.2	Dados de coeficiente de atenuação e velocidade longitudinal extraídos da tese de LONG (2000), considerando amostras de argamassa e concreto atendendo ao critério de $\lambda/3 > D_g$ . . . . .	16
3.1	Valores das propriedades usadas nas simulações do grupo 1. . . . .	44
3.2	Variáveis usadas nas simulações para o grupo 1. . . . .	44
3.3	Coeficientes de reflexão e transmissão entre materiais usados nos dois grupos de dados simulados. . . . .	45
3.4	Métodos empregados no grupo 1. . . . .	45
3.5	Janelas dos sinais medidos. . . . .	45
3.6	Variáveis usadas nas simulações para o grupo 2. . . . .	48
3.7	Valores das propriedades usadas nas simulações do grupo 3. . . . .	49
3.8	Variáveis usadas nas simulações para o grupo 3. . . . .	49
4.1	Valores das propriedades usadas nas simulações do grupo 2. . . . .	66
4.2	Valores das amplitudes pico-a-pico para cada um dos sinais janelados. . . . .	67
4.3	Valores calculados para os CRC no domínio do tempo e seguindo as equações indicadas para os métodos estudados. . . . .	68
4.4	Amplitudes medidas e usadas nos cálculos dos coeficientes de reflexão combinados no domínio da frequência. . . . .	69
4.5	Valores calculados para os coeficientes de reflexão combinados no domínio da frequência. . . . .	70
4.6	Diferenças nos tempos de trânsito entre o caso 0 e o caso 5 para o modelo 1 do grupo 3 com valores teóricos $1,52 \mu s$ em R1 e $0,76 \mu s$ em R2. . . . .	80
4.7	Diferenças nos tempos de trânsito entre o caso 0 e o caso 5 para o modelo 2 do grupo 3 com valores teóricos $-1,96 \mu s$ em R1 e $-0,983 \mu s$ em R2. . . . .	81

4.8 Diferenças nos tempos de trânsito entre o caso 0 e o caso 5 para o modelo 3 do grupo 3 com valores teóricos como -1,92 $\mu$ s em R1 e -0,960 $\mu$ s em R2. . . . .	82
4.9 Amplitudes absolutas, tempos instantâneos, tempos de trânsito e desvios padrões para cada sinal de excitação antes do filtro, em amostra CPR. . . . .	86
4.10 Amplitudes absolutas, tempos instantâneos, tempos de trânsito e desvios padrões para cada sinal de excitação após o filtro, em amostra CPR. . . . .	87
4.11 Percentuais de CRC nas amostras de alumínio no domínio temporal. .	90
4.12 Percentuais de CRC nas amostras de alumínio no domínio da frequência. .	90
4.13 Valores calculados dos coeficientes de atenuação para experimentos com blocos B1 (40 mm) e B2 (70 mm) nas frequências F1 (2,25 MHz) e F2 (5 MHz), a partir do método de PE. . . . .	91
4.14 Valores calculados dos coeficientes de atenuação para experimentos com blocos B1 (40 mm) e B2 (70 mm) nas frequências F1 (2,25 MHz) e F2 (5 MHz), a partir do método de PE. . . . .	91
A.1 Tabela de associação entre frequências, comprimento de onda e velocidade ultrassônica, para 4 classes de agregados graúdos $D_g$ normalmente empregadas no concreto, limitadas pelo seu diâmetro máximo. Em negrito, estão as frequências recomendadas de acordo com o critério de minimização do efeito dispersivo ( $D_g < \lambda/3$ ). . . . .	115

# **Lista de Abreviaturas**

A/C	Relação água-cimento, p. 6
APN	Approximate Prony Method, p. 35
BS	British Standard, p. 38
B	Largura de banda do sinal emitido, em inglês, <i>bandwidth</i> , p. 27
CAP	Concreto de Alta Performance, p. 8
CPR	Concreto de pós-reativos, p. 8
CRC	Coeficiente de reflexão Combinado, p. 5
DB	Produto do tempo de duração do pulso com sua largura de banda, p. 27
END	Ensaio não-destrutivo, p. 2
FFT	Fast Fourier Transform, p. 28
FT	Transform Fourier, p. 25
$F_c$	Frequência central, p. 27
GUM	Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, p. 41
HOS	Espectros de ordem superior, em inglês, <i>Higher-Order-Spectra</i> , p. 34
HPC	High Performance Concrete, p. 8
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform, p. 28
LFMP	Linear frequency modulation pulse, p. 26
LFM	Linear Frequency Modulated, p. 3
MDF	Método das Diferenças Finitas, p. 46

MDF	Método dos Elementos de Contorno, p. 46
MEF	Método dos Elementos Finitos, p. 46
MLF	Modulação Linear em Frequência, p. 3
MLF	Sinal Modulado com frequência linear, em inglês, <i>Linear Frequency Modulated (LFM)</i> , p. 33
MPS	Método pseudospectral, p. 47
PED	Alongamento e deconvolução do pulso, em inglês, <i>Pulse Elongation and Deconvolution</i> , p. 33
RILEM	Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, systèmes de construction et ouvrages, p. 37
RPC	Reactive Concrete Powder, p. 8
S/R	Relação Sinal Ruído, em inglês, <i>Signal-to-Noise Ratio</i> , p. 27
SAC	Spatial Average Correction, p. 14
SISO	Simple input simple output, em português, simples entrada, simples saída, p. 32
SLIT	Sistema Linear Invariante no Tempo, p. 32
TF	Transformada de Fourier, p. 25, 31
T	Duração do sinal emitido, p. 27
UC	Ultrassom por contato, p. 1
UPV	Velocidade do Pulso Ultrassônico, em inglês, <i>Ultrasonic Pulse Velocity</i> , p. 37
VIM	Vocabulário Internacional de Metrologia, p. 43

# Capítulo 1

## Introdução

Por ser o concreto um dos insumos mais requisitados na construção civil, responsável pela maioria das estruturas edificadas no último século, pode-se classificá-lo como um dos elementos construtivos mais importantes da cadeia de produção global.

No entanto, a sua grande variabilidade de produção ainda o distancia dos padrões de confecção seriada. Além de reservar grande dependência com as suas propriedades físicas e químicas, tanto individualizadas como combinadas aos seus elementos constituintes, depende também das condições ambientais em que o seu processo de endurecimento (cura do concreto) ocorre.

As peculiaridades atinentes a este material podem contribuir para tornar a investigação e o conhecimento instantâneo das suas condições internas tão desafiadoras quanto importantes.

Quando a inspeção visual por um profissional, aliado ou não às informações do projeto no âmbito da estrutura final executada, em inglês “*as built*<sup>1</sup>”, não são suficientes para compreender e diagnosticar um problema em uma estrutura, surge como alternativa a adoção de um dos diversos métodos e técnicas de ensaios não destrutivos.

Estratégias comuns praticadas em ensaios não-destrutivos consistem em análises preliminares do objeto alvo a ser avaliado e aprofundamento no entendimento acerca das pretensões da investigação. Esta análise da anamnese da estrutura tenderá a reunir informações úteis, muitas vezes decisivas, principalmente à sensibilidade de um operador atento e experiente.

Assim, consciente do custo-benefício na escolha ideal das ferramentas a adotar, é recomendável delinear um plano de investigação realístico com base na disponibilidade dos equipamentos, associados às suas possíveis limitações, principalmente as relacionadas à sua capacidade de identificar os alvos com resolução adequada na

---

<sup>1</sup>A expressão *as built*, é um termo da língua inglesa com tradução literal de “como construído”. Nas áreas de engenharia e arquitetura é relacionada às condições finais em que a implantação do projeto de uma edificação foi concluída.

profundidade de interesse.

Neste contexto, diante das opções de ensaios não destrutivos, as ferramentas de emissão de pulso ultrassônico ganham destaque, principalmente por não proporcionarem quaisquer danos ao operador. Vale mencionar que esta capacidade muitas vezes é decisiva em relação a outros métodos que, embora considerados não destrutivos, emitem radiação ionizante<sup>2</sup>.

A faixa do espectro de frequências em que os transdutores ultrassônicos são confeccionados para operar está normalmente entre 20 kHz e 20 MHz. Para finalidades médicas e ensaios não destrutivos na maioria dos metais, as mais recomendadas são próximas do seu limite superior (1 MHz a 10 MHz). Para aplicações em concreto a faixa mais adequada se aproxima do limite inferior do espectro ultrassônico, e as normas recomendam a utilização de frequências entre 50 kHz e 200 kHz (MALHOTRA e CARINO, 2003) e (POPOVICS e ROSE, 1994), mas com registros de pesquisas que chegaram a 1000 kHz.

A literatura especializada em pulsos ultrassônicos tem importado técnicas de sucesso de outras áreas do conhecimento para melhor desenvolver a sua competência investigativa frente aos seus alvos de interesse.

Uma destas técnicas consagradas, oriunda dos estudos de radar, é a dos pulsos codificados, também chamada de *chirp*. A referida técnica se caracteriza por utilizar sinais de excitação com largura da banda de frequência e duração superiores às técnicas convencionais.

O uso dos pulsos codificados em processamento de sinais começou logo após a segunda guerra mundial, visando aprimorar os sistemas de radar na detecção dos alvos aéreos. Desde então, várias outras aplicações relacionadas ao ultrassom, seja na área médica ou nos ensaios não-destrutivos (END), têm sido observadas, aceleradas pela escalada dos recursos tecnológicos, como por exemplo: expansão de memória dos equipamentos de armazenamento, avanços na capacidade de leitura dos sinais digitais e crescente disponibilidade de softwares para geração de algoritmos para tratamento dos dados.

O desenvolvimento e a publicação de normas aplicadas à utilização de pulsos de ultrassom em concreto são práticas relativamente recentes, com os primeiros registros a partir da década de 70. Nos trabalhos de KOMLOS *et al.* (1996) e POPOVICS *et al.* (1997), que serão discutidos no capítulo 2, foram descritos estudos comparativos das principais normas que tratam da determinação da velocidade ultrassônica longitudinal em concreto.

---

<sup>2</sup>Radiação ionizante é a emissão capaz de ionizar átomos e moléculas, ou seja, possui energia suficiente para arrancar elétrons a partir de átomos ou moléculas. O termo radiação ionizante está relacionado a quaisquer partículas capazes de produzir ionização em um meio, sendo “diretamente ionizantes” as partículas carregadas, como elétrons, pósitrons, prótons, alfas e “indiretamente ionizantes” aquelas sem carga, como fótons (raios X e raios gama) e nêutrons.

De acordo com MISARIDIS e JENSEN (2005), dentre os sinais modulados em frequência, aquele que fornece o melhor custo-benefício para manipulação e qualidade de resultados, quando utilizados na modulação de sinais ultrassônicos, é o de modulação linear em frequência (MLF), em inglês, *Linear Frequency Modulated* (LFM) (COSTA-FELIX e MACHADO, 2018). Este tipo de sinal tem envoltória da forma de onda constante, frequência instantânea com variação temporal linear e distribuição de energia uniforme entre os diferentes componentes espectrais do sinal.

Considerando as capacidades desses tipos de sinais de excitação ultrassônico e as limitações já identificadas pelos tons puros, as quais serão discutidas no próximo capítulo, esta pesquisa explora ambos tipos de pulsos de emissão determinísticos e apresenta análises comparativas dos seus resultados, tanto por meio de simulações como de experimentos.

## 1.1 Motivação para o estudo dos ensaios não destrutivos em concreto

No livro *Concrete Planet: The Strange and Fascinating Story of the World's Most Common Man-Made Material*, o seu autor COURLAND (2011) relatou que o custo total estimado de reconstrução da infraestrutura das edificações em concreto, apenas nos Estados Unidos, estava na época na ordem de trilhões de dólares.

Conforme já mencionado, o concreto é hoje o elemento construtivo mais empregado na construção civil mundial e sua produção em larga escala o torna o terceiro maior contribuinte para as emissões de dióxido de carbono na atmosfera, vindo logo após as da indústria automobilística e usinas de carvão.

Adicionalmente, vale citar que a produção de cimento é responsável pela emissão de 5 % a 7 % do dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) (MEHTA, 2014) e (ALI *et al.*, 2011) e que as previsões apontam que o emprego do concreto deverá aumentar nas próximas décadas.

Em virtude deste cenário, as grandes nações e instituições alinhadas com os critérios de sustentabilidade descritos no Protocolo de Kyoto, que propõe metas para redução das emissões de ( $\text{CO}_2$ ), têm procurado incentivar políticas de minimização ou uso cada vez mais eficiente do referido insumo (UNEP, 2012).

Essas particularidades deste material de construção contribuem no entendimento de que o mundo precisa fazer o seu uso de forma mais racional, seja pelo incentivo da sua reciclagem, seja por meio da confecção de estruturas mais duradouras e mantendo o auxílio dos mecanismos de investigação e maior controle associados às técnicas de monitoramento da integridade das estruturas já existentes, sempre procurando prolongar a sua vida útil (IEA-2018, 2018).

Face ao papel desse material para o desenvolvimento das civilizações modernas, é inegável o valor científico-industrial do estudo de uma ferramenta não destrutiva como o ultrassom. Pode-se resumir que o maior desafio desta pesquisa é produzir melhorias para o estado da arte de medições ultrassônicas em concreto. Para tanto, além de elencar os principais responsáveis pelas interferências na propagação ondulatória destes sinais, discutir métodos existentes e desenvolver um novo método de medição, seleciona-se como foco a comparação acerca de quais sinais de excitação ultrassônico permitem fornecer resultados com maior precisão.

## 1.2 Objetivo

O principal objetivo desta tese é analisar a precisão<sup>3</sup> e exatidão<sup>4</sup> das medições dos tempos de percurso de pulsos codificados como sinais de excitação ultrassônicos de contato<sup>5</sup> (UC), comparando-os com os tradicionais tons puros em ensaios não destrutivos aplicados a concreto.

Como objetivos específicos para esta pesquisa, destacam-se:

1. Elencar em classes os principais fatores que interferem na propagação de ondas ultrassônicas em concreto;
2. Apresentar uma nova abordagem para o coeficiente de reflexão em ultrassom de contato bem como um novo método de transmissão e recepção denominado de *1T2R*, que combina dois métodos tradicionais: pulso-eco e transmissão direta;
3. Desenvolver um modelo matemático para determinação de um coeficiente de reflexão combinado (CRC) entre a superfície do transdutor, acoplante e meio investigado bem como da estimativa da atenuação acústica para meios de baixa perda;
4. Efetuar simulações computacionais confrontando qualitativamente e quantitativamente a resposta de tons puros contra pulsos codificados, seguindo os arranjos clássicos e o desenvolvido nesta pesquisa em cenários cimentícios definidos; e

---

<sup>3</sup>Segundo o VIM (2012), a precisão ou fidelidade de medição consiste no grau de concordância entre indicações ou valores medidos, por meio de medições repetidas, no mesmo meio ou em objetos similares, sob determinadas condições.

<sup>4</sup>Segundo o VIM (2012), a exatidão de medição consiste no grau de concordância entre um valor medido e um valor verdadeiro para um mensurando. Vale ressaltar que a exatidão de medição não é uma grandeza e a ele não deve ser atribuído um valor numérico. Uma medição é dita mais exata quanto menor erro de medição.

<sup>5</sup>Nesta pesquisa, sempre que se mencionar a expressão “ultrassom de ou por contato”, faz-se referência ao emprego de sistemas ensaiados fora de um meio aquoso e com emprego de algum fluido que permite o acoplamento entre os transdutores e o meio investigado.

5. Projetar e construir um aparato experimental que permita melhorar a repetibilidade de medições ultrassônicas e viabilize a comparação entre diferentes tipos de pulsos ultrassônicos em concreto.

### 1.3 Estrutura da tese

Este trabalho está organizado da seguinte forma:

O capítulo 1 apresenta a introdução do trabalho, esboçando seus objetivos bem como a forma de organização da tese.

O capítulo 2 lança os conceitos básicos acerca dos concretos convencionais e sobre um tipo de concreto especial conhecido como Concreto de Pós Reativos (CPR). Apresenta-se a revisão bibliográfica para entendimento dos pulsos codificados em ultrassom, bem como a teoria básica dos principais conceitos que envolvem a física ondulatória, com destaque aos efeitos relativos às perdas na amplitude dos sinais ao longo da sua propagação. Também pormenoriza as técnicas tradicionais empregadas em ensaios ultrassônicos.

O capítulo 3 exibe os materiais e métodos das atividades desenvolvidas neste trabalho. Descreve os parâmetros e as configurações utilizadas nas modelagens que simulam os cenários cimentícios bem como os experimentos ultrassônicos, detalhando os cenários e métricas que permitiram confrontar qualitativamente e quantitativamente os resultados.

O capítulo 4 apresenta os resultados, iniciando com um quadro que reúne os principais fatores responsáveis pela propagação ultrassônica em concreto. Simulações e experimentos são apresentados por meio de gráficos e tabelas contendo os resultados seguidos das discussões acerca da comparação entre tons puros e pulsos codificados. Na sequência, apresenta-se a abordagem físico-matemática que permite redefinir um coeficiente de reflexão combinado (CRC) entre o transdutor, o fluido acoplante e o meio investigado. São apresentados esboços gráficos e expressões matemáticas representativas do decaimento da energia acústica ao longo da propagação. A partir das equações desenvolvidas apresenta-se o protocolo para se chegar ao CRC e a uma expressão simplificada para estimativa da atenuação acústica para meios de baixa perda.

O capítulo 5 apresenta as discussões complementares da tese.

O capítulo 6 apresenta as conclusões relativas à pesquisa com foco nos objetivos específico e secundários estabelecidos. Adicionalmente, traz as contribuições para o estado da arte e perspectivas de inclusões em normas.

# Capítulo 2

## Fundamentação teórica

### 2.1 O material concreto, seus elementos constituintes e principais propriedades

Segundo PFEIL (1988), o concreto<sup>1</sup> é um material formado pela mistura de água, cimento, agregado graúdo' (brita ou cascalho) e agregado miúdo (areia). Em outra definição referindo-se a um elemento formado pelos constituintes do concreto e extraída da norma ABNT-NBR-6118 (2014), especificamente no item 3.1.2, “elementos de concreto simples são aqueles que não possuem qualquer tipo de armadura ou que a contenha em quantidade inferior ao mínimo exigido para o concreto armado”.

A relação entre as quantidades de água e cimento é definida na literatura pelo fator água/cimento ( $A/C$ ). Este parâmetro representa papel decisivo na definição das quantidades dos demais componentes para preparação da mistura. Também se observa que ele é inversamente proporcional à resistência do concreto e influencia as seguintes propriedades do concreto:

**Trabalhabilidade:** está relacionada com a capacidade da mistura final do concreto se moldar a um compartimento (fôrmas) para obtenção das conformações geométricas de projeto;

**Porosidade:** a porosidade consiste na fração relativa de poros existentes em um volume e está relacionada com a maior ou menor densidade da matriz sólida no interior do concreto. Logo, de um modo geral, esta propriedade está inversamente relacionada com a resistência à compressão e à proteção contra ataques externos nos elementos cimentícios. Vale ressaltar que os efeitos da porosidade na resistência do concreto encontram-se bem documentados na literatura, como em POPOVICS (1977) e no trabalho de PANZERA *et al.* (2011). Neste último, inclusive, o autor

---

<sup>1</sup>Vale lembrar que, a critério do projetista, o concreto também poderá receber parcelas reduzidas de pozolanas, sílica ativa e uma série de aditivos químicos, sempre com o objetivo de agregar características que sem eles não possuiria.

tece comentários a respeito da relação entre velocidade ultrassônica longitudinal e a porosidade no concreto;

**Permeabilidade:** representa a facilidade com que um corpo permite que um fluido seja transportado através dos seus interstícios. Sua magnitude também possui similaridades com os efeitos descritos para a porosidade, uma vez que quanto mais permeável for uma peça de concreto, mais facilmente permitirá que partículas estranhas infiltrarem no seu interior; e

**Durabilidade:** está relacionada com a vida útil de uma peça e se reflete, principalmente, na capacidade de resistir às intempéries ao longo do tempo. Ou seja, as premissas de dimensionamento, confecção e manutenção serão definitivas para um certo nível de durabilidade.

Fechando as considerações relativas aos elementos básicos constituintes dos concretos convencionais, vale ressaltar que os agregados chegam a representar até 75 % da composição do concreto e são os insumos de menor custo na sua composição de preços. Os agregados são divididos em dois grupos de acordo com a dimensão dos seus grãos constituintes. Os de maior granulometria têm diâmetro máximo ( $\emptyset_{\text{máx}}$ ) superior a 4,8 mm são designados de acordo com a norma ABNTNBR-7211 (2019) como agregados graúdos (britas e cascalhos) e são comercializados pela indústria da construção civil brasileira de acordo com a classificação apresentada na tabela 2.1. Os agregados de diâmetro inferior a este valor são classificados como areias.

Tabela 2.1: Classificação das britas de acordo com a dimensão do agregado.

Tipo de agregado	$D_g$ (mm)
Areias	< 4,8
Brita 0	4,8 a 9,5
Brita 1	9,5 a 19
Brita 2	19 a 38
Brita 3	38 a 76
Pedra-de-mão	> 76

Quando o aço é inserido na mistura de concreto para atender requisitos estruturais, obtém-se o concreto armado, que segundo definição presente na norma ABNTNBR-6118 (2014), (item 3.1.3), ‘elementos de concreto armado são aqueles cujo comportamento estrutural depende da aderência entre o concreto e armadura, e nos quais não se aplicam alongamentos iniciais nas armaduras antes da materialização dessa aderência’. O caso oposto, ou seja, as peças de concreto em que alongamentos iniciais são impostos às armaduras correspondem aos chamados concretos protendidos.

Conforme mencionado, as descrições apresentadas para os concretos simples

referem-se essencialmente aos convencionais, que correspondem aos mais empregados na construção civil. No entanto, várias outras classificações podem ser dadas a depender da: densidade dos insumos (concreto leve ou pesado); da sua forma de compactação (concreto de alto ou de baixo adensamento); condições de fabricação (concreto usinado, concreto pré-fabricado), das condições da armadura (de forma passiva - concreto armado e de forma ativa - concreto protendido), da necessidade de alta performance (concreto de pós reativos (CPR)), dentre outras.

Ou seja, o concreto possui a versatilidade de ser confeccionado com variações que lhe permitem atender condições específicas de utilização. Esta pesquisa não possui como foco detalhar tais especificidades deste material. No entanto, detalhes adicionais serão dados para o último tipo citado (CPR), propositalmente selecionado para a fase experimental desta pesquisa pelos motivos que serão relatados na seção seguinte.

### 2.1.1 O concreto de pós reativos (CPR)

Nos últimos 20 anos, com o estabelecimento de novas metodologias de dosagem de componentes, evolução no domínio dos aditivos, e a progressiva associação de minerais ultrafinos (pós reativos) e microfibras metálicas ou orgânicas, chegou-se a uma geração de concretos de ultra-alto desempenho. O novo material foi desenvolvido a partir de concretos de alto desempenho (CAD), em inglês conhecido como *high performance concrete* (HPC) e, no Brasil, conhecidos como concreto de pós reativos (CPR). A palavra “pós”, no caso, é plural de pó, e refere-se aos ultrafinos da composição. Em inglês, *reactive powder concrete (RPC)* e em francês, *beton fibré à ultra performance (BFUP)* (VOO e FOSTER, 2009).

Em relação aos concretos convencionais, esses produtos de última geração apresentam resistências à compressão até oito vezes superior, e à flexão, dez vezes maior. Isso significa uma resistência à compressão entre 150 e 250 MPa (bem superior aos 20 a 30 MPa dos concretos comuns), e mesmo dos 120 MPa dos CAD/HPC da geração anterior e já bem difundidos (WASHER e HARTMANN, 2004).

Quanto à tração na flexão, a resistência fica entre 20 e 50 MPa, dependendo do tipo de fibra (metálica ou orgânica). Em laboratório, no entanto, já são desenvolvidos concretos capazes de resistir a compressões superiores a 800 MPa, preparados com agregados metálicos, cura sob pressão e tratamento térmico.

Auto-adensável, este tipo de concreto dispensa equipamentos de vibração e é excelente tanto na moldagem de pré-fabricados quanto na recomposição de estruturas deterioradas, uma vez que adere facilmente a outros concretos. Sua estrutura muito compacta após a cura, graças aos minerais ultrafinos, torna o concreto pouco poroso e pouco permeável à água, aos gases e substâncias agressivas do meio ambiente

(BHUSARI, 2017).

A alta resistência à compressão oferecida pelo material possibilita a execução de estruturas mais leves. Na construção civil, esse tipo de concreto de ultra-alto desempenho tem uma infinidade de usos possíveis: tabuleiros de pontes, viadutos e passarelas, vigas, colunas, estacas, cornijas, tubos, túneis pré-fabricados, painéis acústicos, placas de revestimento de fachada, objetos de arte, mobiliário urbano e de interiores, cascos de embarcações, elementos de reservatórios etc (VOO e FOSTER, 2009).

O primeiro exemplo de uso desse concreto é de 1997, na construção da passarela de Sherbrooke, Canadá, que teve assessoria do professor Pierre Claude Aitcin, do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Sherbrooke.

## 2.2 Propagação do sinal ultrassônico

A frente de onda acústica é gerada a partir de vibrações mecânicas em um meio e estas oscilações são similares aos movimentos observados em um sistema massa-mola, onde o deslocamento da posição média das partículas do meio podem ser aproximadas por uma função senóide no tempo (KINO, 1987).

Assim, quando ocorre uma vibração em um meio, tensões internas são desencadeadas para recolocar as suas partículas em suas posições iniciais e como forças interatômicas coexistem entre partículas vizinhas, as referidas oscilações proporcionam a transferência de energia e promovem deslocamentos em escalas reduzidas. A forma como ocorrem tais conversões no movimento interno das partículas, o modo como elas vibram e a velocidade com que se propagam estão intrinsecamente relacionados às propriedades físicas dos materiais, as quais influenciam o comportamento elástico da propagação da ondas acústicas (KRAUTKRAMER e KRAUTKRAMER, 1977).

Para o entendimento dos mecanismos responsáveis pela propagação do sinal ultrassônico em um meio é essencial apresentar os conceitos de comprimento de onda,  $\lambda$ , período de um ciclo de vibração,  $T$ , e frequência de oscilação,  $f$ , são relacionados entre si e com a velocidade de propagação em um meio.

O comprimento de onda consiste na distância percorrida em uma oscilação completa ou um ciclo realizado pelas partículas no interior do meio que sofre a perturbação (ver ilustrações em 2.1), representado em unidade de comprimento.

Cada movimento completo, correspondente ao tempo para deslocamento de um comprimento de onda  $\lambda$ , é denominado de período de uma vibração, sendo apresentado em unidade de tempo.

O número de oscilações das partículas em determinado tempo é a frequência, representada em número de oscilações por segundos (ciclos/s) ou Hertz (Hz). As

equações 2.1, 2.2 e 2.3 permitem relacionar esses parâmetros que são essenciais nas análises acústicas.

Partindo-se da equação básica:

$$V = \frac{D}{T} \quad (2.1)$$

em que  $V$  é a grandeza velocidade e  $D$  o deslocamento.

Tem-se:

$$f = \frac{1}{T} \quad (2.2)$$

e

$$\lambda = \frac{V}{f} \quad (2.3)$$

Para o estudo da propagação dos sinais ultrassônicos, quatro tipos básicos de ondas merecem destaque e serão sucintamente introduzidos a seguir para melhor embasar os princípios de funcionamento das ondas mais requisitadas pela prática dos ensaios ultrassônicos, sobretudo em ensaios não destrutivos.

As duas primeiras ondas que serão apresentadas são conhecidas como ondas de corpo ou de volume, sendo a primeira delas as ondas compressionais, também conhecidas como ondas longitudinais ou por ondas  $P$ . Nesse tipo de propagação, as partículas formam regiões de compressão e outras de rarefação e vibram paralelamente à propagação da frente de onda. Sua velocidade é função do módulo de elasticidade longitudinal,  $E$ , (também conhecido como módulo de Young), do coeficiente de Poisson,  $\nu$ , e da densidade  $\rho$ . A equação que descreve a velocidade acústica longitudinal (MALHOTRA e CARINO, 2003), é dada por:

$$V_L = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (2.4)$$

O segundo grupo de ondas, também relevantes para os estudos de ultrassom, principalmente em sólidos, são as ondas cisalhantes, também conhecidas como ondas transversais ou por ondas  $S$ . Nesse tipo de onda as partículas do meio vibram em direção perpendicular ao deslocamento da frente de onda. A equação geral que descreve a velocidade transversal,  $V_T$ , depende somente do módulo de elasticidade transversal ou de cisalhamento,  $G$ , e da densidade,  $\rho$ , do meio. A sua equação é dada por:

$$V_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2.5)$$

Pela expressão 2.5, conclui-se que para materiais em que a resistência ao cisalha-

mento seja nula, em que se enquadram os gases e a maioria dos líquidos, principalmente os de baixa viscosidade em que  $G = 0$ , a velocidade ultrassônica transversal será nula.

E considerando o caso de materiais isotrópicos, o módulo de elasticidade longitudinal se relaciona ao transversal e à relação de Poisson pela equação:

$$E = 2G(1 + \nu) \quad (2.6)$$

Pode-se agrupar 2.6 e 2.5, para encontrar outra relação para a velocidade transversal  $V_T$  da forma:

$$V_T = \sqrt{\frac{E}{(2\rho(1 + \nu))}} \quad (2.7)$$

E substituindo as equações 2.4 e 2.5, chega-se a uma relação entre as velocidades longitudinais  $V_L$  e transversais  $V_T$ , por meio da relação de Poisson  $\nu$ :

$$V_L = V_T \sqrt{\frac{(2 - 2\nu)}{(1 - 2\nu)}} \quad (2.8)$$

A partir da equação 2.8 também pode-se depreender que a velocidade longitudinal  $V_L$  sempre será superior à velocidade transversal  $V_T$ , uma vez que o valor da raiz sempre fornece valores maiores que a unidade. Outra contribuição que se obtém desta expressão é que a partir dos valores das velocidades compressional e cisalhante é possível determinar o valor do coeficiente de Poisson para um meio.

As ondas longitudinais e transversais são classificadas como ondas de corpo ou de volume e são as mais empregadas em inspeções ultrassônicas. As ilustrações a) e b) da figura 2.1 visa melhor explicitar o entendimento do movimento dessas ondas em um meio.

Adicionalmente, outros tipos de onda são encontrados nos ensaios ultrassônicos e são estudadas em menor escala que as primeiras, talvez devido à maior complexidade de entendimento dos seus princípios de geração, manipulação e processamento dos seus dados. Elas são as ondas de superfície, classificadas em ondas Rayleigh ou onda  $R$  e as ondas de Love, também conhecidas como Lamb ou de chapa.

As ondas Rayleigh correspondem a uma combinação da propagação da onda longitudinal com a transversal. Ocorrem quando as partículas em vibração por efeito acústico descrevem uma elipse retrógrada alinhada ao plano vertical. Essas ondas propagam-se na superfície limite entre ar e um meio sólido.

E por fim, também empregada em algumas aplicações específicas para ensaios de END, principalmente para inspeções em chapas e em avaliação de paredes de tubulações, estão as ondas de Love, que se originam a partir da propagação de uma onda superficial em uma peça com espessura da ordem de grandeza do comprimento

da onda propagado. As ilustrações c) e d) da figura 2.1 visam melhor explicitar o entendimento do movimento destas ondas em um meio. Para maiores detalhes sobre os princípios de funcionamento das ondas mecânicas em um meio, recomenda-se a leitura de RAYLEIGH (1877), VIKOROV (1967) e ROSE (1999).

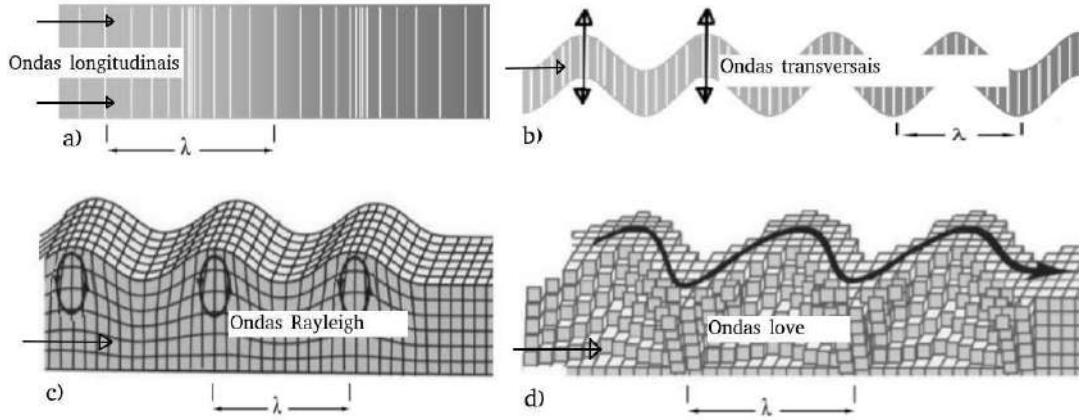


Figura 2.1: Principais tipos de ondas. Em a) Modelo de propagação da onda longitudinal; b) Modelo de propagação da onda transversal; c) Modelo de propagação da onda Rayleigh; e d) Modelo de propagação da onda Love. Adaptado de PANAME-TRICS (2022)

## 2.3 Perdas da energia do sinal ultrassônico

Recorrendo-se a conceitos da física geométrica<sup>2</sup>, sabe-se que:

1. quando uma frente de onda atinge uma superfície limite entre propriedades físicas distintas, pelo princípio de Huygens, cada ponto da frente de onda tenderá a gerar novas fontes pontuais;
2. pelo princípio de Fermat, a luz percorrerá sempre o percurso de menor tempo. Este conceito é extrapolado para a propagação de ondas sonoras;
3. os raios incidente e refletido pertencem ao um mesmo plano;
4. o ângulo de incidência em uma superfície será igual ao de reflexão; e
5. a trajetória da onda transmitida obedecerá à *Lei de Snell*, enunciada como: “A razão entre o seno do ângulo de incidência (meio 1) e o seno do ângulo de refração (meio 2) é sempre constante, para um dado comprimento de onda”.

---

<sup>2</sup>A física geométrica estuda o comportamento da onda quando esta interage com objetos maiores que o seu comprimento de onda, representando a direção de propagação da frente de onda por meio da teoria de traçamento de raios.

Analizando a propagação de uma frente de onda para meios ideais, pode-se assumir que a intensidade da onda sofre redução somente pelo efeito da divergência esférica da onda durante a sua propagação, pois a energia do fator gerador da onda passa a ser distribuída por um maior volume ou superfície. Nesse cenário, a onda plana, por não sofrer os efeitos de atenuação do meio, não tem redução no seu campo de pressões. Já para uma onda esférica (ver tipos de ondas na figura 2.2), propagando-se em campo distante, simplesmente diminuiria sua amplitude linearmente com a distância e sua energia específica inversamente com o quadrado da distância à fonte (KRAUTKRAMER e KRAUTKRAMER, 1977).

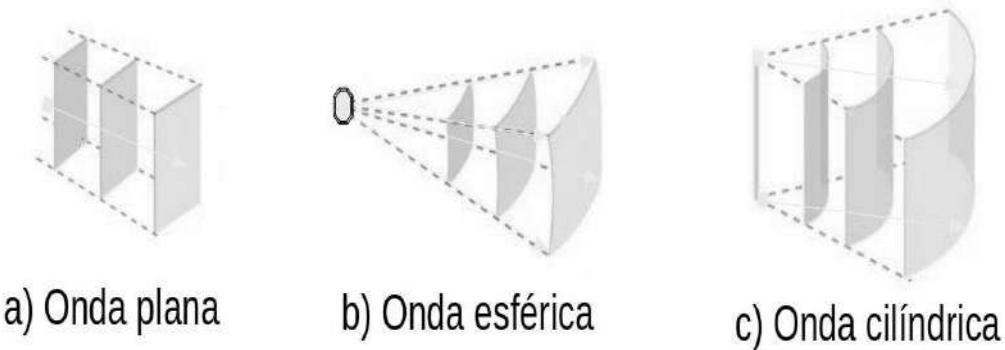


Figura 2.2: Formas de propagação de ondas.

Quando se trata de um sistema ultrassônico de medição, geralmente é composto por cabos, conectores, equipamentos de aquisição e transmissão dispostos sob um meio o qual se deseja investigar.

Além das perdas de intensidade da onda ao longo da propagação em um meio, existem outros processos de perda de energia ou que levam à sua atenuação. Pode-se dizer que os processos de decaimento da energia do sinal começam instantaneamente após sua excitação. Em geral, podem ser divididos em dois grupos. O primeiro grupo comprehende perdas não pontuais, ou seja, quando a redução na energia ocorre ao longo da propagação da frente da onda. Eles são compostos por:

- Perdas geométricas que podem ser de dois tipos: cilíndricas (quando o decaimento da amplitude ocorre em função de  $r$ ) e esférica (decaimento de amplitude com  $r^2$ , que ocorre na maioria dos transdutores do tipo pistão) Nos casos em que a onda plana não é aproximada para o modelo plano, quando os transdutores possuem uma superfície plana, pode-se necessitar efetuar uma correção na energia do sinal. Esse fator de ajuste no valor da energia efetivamente lida no transdutores é chamado de correção espacial média, do inglês *Spatial Average Correction* (SAC) (ZEQIRI e BOND, 1992) e (COSTA-FÉLIX, 2005).

- Perdas de interação: atenuação por absorção ( $\alpha_{ab}$ ), em inglês *absorption*, e espalhamento ( $\alpha_s$ ), em inglês *scattering*.

O segundo grupo compreende perdas pontuais, ou seja, referem-se às reduções instantâneas de amplitude. São compostas de:

Perdas devido aos contrastes de impedâncias. Ocorrem normalmente na passagem da frente de onda através da fronteira entre diferentes materiais e geram partições convertidas em reflexões e transmissões de acordo com as relações entre impedâncias dos meios; e Perdas devido a elementos difratores que a frente de onda encontra durante a propagação. Referem-se às quedas de energia devido às difrações pontuais, em extremidades. Quando os transdutores são do tipo pistão (superfície plana) esse fenômeno ocorrerá nas bordas dos transdutores, uma vez que estes possuem superfície finita, devendo ocorrer tanto na transmissão quanto no instante da recepção. A depender da posição em que a frente de onda seja captada por um transdutor em relação a seu campo próximo ou campo afastado, também pode ser necessário aplicar um fator de correção para minimizar erros de medição. Perdas no instante da leitura por parte dos equipamentos de medição, que se referem às perdas que ocorrem na leitura dos transdutores.

As perdas de energia referentes à absorção dos sinais acontecem quando há transformação de um tipo de energia para outra e são os custos das conversões observadas. A formulação apresentada por MASON e MCSKIMIN (1947) retrata o comportamento da atenuação dos materiais correlacionado a um coeficiente de atenuação global  $\alpha_{at}$  para um meio a partir da soma de duas parcelas, sendo uma de absorção  $\alpha_{ab}$  e outra relativa ao espalhamento  $\alpha_s$ , dependentes da frequência  $f$ , do comprimento da onda  $\lambda$ , do tamanho dos grãos (no caso do concreto representado pelos agregados, que normalmente é representado pelo seu diâmetro médio  $D_g$ ) e constantes relacionadas aos meios, de acordo com as equações:

$$\alpha_{at} = \alpha_{ab} + \alpha_d \quad (2.9)$$

No caso da parcela de absorção, esta é representada pela expressão:

$$\alpha_{ab} = C_1 f \quad (2.10)$$

segundo essa abordagem, a constante  $C_1$  não é dependente do tamanho dos grãos e nem da anisotropia do meio.

E quanto à parcela representada pelo espalhamento  $\alpha_d$  do meio, três regimes podem ser identificados:

No primeiro caso, quando o tamanho dos grãos é muito pequeno em relação ao comprimento de onda  $D_g \ll \lambda$ , denominada região de Rayleigh, a equação para a parcela do espalhamento será:

$$\alpha_{d1} = C_2 F_A D_g^3 f^4 \quad (\text{quando } D_g \ll \lambda) \quad (2.11)$$

em que a constante  $C_2$  é independente do tamanho dos grãos e da anisotropia e  $F_A$  é uma constante relacionada às propriedades anisotrópicas do meio.

Experimentalmente, resultados satisfatórios utilizando 2.11 já são conseguidos com  $D_g < \lambda/3$ .

O segundo caso ocorre quando o tamanho dos grãos é muito maior do que o comprimento de onda, seguindo à equação:

$$\alpha_{d2} = C_3 F_A \frac{1}{D_g} (\text{quando } D_g \gg \lambda) \quad (2.12)$$

experimentalmente, valores de aproximadamente  $D_g > 3\lambda$  já atendem à equação de 2.12. em que a constante  $C_3$  também é independente do tamanho dos grãos e da anisotropia do meio.

A terceira e última condição ocorre quando o diâmetro médio dos grãos se encontra no intervalo  $\lambda/3 < D_g < 3\lambda$ , se encontrando na mesma ordem de grandeza do comprimento de onda. Nesta condição, ocorre um tipo de espalhamento no regime denominado de estocástica e o efeito dispersivo aumenta na segunda potência da frequência, de acordo com a expressão:

$$\alpha_{d3} = C_4 f + C_5 D_g f^2 (\text{quando } \lambda/3 < D_g < 3\lambda) \quad (2.13)$$

em que  $C_4$  e  $C_5$  são constantes não afetadas pelo diâmetro dos grãos nem pela anisotropia.

Alguns trabalhos como o de GOSS e DUNN (1979) conseguiram mostrar por meio de dados experimentais que, de uma maneira geral, as perdas por atenuação são dominadas pelos efeitos de absorção e a quantidade de energia perdida pelo espalhamento é bem inferior, podendo ser desprezada quando comparada às perdas por absorção.

O trabalho de PHILIPPIDIS e AGGELIS (2005) apresentou resultados expressivos na avaliação das frequências empregadas na excitação dos meios e o comportamento das velocidades e atenuações acústicas em amostras de concreto, tendo mostrado que a dosagem dos agregados interferem na velocidade ultrassônica do concreto, enquanto que o tamanho dos agregados tendem a influenciar o processo de atenuação em peças cimentícias.

A partir da explanação acerca das condições de cálculo dos coeficientes de espalhamento do meio, avaliando as especificidades dos ambientes cimentícios, é sempre desejável buscar a faixa de frequências correspondente ao primeiro regime apresentado ( $\alpha_{d1}$ ) para  $D_g < \frac{\lambda}{3}$ , ou seja, as baixas frequências do espectro ultrassônico (20 kHz a 500 kHz) permitem fornecer, para a faixa de velocidade da onda longitudinal normalmente encontrada nos concretos, comprimentos de onda superiores ao triplo da maioria dos agregados empregados nas argamassas e concretos.

Nesse contexto, o concreto pode ser considerado como um material homogêneo, em que a parcela de espalhamento pode ser desprezada, uma vez que seu valor é muito inferior à parcela de absorção do meio. Assim, a expressão geral para a atenuação de uma peça cimentícia pode ser apresentada pelo coeficiente de absorção, preservando uma relação linear com a frequência da forma de 2.10 e reproduzida a seguir:

$$\alpha_{at} = \alpha_{ab} = \alpha f \quad (2.14)$$

em que a constante  $\alpha$  é denominado de coeficiente de atenuação do meio e  $f$  a frequência da frente de onda.

A literatura não apresenta muitos trabalhos acerca da atenuação de peças de concreto, o que não é surpresa, uma vez que a grande variabilidade de combinações e fatores que podem afetar não somente a velocidade (ver figura 4.1), mas também a propagação da frente de onda de um modo geral, com destaque para os efeitos provocados pelos efeitos do espalhamento e da difração. Desse modo, a literatura do tema ainda não possui robustez suficiente para dar embasamento técnico ao desenvolvimento de normas que forneçam protocolos de seleção dos insumos contendo critérios padronizados para a confecção de certos elementos cimentícios.

O trabalho de LONG (2000) avaliou os processo de perdas de energia de algumas amostras de argamassa e concreto e chegou aos valores de coeficiente de atenuação apresentados na tabela 2.2.

Tabela 2.2: Dados de coeficiente de atenuação e velocidade longitudinal extraídos da tese de LONG (2000), considerando amostras de argamassa e concreto atendendo ao critério de  $\lambda/3 > D_g$ .

Mistura	Argamassa	Concreto com $D_g = 5$ mm	Concreto com $D_g = 10$ mm
Coeficiente de atenuação [ $\alpha$ (kHz Nepers/m)]	0,012	0,0454	0,0568
$V_L$ (m/s)	3898	3888	3864

## Impedância

Adicionalmente ao decaimento da energia através do deslocamento da frente de onda ao longo de um meio, as perdas decorrentes das mudanças de impedâncias ocorrem devido às diferenças de propriedades físicas entre meios adjacentes, caracterizadas pelas mudanças repentinas da frente de onda para se adequar ao meio em que ela foi refratada e refletida. A impedância acústica para um meio consiste no produto entre a velocidade com que a frente de onda está se propagando pela sua densidade, e está representada em 2.15:

$$Z = \rho V \quad (2.15)$$

em que  $Z$  é a impedância acústica para um meio,  $\rho$  a densidade do meio e  $V$  a velocidade da onda acústica no meio.

As informações que são medidas em um levantamento acústico correspondem a vetores contendo números, em que cada elemento corresponde à amplitude do sinal refletido ou refratado, referente a um ponto de amostragem temporal. Quando a frente de onda incide sobre uma fronteira que limita materiais de diferentes impedâncias acústicas, as ondas geradas e suas respectivas amplitudes, são divididas na proporção de um coeficiente de transmissão ou de reflexão que são dependentes do ângulo de incidência bem como das impedâncias dos meios vizinhos. Para incidência normal as equações de transmissão e reflexão são dadas pelas seguintes expressões:

$$R_{(1 \rightarrow 2)(\perp)} = -R_{(2 \rightarrow 1)(\perp)} = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (2.16)$$

$$T_{(1 \rightarrow 2)(\perp)} = T_{(2 \rightarrow 1)(\perp)} = \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (2.17)$$

em que  $R_{(1 \rightarrow 2)(\perp)}$  representa o coeficiente de reflexão na passagem do meio 1 para o meio 2 que é simétrico ao valor para  $R_{(2 \rightarrow 1)(\perp)}$ , que por sua vez é o coeficiente de reflexão na passagem do meio 2 para o meio 1.  $T_{(1 \rightarrow 2)(\perp)}$  representa o coeficiente de transmissão na passagem do meio 1 para o meio 2 que é o mesmo valor para  $T_{(2 \rightarrow 1)(\perp)}$ , que por sua vez é o coeficiente de transmissão na passagem do meio 2 para o meio 1, e  $Z_1$  e  $Z_2$  são as impedâncias acústicas para os meios 1 e 2, respectivamente.

Para incidência oblíqua da frente de onda em uma interface seguindo um ângulo de  $\alpha$ , parte da energia será refletida e outra parte refratada. As direções destas ondas são balizadas pela *Lei de Snell*, que embora originalmente desenvolvida para ótica, funciona de forma análoga tanto para a incidência de ondas acústicas como eletromagnéticas, obedecendo à expressão:

$$\frac{\sin(\theta_i)}{\sin(\theta_t)} = \frac{V_1}{V_2} \quad (2.18)$$

em que  $\alpha_i$  e  $\alpha_t$  são os ângulos de incidência e de refração, respectivamente, da frente de onda e  $V_1$  e  $V_2$  são as velocidades referentes aos meios 1 (em que a onda se originou) e 2 (em que a onda refratou), respectivamente. A ilustração 2.3 b), faz a representação da frente de onda por meio de um vetor, artifício comumente empregado na teoria de raios. Para maiores discussões acerca dessa teoria, o livro CERVENY (2001) apresenta explanações sobre a técnica aplicada a meios acústicos relacionados à sísmica de reflexão e refração.

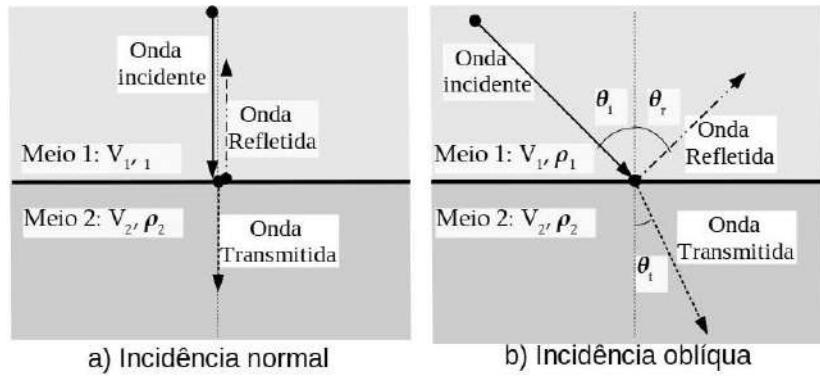


Figura 2.3: Incidência da onda numa interface. Em a) incidência normal à superfície divisória dos meios 1 e 2 e b) a incidência ocorre em um ângulo oblíquo à superfície da fronteira entre os meios.

### Outros fatores responsáveis por perdas da energia do sinal

Outros tipos de fenômenos eventualmente podem prejudicar, ou por vezes até inviabilizar um ensaio de ultrassom. A *rugosidade da superfície* do material em que o transdutor emitirá os sinais durante o ensaio tem um nível de aspereza, principalmente se tratando de materiais cimentícios, e a transmissão poderá ser afetada de várias maneiras, podendo oferecer variações ponto a ponto indesejadas no ângulo de incidência da frente de onda na peça, o que resulta também em maior espalhamento do feixe. As frequências menores serão menos afetadas por esse efeito, devido a seu maior comprimento de onda (MARTIN, 1975). A literatura recomenda que a rugosidade superficial seja inferior a  $\frac{1}{10\lambda}$ .

Nos ensaios ultrassônicos, a necessidade de inserção de um elemento *acoplante* consiste em estabelecer uma camada condutora de som entre o transdutor e a peça ensaiada. O papel do material acoplante tem por finalidade excluir qualquer possibilidade de camada de ar que possa inviabilizar a transmissão acústica entre os sensores e o meio (ANDREUCCI, 2014). Deve-se colocar uma película fina e uniforme entre as superfícies do transdutor e a peça. De modo geral quanto maior a rugosidade das superfícies (no caso do concreto) deve-se selecionar materiais acoplantes de maior viscosidade como mel, graxa, vaselina sólida, dentre outros.

A existência de bordas ou de fendas em um anteparo em subsuperfície podem provocar a ocorrência de mais um tipo de fenômeno físico denominado de *difração* e que está diretamente relacionado às propriedades das ondas ao se propagarem ponto a ponto.

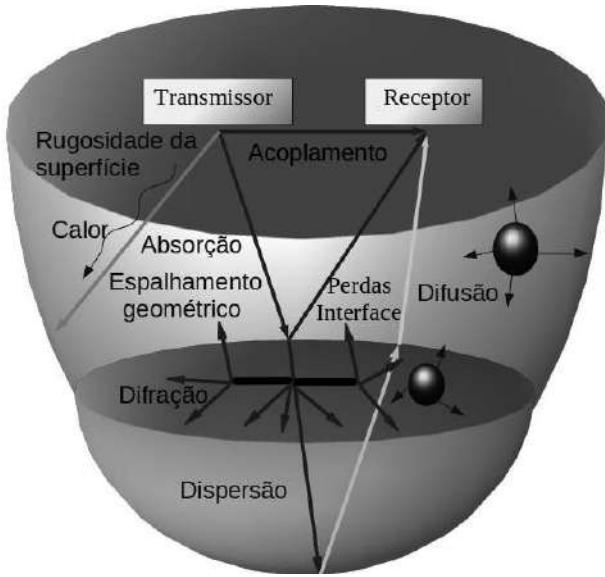


Figura 2.4: Ilustração com indicação dos principais fatores responsáveis pelas perdas do sinal.

## 2.4 Disposição dos transdutores e principais métodos ultrassônicos

A norma BS-EN-12504-4 (2004) exibe recomendações para ensaios não destrutivos (END), em inglês *nondestructive tests* (NDT), em concreto e sugere as configurações de arranjos para os sensores de transmissão e recepção exibidos na figura 2.5.

1. *A transmissão direta*, conforme modelo apresentado na figura 2.5a), ocorre quando os transdutores são posicionados em faces opostas da peça a ser inspecionada. Ainda segundo a referida norma, sempre que possível, esse arranjo deve ser priorizado desde que a energia transferida seja máxima entre transdutores.
2. *A transmissão semi-direta*, conforme modelo mostrado na figura 2.5b), ocorre quando os transdutores estão posicionados em faces adjacentes e segundo a referida norma, esse arranjo possui sensibilidade intermediária entre os dois modelos de arranjo.
3. *A transmissão indireta ou de superfície*, conforme modelo apresentado na figura 2.5c), ocorre quando os sensores de emissão e recepção são fixados na mesma interface. A referida norma recomenda que tal arranjo além de ser usado quando somente uma face for disponível, também é recomendado quando se deseja informações de profundidade de trincas ou quando a qualidade média da superfície do concreto não é tão boa.

Assim, na figura 2.6 pode-se verificar as configurações recomendadas não somente pela norma BS-EN-12504-4 (2004), mas como para a maioria das normas relativas a testes ultrassônicos em concreto.

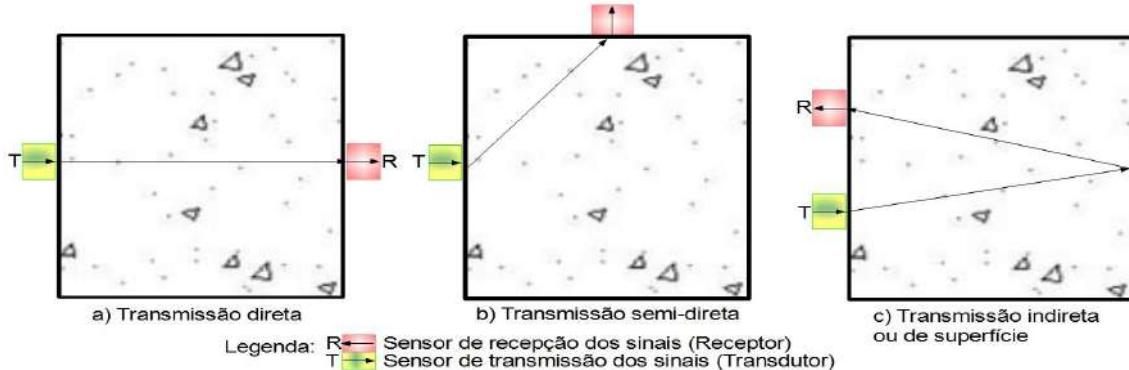


Figura 2.5: Métodos de propagação dos pulsos ultrassônicos recomendados pela norma BS-EN-12504-4 (2004).

Como no caso de END os ensaios mais comuns são aqueles que necessitam de contato, é comum a preocupação em se garantir que esta união seja a mais perfeita possível entre as faces dos sensores e a superfície em que são realizadas as medições, seja de emissão ou recepção dos sinais. À exceção dos ensaios ultrassônicos por acoplamento a ar<sup>3</sup> e os ensaios utilizando transdutores de imersão à prova-d'água em que a própria água faz o papel de acoplante, é necessário a inclusão de um fluido que viabilize a transmissão dos sinais. Ou seja, o acoplamento consiste na inserção de um fluido, que para materiais compósitos como o concreto normalmente é de alta viscosidade, a ser inserido entre a face de contato dos sensores com a superfície do material em que os pulsos ultrassônicos serão transmitidos e recebidos.

#### *Método do pulso-eco*

O método do pulso-eco começou a ser aplicado na primeira guerra mundial para localizar objetos sob a água e FIRESTONE (1942) foi o primeiro a reconhecer a importância desse método para os ensaios não destrutivos, particularmente para a detecção de falhas, tendo a técnica sido aplicada efetivamente durante a segunda grande guerra (KRAUTKRAMER e KRAUTKRAMER, 1977).

Neste arranjo de inspeção ultrassônica, fortemente requisitado para detecções de espessuras, descontinuidades e vazios em ensaios não destrutivos em metais, um único transdutor piezoeletrico pode funcionar ao mesmo tempo, transmitindo os pulsos e fazendo a recepção dos sinais ultrassônicos da resposta da leitura contendo a energia refletida, que é convertida em sinal elétrico.

Entretanto, o referido método tem recebido pouca apreciação em ensaios ultrassônicos em concreto, devido basicamente a dois fatores: a grande perda da energia

<sup>3</sup>Os ensaios com acoplamento a ar (em inglês *Air-coupled*).

às vezes inviabiliza a leitura no retorno da frente de onda e a energia da onda direta prejudica a leitura dos pulsos de retorno. O uso da técnica têm sido tão restrito que as normas do tema não tem recomendado a sua utilização.

No entanto, muitas pesquisas recentes empregando esse método podem ampliar os tipos de arranjos, pois várias aplicações recentes têm utilizado esta técnica em concreto a partir do emprego de um único transdutor, com o objetivo de: detectar vazamentos e rachaduras, localizar elementos estruturais como barras e dutos e fornecer informações sobre dimensões geométricas.

Vale ressaltar que embora o método de pulso eco não seja recomendado na maioria das normas relativas ao tema, as simulações computacionais unidimensionais utilizadas nessa pesquisa empregaram esse arranjo apresentado na 2.6, a fim de melhor entender o comportamento dos pulsos ultrassônicos.

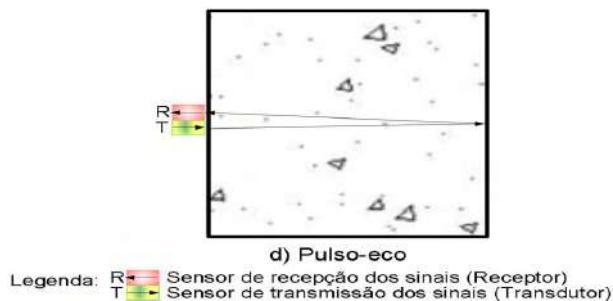


Figura 2.6: Método de propagação pulso-eco ou impulso-eco.

## 2.5 Sinais de excitação utilizados em ultrassom

Cada forma de excitação possui suas características particulares e no caso dos sistemas ultrassônicos são emitidas por meio de sensores capazes de transmiti-los aos meios de interesse. Quando um pulso é enviado como perturbação de um sistema, a partir do instante em que a sua frente de onda começa a se propagar, ocorrem fenômenos físicos decorrentes das interações com os elementos do sistema, sejam sensores de transdução, ruídos aleatórios e o mais importante, o próprio meio.

Um dos fenômenos esperados é o alongamento da forma do seu pulso, perdendo os componentes de maior frequência em consequência, principalmente, das perdas por absorção. Em resumo, um traço<sup>4</sup> recebido pode ser entendido como a resposta da convolução da função refletividade com um pulso de excitação variável no tempo (em inglês *time-varying pulse*). Vale lembrar que o traço final será mais complexo, pois ainda haverá de se considerar a leitura da superposição por diversos possíveis

---

<sup>4</sup>Da-se o nome de traço ou sinal de ecos ao vetor ou matriz unidimensional contendo as informações obtidas para cada leitura de um elemento receptor.

tipos de ruídos, tais como reflexões múltiplas, ondas aéreas, ruídos coerentes e não coerentes relacionados à fonte (KEAREY *et al.*, 2009).

As principais formas de excitação de sistemas acústicos são: impulso, ruído aleatório e sinais determinísticos.

### 2.5.1 Sinais impulsivos

Os sinais impulsivos, representados pela função delta de Dirac, correspondem a infinito no ponto zero (ponto impulsivo) e zero nos demais pontos. A sua integral ao longo de toda reta é a unidade, conforme representada na figura 2.7. Observando a sua representação matemática e gráfico depreende-se que se trata de uma abstração matemática difícil de se obter experimentalmente.

$$\delta(x) = \begin{cases} +\infty, & x = 0 \\ 0, & x \neq 0 \end{cases}$$

Figura 2.7: Representação da função delta de Dirac.

### 2.5.2 Sinais aleatórios ou pseudo-aleatórios

Sinais aleatórios ou pseudo-aleatórios são sinais que possuem como diferencial a distribuição aleatória da fase, na qual o sinal temporal também tende a possuir um comportamento aleatório. Dentre os diversos tipos de ruído, o *ruído branco* consiste em um tipo de sinal aleatório com igual intensidade para frequências diferentes, gerando uma densidade espectral de potência constante e independente da frequência, ou seja, não possuindo relação com a variação da frequência. Outro tipo é o *ruído rosa*, que por sua vez consiste em um tipo de sinal em que tanto o espectro de frequências como a densidade espectral de potência são inversamente proporcionais à frequência do sinal.

Assim, é válido frisar que o ruído branco pode se assemelhar ao ruído rosa, ou seja, podendo chegar a possuir o mesmo conteúdo de frequências, mas sempre irão diferir na forma como a potência do sinal se espalha no tempo, uma vez que, enquanto para o primeiro o espectro e densidade espectral são constantes, para o último diminuem à medida que a frequência aumenta.

### 2.5.3 Sinais determinísticos

Por sinais determinísticos entende-se como pulsos que podem ser decompostos em um número finito de senóides. No caso de um sinal senoidal contendo uma única frequência, pela sua simplicidade de geração, também são chamados de “tons puros”, pois toda a potência do sinal é centrada em uma das componentes do espectro de frequências, pode-se atingir a relação sinal ruído (*S/R*), em inglês, *Signal-to-Noise Ratio* (SNR) máxima (COSTA-FÉLIX, 2005).

Por serem os sinais determinísticos os de melhor controle são os mais requisitados na metrologia e nos equipamentos desenvolvidos pela indústria de produtos ultrassônicos. Também por esses motivos, serão o foco de trabalho nas investigações dessa pesquisa, para comparação com os resultados de tons puros ou uma extensão deles, denominados de “*tone burst*”.

Assim, conforme mencionado, os tons puros foram comparados com sinais de excitação modulados por frequência linear de banda larga. O software de modelagem k-Wave possui uma rotina interna usada para gerar tons puros no domínio do tempo, dada por:

$$f(t) = \sin(2\pi f_c t) \quad (2.19)$$

em que  $f(t)$  é o sinal de tom puro no domínio do tempo,  $f_c$  é a frequência central do tom puro e  $t$  é o tempo. O sinal no domínio do tempo pode ser transformado para o domínio da frequência após a aplicação de uma transformada de Fourier (TF), em inglês *Fourier Transform* (FT). Para um tom puro, o TF leva à concentração da energia em um único ponto do espectro (COSTA-FELIX e MACHADO, 2015).

Na tese de doutorado de BERRIMAN (2004) ele faz um relato de desvantagens encontradas na utilização de tons puros. Primeiro alerta que o tipo de transdutor pode limitar o nível de potência para a excitação e cita que para o caso de transdutores capacitivos essa limitação tende a prevenir danos às finas membranas que compõem o sensor. Segundo, para maximizar a *S/R*, a frequência do tom puro deve assemelhar-se à de ressonância do alvo a investigar. Da mesma forma, alerta a respeito das dificuldades de ajuste das frequências desejadas para atingir determinada resolução, que podem proporcionar aquisições mais demoradas e possíveis desajustes na reconfiguração do arranjo. Isto se torna um problema ainda maior quando o objetivo é detectar defeitos de tamanhos desconhecidos.

### 2.5.4 Sinais codificados em frequência linear

Nesta seção, a formulação matemática para a criação de um *chirp* será apresentada. Os pulsos modulados em frequência linear (LFMP) podem ser gerados nos domínios

de tempo ou frequência (COOK e BERNFELD, 1967). Nesta pesquisa, os recursos do MATLAB<sup>TM</sup> foram utilizados para geração dos *chirps* no domínio do tempo, seguindo a expressão geral:

$$ch_{LFMP}(t) = a(t) \cdot \cos[2\pi\phi(t)], -\frac{T}{2} \leq \frac{T}{2} \quad (2.20)$$

e com fase:

$$\phi(t) = (f_c + \frac{B}{2T} \cdot t) \cdot t \quad (2.21)$$

em que  $ch_{LFMP}(t)$  é o pulso modulado em frequência linear,  $f_c$  é a frequência central no sistema,  $a(t)$  e  $\phi(t)$  são as funções moduladas em amplitude e fase, respectivamente. Geralmente,  $a(t)$  é uma constante não nula, e  $\phi(t) = \beta t^2$ , sendo  $\beta$  a derivada da frequência em relação ao tempo, ou seja,  $\beta = \frac{\partial f}{\partial t}$ . Em teoria, o FMP linear tem o espectro de amplitude constante a partir de  $f_0$  até  $f_0 + \beta T$ , onde  $f_0$  representa a frequência mais baixa do sinal a construir e  $T$  representando a duração do pulso (HARPUT, 2012).

Relevantes pesquisas de doutorado (MISARIDIS, 2001), (COSTA-FÉLIX, 2005), (DANTAS, 2011) e (HARPUT, 2012) exploraram a fundo as capacidades dos pulsos codificados ultrassônicos na área médica, enquanto que as teses de LONG (2000) e BERRIMAN (2004) pesquisaram estes sinais em concreto. Tais trabalhos geraram artigos de destaque e que serão discutidos ao longo deste trabalho. Vale ressaltar que somente em 2019, por meio da publicação da norma intitulada *Ultrasonics - Methods for the characterization of the ultrasonic properties of materials* (IEC-63081, 2019), ocorreu a inclusão desse ferramental em uma norma técnica, destacando a sua relevância para a área bem como motivando ainda mais investigações complementares para ajudar a despertar o interesse de incluir esse recurso também nos equipamentos requisitados pelo mercado de ultrassom.

O conceito de pulsos codificados foi bem definido na tese de doutorado de COSTA-FÉLIX (2005) como sinais gerados a partir de alguma estratégia que permita a decodificação da resposta de um sistema a sua excitação, por meio de recursos matemáticos oriundos do processamento de sinais. Também no referido trabalho, ele identificou na literatura cerca de uma dezena de terminologias usadas para definir a técnica de pulsos codificados e suas variações. Para esta tese, sempre que se fizer referência a este recurso, serão utilizadas as nomenclaturas de sinais ou pulsos codificados, varreduras de senos ou *chirps*.

A utilização dos pulsos codificados, essencialmente, é requisitada quando almeja-se aumentar a *S/R* bem como a capacidade de penetração do sinal. Esta técnica possui duas particularidades que a tornam de grande interesse em tratamento de sinais: a primeira delas é que, normalmente, o processo de decodificação dos sinais (a ser melhor descrito no próximo capítulo) leva em conta o pulso fonte, gerado no

domínio do tempo ou da frequência; e a outra, também descrita na literatura da modulação de sinais trata do aumento do produto  $DB$ , que consiste no produto da duração do sinal  $D$  pela sua largura de banda  $B$ , em inglês, *bandwidth*, também chamado de razão de compressão do pulso (em inglês, *pulse compression ratio*) (KINO, 1987).

Esta última particularidade é rotineiramente usada como base para avaliar os ganhos de determinados pulsos codificados comparando-os a sinais de tom puro ou em relação a um impulso unitário, visto que, para um pulso curto de duração  $T$  e frequência do sinal  $f_c$ , este representa um sinal com largura de banda  $B = 1/D$  em torno de  $f_c$  (MISARIDIS, 2001), ou seja, para um tom puro o produto  $DB$  está na ordem da unidade.

Resumidamente, a adoção de frequências altas viabilizarão melhores resultados de resolução na leitura dos pulsos, conforme podemos observar a partir da análise da equação 2.22 que define a resolução axial ( $r_{axial}$ ):

$$r_{axial} = \frac{l}{2} = \frac{V \cdot D}{2} = \frac{V}{2 \cdot B} \quad (2.22)$$

em que  $l$  é o comprimento do pulso,  $D$  é a duração do sinal,  $B$  é largura da banda das frequências do pulso emitido como entrada no sistema e  $V$  é a velocidade da onda acústica.

Conforme 2.22, a  $r_{axial}$  além de estar relacionada à metade da largura do pulso ultrassônico, quanto maior o valor da relação  $DB$ , melhor (numericamente menor) será essa resolução. Entretanto, vale ressaltar que o efeito da atenuação de alguns materiais, principalmente daqueles com maior caráter heterogêneo e anisotrópico, limitam o aumento de resolução com o incremento da frequência emitida, visto que as perdas de energia também são diretamente proporcionais ao aumento da frequência (KEAREY *et al.*, 2009). Ante o exposto, pode-se inferir que a capacidade dos pulsos codificados de elevar  $DB$  é o seu principal fator diferencial e motivacional para o desenvolvimento de pesquisas nas diversas áreas do conhecimento, sempre em busca de potencializar a resolução dos sinais captados.

A última fase do processamento dos pulsos codificados consiste em comprimir o sinal de banda larga através da técnica de deconvolução no domínio da frequência, multiplicando a resposta pela fonte de excitação, após sua conversão também para este domínio. Este procedimento foi também seguido por HAIDER e THOMENIUS (1998). Conforme já explicitado e esboçado na figura 2.9, o sinal captado no domínio temporal será convertido, por meio da FFT, para o domínio da frequência por meio da multiplicação pelo inverso do sinal de entrada, após também convertido ao domínio da frequência. Esta técnica permite que todas frequências que foram

emitidas, mesmo após se propagarem por um meio, sejam reconduzidas a um único instante, proporcionando um sinal mais curto que é chamado de sinal comprimido e conhecido como a Resposta Impulsiva (RI).

No caso da varredura de senos, a técnica vem sendo empregada há muito tempo para suprir as deficiências dos tons puros. Conforme já mencionado, esse tipo de excitação permite entregar a um sistema uma vasta faixa de frequências com um espectro de frequências constante, o que é favorável no critério de minimização do fator de crista, sendo muito próximo do tom puro, diferenciando-o em relação aos outros tipos de sinais de excitação apresentados (impulso e ruído). Outra vantagem nesse tipo excitação é a sua capacidade de identificar anomalias de diferentes dimensões em um meio, pois a larga faixa de frequências (e comprimentos de onda) possibilita que ele tenha resolução expandida para uma faixa maior do que um simples tom puro.

É importante relatar que, usualmente, os transdutores ultrassônicos são confeccionados para gerar eficientemente suas ondas em uma determinada faixa de frequências ao redor de sua frequência central. Ou seja, o comportamento ressonante de um tom puro será nas proximidades do seu valor de dimensionamento, que pode ser mais ou menos centrado em torno desse valor.

## 2.6 O modelo convolucional ultrassônico

Os transdutores ultrassônicos empregados para ensaios não destrutivos tem em geral a sua face em forma de pistão e juntamente com um elemento acoplante e um sistema de transmissão e recepção viabilizam a transferência dos pulsos emitidos, que ao passarem pelos meios de interesse, retornam com informações que podem ser recuperadas a partir do processamento e interpretação dos sinais. Em COSTA-FÉLIX (2005), descreve-se a equação ultrassônica geral para um pistão como sendo:

$$p(r) = 2\rho_0 V_0 U_0 \left| \operatorname{sen}\left(\frac{kr}{2}\right) \sqrt[2]{1 + \left(\frac{a}{r}\right)^2} - 1 \right| \quad (2.23)$$

em que  $\rho_0$  representa a densidade,  $V_0$  a velocidade de propagação acústica para o meio,  $U_0$  a amplitude da componente normal da velocidade da frente de onda,  $k$  uma constante de propagação,  $a$  o raio efetivo do transdutor e  $r$  a distância da face do transdutor até a projeção de um ponto no eixo representado por  $x$  na figura 2.8.

No tratamento de sinais, dois recursos clássicos de manipulação da forma de onda são a filtragem em frequência e a filtragem inversa (deconvolução). O primeiro pode melhorar a  $S/R$  mas, potencialmente, prejudica a resolução axial, enquanto a deconvolução melhora a resolução, mas às custas de um decréscimo na  $S/R$ . Como em muitos aspectos do processamento de sinais, devem ser avaliados os resultados

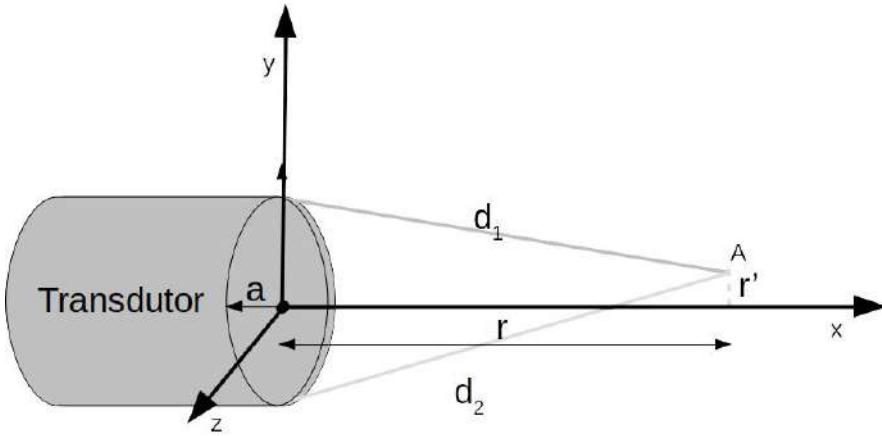


Figura 2.8: Representação de um ponto **A** no campo de pressões acústicas de um transdutor plano de raio  $a$ .

obtidos individualmente para se chegar ao método de tratamento mais adequado para cada situação.

A deconvolução é o procedimento analítico que permite remover o efeito de operações prévias dos processos de filtragem que ocorre das interações entre sinais (convolução). As frequências dominantes captadas em sistemas receptores são parcelas proporcionais ao deslocamento da frente de onda original, devido ao processo de absorção das frequências mais altas, deixando os pulsos mais alongados. O princípio geral do processo de deconvolução têm por objetivo comprimir o comprimento do pulso recebido visando melhorar a resolução axial (YILMAZ e DOHERTY, 1987).

Quando a frente de onda se propaga no meio, ocorre seu alongamento, perdendo os componentes de maior frequência em consequência dos efeitos de absorção do sinal. De modo genérico, os traços recebidos podem ser entendidos como a convolução da função refletividade com um pulso variável no tempo (em inglês *time-varying pulse*). No entanto, é de se esperar que o traço final seja mais complexo, pois ainda haverá de se considerar a leitura de diversos outros tipos de sinais, incluindo reflexões múltiplas, ruídos coerentes e não coerentes (KEAREY *et al.*, 2009).

O teorema da convolução explicita que, submetidas às condições apropriadas, a Transformada de Fourier (TF) da convolução entre duas ou mais funções integráveis é o produto, ponto a ponto, das Transformadas de Fourier de cada função, ou seja, a convolução no domínio do tempo corresponde à multiplicação, ponto a ponto, no domínio da frequência.

O modelo convolucional normalmente empregado para representar as interações impulsivas entre fonte emitida, propagação em um meio até a leitura por um transdutor, hidrofone ou geofone pode ser bem representado por um Sistema Linear Invariante no Tempo (SLIT) do tipo Simples Entrada, Simples Saída (SESS), e em inglês *Simple Input, Simple Output* (SISO), ou seja, o sistema possui uma única

entrada e uma única saída.

Na maioria das técnicas de aquisição sísmica empregadas na exploração do petróleo, o conhecimento da forma de onda que excita e funciona como entrada no sistema, normalmente, não é de conhecimento prévio, gerando dificuldades adicionais nas fases de processamento. Nos estudos dos pulsos ultrassônicos, não existe este problema, e com a ajuda de aplicativos específicos, a técnica permite que sejam selecionadas não somente a ou as frequências de interesse, como também um faixa delimitada por uma banda de frequência que possa responder de maneira mais eficiente na interação com o sistema.

A figura 2.9 objetiva ilustrar um pulso de excitação, no caso, com comportamento de varredura de senos, empregado como entrada em um sistema, mostrando que o processo de interação convolucional no domínio do tempo, pode também ser apresentado no domínio da frequência. Essa conversão é possível por meio da aplicação da Transformada Rápida de Fourier<sup>5</sup> (TRF), em inglês, *Fast Fourier Transform* (FFT), para converter do domínio do tempo para a frequência. Já no sentido inverso, a Transformada Rápida de Fourier Inversa (TRFI) e em inglês, *Inverse Fast Fourier Transform* (IFFT), para a conversão inversa.

Outra característica fundamental para o entendimento da manipulação de sinais, é que a representação da resposta do meio de interesse, comumente chamada de função refletividade, corresponde à resposta pura, já livre de ruídos aleatórios ou não e dos efeitos filtrantes e localizados dos sensores e demais equipamentos de medição. Enfim, isolar e extrair esta informação é um dos principais objetivos da maioria dos sistemas de investigação por emissão, medição, processamento e interpretação da resposta de sinais.

## 2.7 Histórico dos *chirps* em aplicações médicas

A utilização de pulsos codificados é uma estratégia clássica de processamento de sinais originalmente explorada a partir da segunda guerra mundial, em aplicações de radar aéreo para usos militares, sendo aplicados exclusivamente com esta finalidade até a década de 70 (ELIAS, 1980), (COOK e BERNFELD, 1967) e (SKOLNIK, 1981). A partir de então, começou a ser explorada também em outras áreas, principalmente na pesquisas com aplicações terapêuticas e de ensaios não-destrutivos (TAKEUCHI, 1979), (RAO, 1994), (CHIAO, 2005), (MISARIDIS *et al.*, 2000a) e (O'DONNELL, 1992).

Mas a principal consequência e grande preocupação da geração de pulsos codificados reside na distribuição de energia também em lóbulos temporais laterais na

---

<sup>5</sup>A Transformada de Fourier consiste em uma técnica desenvolvida para realizar a conversão entre os domínios temporal e da frequência e vice-versa.

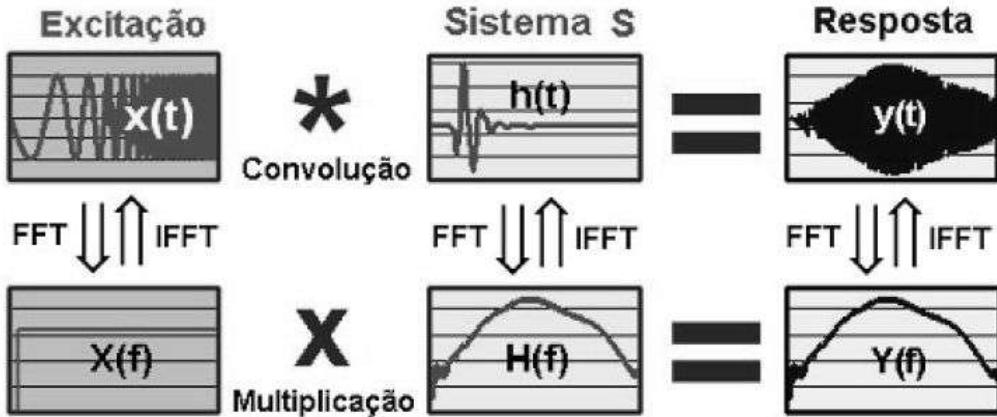


Figura 2.9: Representação do processo convolucional a partir de um pulso de excitação convolvendo com a função refletividade para gerar a resposta de um sistema no domínio temporal e os equivalentes espectros de frequências possibilitados pela aplicação da FFT (adaptado de COSTA-FÉLIX (2005)).

vizinhança do lóbulo principal, visto que a depender da intensidade produzida nesses lóbulos, poderão produzir danos ao imageamento. A razão entre a máxima amplitude da envoltória do sinal comprimido (lóbulo principal), e a máxima amplitude dos lóbulos temporais dessa mesma envoltória define a faixa dinâmica da compressão do sinal (DANTAS, 2011), sendo que em termos práticos, no caso de imagens de ultrassom (US) para aplicações médicas, devem ser geradas a partir de sinais de eco que comportem faixas dinâmicas de 40 a 60 dB (MISARIDIS *et al.*, 2000b).

TAKEUCHI (1979), foi o primeiro pesquisador a registrar uma publicação explorando a técnica dos pulsos codificados, ainda com recursos analógicos, empregando investigações de ultrassom na área médica. Takeuchi apontou limitações relacionadas aos possíveis efeitos danosos dos baixos valores de faixas dinâmicas, que segundo MISARIDIS (2001), podem ter justificado poucas pesquisas explorando a referida técnica na década seguinte. No entanto, no início dos anos 90, já com recursos digitais disponíveis, O'DONNELL (1992) demonstrou ganhos relevantes no aumento da  $S/R$ , mostrando resultados em que os pulsos codificados forneceram melhorias de 15 a 20 dB. A partir dos anos seguintes, os estudos em aplicações médicas usando pulsos codificados ganharam um novo impulso.

O significativo trabalho acadêmico apresentado na tese de doutorado de MISARIDIS (2001) consiste em um amplo material técnico acerca dos pulsos codificados, tendo gerado trabalhos expressivos comprovados pelo grande número de citações em diversas outras publicações. Embora o foco da sua pesquisa tenha explorado a fundo as aplicações ultrassônicas na área médica, seus trabalhos também têm sido requisitados para embasar pesquisas em outras áreas do conhecimento como em ensaios não destrutivos.

RAO (1994) alertou acerca dos cuidados ao se aumentar os picos de pulsos co-

dificados visando melhorar o valor de  $DB$ , uma vez que o tecido vivo pode sofrer processos de cavitação e queimaduras internas. Esse cuidado pode acabar limitando, em algumas situações, principalmente em aplicações médicas, a capacidade máxima de resolução em algumas investigações e minimizar a profundidade de penetração dos pulsos. Ainda nesse trabalho, Rao avaliou estas limitações em modelagens de sistemas lineares e os resultados mostraram que apesar das limitações impostas pelo espalhamento e absorção do tecido vivo, pode-se conseguir trabalhar com pulsos codificados com valores de  $DB$  entre 10 e 40.

No trabalho de HAIDER e THOMENIUS (1998), os artefatos provenientes dos lóbulos laterais associados ao método de compressão dos pulsos puderam ser reduzidos empregando uma técnica desenvolvida por eles, denominada de deconvolução de pulso alongado (PED, em inglês, *Pulse Elongated Deconvolution*). Embora a simples técnica de compressão do pulso e o PED produzam melhorias na  $S/R$  semelhantes, este último conseguiu minimizar os efeitos provenientes dos lóbulos laterais. A referida técnica utilizou a deconvolução por meio de um filtro inverso estabilizado selecionado adequadamente a partir do pulso de excitação em que um filtro inverso exato foi implementado. A forma de onda de excitação foi otimizada por meio do erro mínimo quadrático médio (MMSE, em inglês, *Minimum Mean Square Error*). Os resultados da técnica de PED foram demonstrados em simulações e imagens ultrassônicas.

A sequência de artigos publicados MISARIDIS *et al.* (2000a), MISARIDIS *et al.* (2000a) e MISARIDIS *et al.* (2000b), formam uma série de três relevantes publicações acerca do tema, procuram demonstrar que dentre os vários tipos de pulsos codificados, os sinais com modulação linear em frequência (MLF) possuem melhor custo-benefício em termos de dificuldade de geração e resposta como sinal de ultrassom.

COSTA-FELIX e MACHADO (2015) estudaram um método para produção de pulsos codificados modulados em frequência contendo envelope plano no domínio temporal, elaborado com base no inverso da função de transferência do sistema. A técnica foi discutida também por MULLER e MASSARANI (2001) em acústica de salas e tem como premissa básica produzir um incremento da largura de banda útil de um sistema completo que englobe transdutores, sinal gerador, redes de correspondência de impedância, amplificador de recepção etc. Ou seja, a referida técnica consiste em, após o registro de um pulso de referência que interrogou o sistema uma vez, este é manipulado para maximizar a potência de atuação do sinal original e fornecer melhoria na resolução quando utilizados novamente na excitação do meio.

Avaliando as técnicas de codificação dos pulsos ultrassônicos aplicados em medicina, a maioria dos autores usou *chirps* modulados com frequência linear (MLF) como em MISARIDIS *et al.* (1999), O'DONNELL (1992), RAO (1994), tendo pou-

cos se aventurando nas aplicações dos filtros modulados não lineares, pois conforme MISARIDIS (2001) não há vantagem considerável que justifique o esforço adicional para a sua utilização. Conforme estudos de MISARIDIS (2001) o sinal com frequência linear é uma boa ferramenta, e, desde que as frequências e duração do pulso sejam selecionadas de maneira adequada, deverão propiciar um alcance com resolução satisfatória e minimização de lóbulos laterais.

## 2.8 Histórico dos *chirps* para ensaios não-destrutivos

Em 1975, FURGASON e COOPER (1975) aplicaram pulsos codificados em sinais de ultrassom para ensaios não-destrutivos, mais especificamente para detecção de falhas em materiais.

POLLAKOWSKI e ERMERT (1994) manusearam a técnica de pulsos modulados em frequência em END, empregando dois métodos que visaram melhorar a eficiência dos pulsos ultrassônicos. Em um primeiro momento, foram gerados sinais de excitação com nível de amplitude constante e modulação de frequência não linear, apresentando uma fórmula para o cálculo desse sinal. Com este esquema de modulação, eles conseguiram uma redução no nível dos lóbulos laterais dos pulsos comprimidos. Em outra aplicação, eles usaram *chirps* de onda quadrada, derivada de *chirps* de senos para obtenção de ganho adicional da amplitude dos sinais captados.

YAMANI *et al.* (1997) exploraram a operação de deconvolução, objetivando a desfazer o efeito convolucional da propagação em materiais, para extrair a resposta impulsiva e fazer a identificação de defeitos. Nesta contribuição, formularam os defeitos no domínio dos Espectros de Ordem Superior (EOS), em inglês, *Higher-Order-Spectra* (HOS), em que o processamento é mais adequado para separar o efeito do sistema de medição do ruído gaussiano presente.

KIM *et al.* (2004) investigaram a presença de falhas a partir de sinais de ultrassom. Frente às dificuldades de investigação de juntas de solda em ângulo, neste artigo eles apresentaram uma nova abordagem por meio de uma função de similaridade definida como a deconvolução de um sinal captado por um sinal de referência. As funções de similaridade para o mesmo tipo de falhas/referências são padrões simétricos de impulso de banda limitada com amplitudes maiores, enquanto que aqueles para diferentes tipos de falhas/referências fornecem padrões assimétricos com amplitudes relativamente menores.

BOSSMANN *et al.* (2012) apresentaram dois métodos de deconvolução esparsa aplicados a ensaios não destrutivos. O primeiro método consiste em um algoritmo especial de busca de correspondência (em inglês, *Matching Pursuit* - MP), objetivando

deconvoluir e separar o sinal de interesse para assim remover o ruído indesejado. O outro modelo de deconvolução foi baseado no método Prony aproximado (APN, em inglês, *Approximate Prony Method*). Os métodos admitem que o sinal ultrassônico é esparsos. O algoritmo MP é empregado para gerar uma representação esparsa dos dados medidos por um esquema de deconvolução e subtração. Já na técnica APN, que também parte do pressuposto de que os sinais desejados são combinações lineares esparsas do pulso transmitido, por deconvolução cega, em que a excitação do transdutor é desconhecida, propõe-se um modelo de eco gaussiano geral, cujos parâmetros podem ser ajustados iterativamente às medições reais. Os autores apresentaram resultados satisfatórios com os dois métodos, com bons desempenhos mesmo para altos níveis de ruído.

LI e HAYWARD (2017) exploraram os recursos dos filtros casados (em inglês, *matched filters*) em aplicações de ensaios não-destrutivos de pulsos ultrassônicos para investigar amostras de um aço doce e da liga INCONEL 617. Seus resultados mostraram que a  $S/R$  foram melhoradas em cerca de 10-20 dB, em que também constatou que a técnica pode ser implementada em tempo real com baixo custo computacional adicional.

## 2.9 *Chirps* em aplicações de materiais cimentícios

A tese de doutorado de LONG (2000) foi uma das primeiras pesquisas a empregar as varreduras de senos para interrogar amostras de concreto. Utilizou simulações empregando o método dos elementos finitos para modelar sinais dispersivos em modelos que simulavam o concreto. Em sua pesquisa, foram utilizados *chirps* com dois tipos de funções janelas: a retangular e a Hanning além de aplicar as transformadas Wavelet e Hilbert para extrair a velocidade de grupo a partir de sinais de emissão de *chirps* lineares. Para maiores explanações acerca da aplicação da função janela, pode-se verificar breves definições no apêndice deste trabalho ou para maiores esclarecimentos recomenda-se o trabalho de HARRIS (1978) que faz uma revisão concisa das principais janelas e seus efeitos de filtragem, destacando as suas principais peculiaridades.

Um outro trabalho, também de relevância para esta pesquisa e que usou pulsos codificados em concreto foi a tese de doutorado de BERRIMAN (2004). Em seu trabalho, aplicou *chirps* emitidos a partir de transdutores capacitivos ultrassônicos de banda larga, objetivando melhorias na  $S/R$ . Em suas avaliações testou esses pulsos pela primeira vez em *Air-Coupled ultrasonic Systems* (sistemas ultrassônicos acoplados a ar). Em sua abordagem, a compressão do pulso envolve a correlação cruzada de um sinal de *chirp* e realiza comparações entre sistemas tradicionais com contato (acoplados com fluidos) e sistemas com acoplamento a ar.

No trabalho de CHANG e LEE (2004) a técnica de compressão dos pulsos ultrassônicos foi aplicada em uma peça de concreto empregando dois transdutores com frequência central de 100 kHz e banda de varredura dos *chirps* entre 50 e 150 kHz. Os resultados foram avaliados em seções bidimensionais onde as imagens empregando pulsos codificados tiveram resolução superior ao método convencional.

Também em MOHAMED *et al.* (2014) os autores mostraram que uma combinação de baixa frequência dos pulsos ultrassônicos codificados tais como *chirps* com apropriados métodos de processamento de sinais como compressão do pulso podem produzir uma ferramenta poderosa para avaliações em END.

Em mais recente trabalho publicado por LAURETI *et al.* (2017), os autores aplicaram a técnica de compressão do pulso em testes não destrutivos em amostras de concreto. Uniram as potencialidades de transdutores de piezocompósitos, compressão do pulso e pós-processamento para gerar imagens com boa resolução de barras de aço de 20 mm sob um cobrimento de 55 mm. A banda de frequências aplicada foi na faixa de 150-450 kHz para um *chirp* com função janela *Tukey* e duração de 14 ms.

DANTAS (2011) em sua pesquisa bibliográfica para desenvolvimento da sua tese de doutorado e no artigo DANTAS e MACHADO (2018), concluiu que os melhores candidatos aos sinais de excitação de transdutores ultrassônicos são aqueles modulados, uma vez que reúnem simultaneamente as qualidades de alta banda de frequências e longa duração de pulso.

No que se refere especificamente às aplicações dos *chirps* em concreto, observa-se que ainda são poucos os estudos da utilização de pulsos codificados, seja para detecção do afastamento de barras, estimativa do diâmetro, do conteúdo de água, previsão dos níveis de corrosão no seu interior ou especificamente para determinação ou calibração da velocidade ultrassônica longitudinal nesse material.

Por fim, a revisão bibliográfica efetuada relativa à utilização dos pulsos codificados tanto em aplicações médicas como para ensaios não destrutivos, permite constatar que a grande maioria das pesquisas obtiveram resultados satisfatórios no aumento da profundidade de penetração do sinal e na melhoria da relação sinal ruído (ver figura 2.10, caminho A). Essa última característica proporcionada pelos *chirps* tende a impactar tanto na melhoria das medições dos tempos de percurso (2.10, caminho A1), como também da resolução espacial (2.10, caminho A2). Portanto, principalmente com base nestas capacidades destes sinais, esta pesquisa reúne esforços para avaliar a superior capacidade dos referidos sinais em relação aos tradicionais tons puros, em termos de precisão e exatidão.

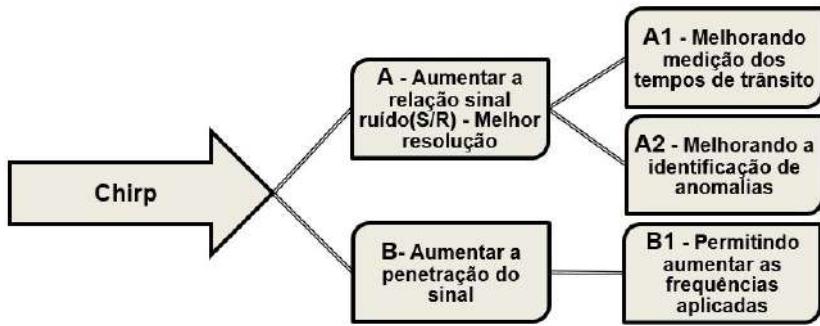


Figura 2.10: Principais vantagens da utilização de pulsos codificados.

## 2.10 Normas relativas à determinação da velocidade ultrassônica em concreto

A partir da década de 50 ocorreu um crescimento dos ensaios ultrassônicos em aplicações não destrutivas que motivaram as associações relacionadas a END, empresas de construção civil e organismos internacionais de padronização a iniciar o desenvolvimento e publicação de várias normas relativas ao tema KRAUTKRAMER e KRAUTKRAMER (1977). Em relação à publicação de normas relacionadas ao concreto, os primeiros registros ocorreram somente no início da década de 70.

O trabalho de KOMLOS *et al.* (1996) faz um resumo acerca das principais normas relativas à aplicação de pulsos ultrassônicos em concreto, inclusive com um quadro cronológico destas publicações em alguns países, as quais foram iniciadas pelo *International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures*, e em francês à *Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, systèmes de construction et ouvrages* (RILEM), NDT 1 e a norma Romena C-26-72, ambas de 1972. Uma das suas principais conclusões deste trabalho e de interesse para os desdobramentos desta pesquisa, foi a constatação de que as normas avaliadas por eles possuem como maior fragilidade o fato de não alertarem os seus usuários acerca das incertezas das medições de velocidade ultrassônica.

### 2.10.1 Normas técnicas de aplicação de ultrassom em concreto

A seguir será feita uma breve descrição acerca das principais normas relacionadas aos ensaios não destrutivos em concreto e como elas mencionam a determinação da velocidade ultrassônica longitudinal (VLP) e em inglês, *Ultrasonic Pulse Velocity* (UPV) em concreto bem como elas se relacionam com os parâmetros elásticos do meio.

A ASTM-C-597-16 (2016) é uma norma gerida pela *American Society for Testing and Materials* (ASTM), que é um órgão estadunidense que desenvolve e publica normas com foco em diversos tipos de materiais. Na referida norma são explicitadas fórmulas relacionando a velocidade ultrassônica aos parâmetros elásticos do meio. Informa os procedimentos para realização dos ensaios e de como a velocidade é determinada. Esse documento também alerta que os valores encontrados a partir da sua utilização não devem ser usados como informação basilar para a resistência do concreto. No entanto, embora não apresente uma descrição de como extrair informações indiretas da resistência no concreto, recomenda em uma de suas notas, o emprego do relatório ACI-228.1R (2019) para inferir a correlação entre dados ultrassônicos e resistência à compressão do concreto.

A BS-1881-PART203 (1991), substituída pela BS-EN-12504-4 (2004) e atualizada recentemente para a BS-EN-12504-21 (2021) é uma norma difundida pelo British Standard (BS) e segundo KOMLOS *et al.* (1996) é uma das mais completas e didáticas, apresentando suas fórmulas detalhadas como em um livro. Esta também explica que mudanças nas propriedades do concreto, ocorridas com o tempo, podem ser determinadas por meio do monitoramento da velocidade do pulso em diferentes idades, desde que avaliados com os mesmos transdutores e posição. Para avaliar a uniformidade do concreto, assim como a RILEM, recomenda o uso de uma malha de pontos de medição para recobrir uma área representativa.

Da mesma forma, a Organização Internacional para Padronização, em inglês *International Organization for Standardization* (ISO), colabora com a norma atualizada recentemente para a ISO-1920 (2020). O seu capítulo 4 trata especificamente dos procedimentos para determinação da velocidade ultrassônica em peças de concreto.

A norma alemã DIN/ISO 8047 não contempla quaisquer procedimentos para relacionar a resistência do concreto a partir da medição da velocidade longitudinal do pulso de US, mas assim como a norma britânica, recomenda uma outra publicação, no caso, a *DafStb Recomendations* a qual propõe que uma curva de calibração deva ser construída a partir de resultados experimentais de velocidade ultrassônica longitudinal. Recomenda que sejam de três a cinco medições de tempo de percurso individuais em cada ponto. Os núcleos das amostras devem ser retirados e ensaiados para obtenção da resistência à compressão. A norma recomenda o emprego de uma função linear para relacionar a resistência com a velocidade ultrassônica longitudinal.

No Brasil, a norma que trata da determinação da velocidade ultrassônica no concreto é a ABNT-NBR-8802 (2013) que teve sua segunda edição validada em 2013 e terceira revisão em dezembro de 2019. Em seu escopo, estabelece que a determinação da velocidade ultrassônica longitudinal tem como principais aplicações:

- verificação da homogeneidade do concreto.
- detecção de falhas de concretagem, profundidade de fissuras e demais imperfeições; e
- monitoramento do concreto no tempo, decorrentes de agressividade do meio, principalmente relacionados a ação de sulfatos.

A norma brasileira não apresenta nenhum padrão de hierarquização da homogeneidade do concreto a partir da correlação das velocidades encontradas e qualidade das peças ensaiadas. Alerta que a avaliação da homogeneidade deva ser apresentada juntamente com parâmetros estatísticos como desvio-padrão ou coeficiente de variação das medições. A norma também destaca que para efeito de comparação, só devam ser confrontadas informações de velocidade de concretos similares e atentando para fatores que possam influenciar a determinação da velocidade.

A referida norma também não apresenta procedimentos para detecção de falhas e monitoramento do concreto ao longo do tempo. A norma apresenta os principais conceitos relativos aos elementos integrantes das inspeções ultrassônicas (acoplante, transdutores etc) empregados, resolução mínima desejável dos equipamentos e principais tipos de arranjos nas aquisições dos dados.

Em outro trabalho relevante POPOVICS *et al.* (1997), referente às discussões das normas que tratam dos métodos de determinação da velocidade ultrassônica longitudinal no concreto, os pesquisadores alertaram acerca da necessidade de inserção de padrões de incertezas na sua declaração e destacaram que melhorias adicionais na determinação da velocidade ultrassônica podem ser originadas do uso de técnicas avançadas de processamento de sinal.

No que diz respeito às recomendações referentes ao pulso de excitação a ser utilizado nos ensaios ultrassônicos em concreto, as normas somente sugerem a utilização de salvas de senos.

# Capítulo 3

## Materiais e métodos

### 3.1 Fatores influenciadores da propagação ultrassônica em concreto

Embora esta tese não trate da análise individualizada dos diversos fatores que influenciam a propagação dos pulsos ultrassônico no concreto, a partir das conclusões apontadas em MALHOTRA e CARINO (2003) e das recomendações de normas internacionais específicas no tema como a ASTM-C-597-16 (2016), BS-EN-12504-4 (2004) e a brasileira ABNT-NBR-8802 (2013), procurou-se reunir e classificar os principais responsáveis por interferências na frente de onda acústica nestes materiais.

### 3.2 Apresentação do método combinado ou *1T2R*

Conforme já relatado ao longo do texto, os principais métodos ultrassônicos são o pulso-eco e a transmissão direta. No entanto, esta pesquisa descreve e utiliza um método combinado entre ambos denominado de *1T2R* (DOURADO *et al.*, 2022).

Para este arranjo de aquisição são requeridos no mínimo dois transdutores posicionados em lados opostos de um meio de investigação em que pelo menos um (o emissor) é de duplo cristal. Neste arranjo, enquanto somente um deles transmite o sinal de excitação, ambos realizam, simultaneamente, medições das respostas dos sinais acústicos propagados.

Enquanto no método de pulso-eco um transdutor de duplo cristal ou dois transdutores posicionados lado a lado em uma face da peça executam o papel de transmitir e ler o sinal propagado no meio, na transmissão direta são empregados sempre dois transdutores, que são posicionados em faces opostas, em que um funciona como transmissor e o outro como receptor.

Por sua vez, o método *1T2R* combina esses dois métodos, ou seja, podem ser empregados dois sensores independentes, posicionados lado a lado, um funcionando

como transmissor e o outro como receptor, ou somente um transdutor de duplo cristal realizando ambos processos, enquanto um outro transdutor é posicionado do lado oposto para a captação dos sinais transmitidos.

A figura 3.1 apresenta um bloco padrão V1, submetido ao método *1T2R* com dois transdutores ultrassônicos. O referido bloco é confeccionado de acordo com a norma BS-EN-ISO-2400 (2012) *Non-destructive testing Ultrasonic testing Specification for calibration block*.

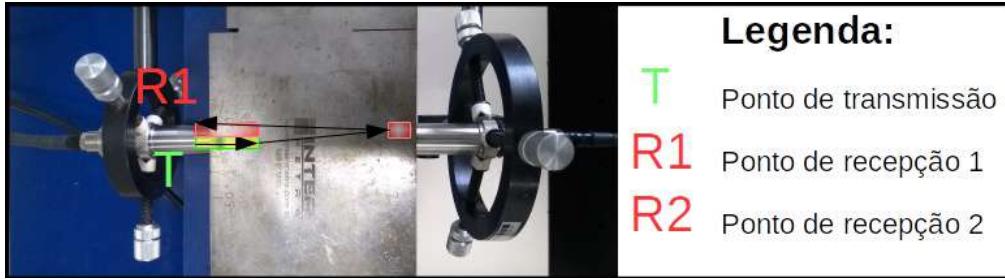


Figura 3.1: Representação do arranjo de aquisição seguindo o método *1T2R*.

### 3.3 Gráficos e equações de decaimento da amplitude, CRC e atenuação acústica

Com base na fundamentação teórica apresentada no capítulo anterior acerca dos métodos empregados, os principais fatores de decaimento de amplitude dos sinais ultrassônicos e o novo arranjo de medição, esta tese faz uma analogia entre o decaimento de energia disponível em sistemas hidráulicos e sistemas acústicos. Ou seja, da mesma forma que nas tradicionais curvas de energia (PITCHARD, 2015), em que a energia do sistema é descontada das parcelas de perda de carga para expressar graficamente o comportamento da energia disponível, gráficos de decaimento de energia são esboçados para representar a energia acústica ao longo da propagação. Similarmente, é possível identificar também dois grupos de perdas: as perdas que ocorrem ao longo da propagação (atuando em todo o deslocamento) e as perdas pontuais (atuando nos obstáculos ou mudanças de materiais).

Admitindo que múltiplas reflexões possam ser medidas pelos transdutores quando estes se encontram com sua face acoplada por contato, equações são formuladas expressando em valores a amplitude do sinal ao longo da propagação com base nas principais parcelas de perda de energia, as quais são representadas por variáveis que serão definidas no capítulo seguinte.

Com a combinação das equações e informações medidas para os métodos de pulso-eco e *1T2R*, apresenta-se o protocolo a ser seguido para cálculo de um parâ-

metro, aqui denominado de coeficiente de reflexão combinado (CRC). Este consiste em um fator adimensional que combina a interação entre a camada de proteção do transdutor, a película do acoplante e o meio investigado (DOURADO *et al.*, 2022).

A partir da abordagem do CRC este trabalho apresenta o desdobramento matemático das equações que permitem estimar a atenuação acústica, também para cada um dos métodos estudados, bem como equações simplificadas que fornecem estimativas da atenuação para materiais de baixa perda.

## 3.4 Métricas de comparação dos tempos de percurso e diagrama das medições ultrassônicas

### 3.4.1 Apresentação das métricas utilizadas

Esta pesquisa se utilizou de dois conceitos matemáticos para realizar as comparações quantitativas entre os tempos de percurso obtidos a partir de cada um dos sinais de excitação empregados.

Para comparar resultados entre sinais de excitação diferentes, dois conceitos estatísticos foram empregados:

- **Erro relativo:** Este conceito estatístico consiste na relação entre a diferença entre o valor de referência ou teórico e um valor medido, dividido pelo primeiro, ou seja, seguindo a expressão:

$$Er(\%) = \left| \frac{X_{theo} - X_{meas}}{X_{theo}} \right| \times 100 \quad (3.1)$$

em que  $X_{theo}$  são os tempos de percurso teóricos definidos nos cenários simulados e  $X_{meas}$  os equivalentes tempos de percurso após as simulações computacionais usando o software k-Wave para cada cenário.

Este conceito foi adotado no último grupo de modelagens unidimensionais. A partir da definição dos parâmetros de modelagem, foi possível variar os sinais de excitação para efetuar a comparação dos resultados a partir da análise dos erros relativos.

- **Desvio padrão:** Este conceito matemático foi usado para comparar as medições experimentais para os diferentes tipos de sinais de excitação. Na fase dos experimentos ultrassônicos foi empregado um aparato experimental que garantiu que a mudança do sinal de excitação fosse o único responsável por afetar a propagação das ondas ultrassônicas nas amostras de concreto. Assim,

foi possível usar um desvio padrão experimental para a comparação quantitativa dos sinais testados. A estimativa da variância da média foi calculada a partir de:

$$S = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (3.2)$$

em que  $s$  é o desvio padrão experimental e  $n$  é a quantidade de medições efetuadas.

### 3.4.2 Diagrama das medições ultrassônicas

Na figura 3.2 apresenta-se corresponde a um infográfico com indicações dos principais desenvolvimentos relacionados às medições realizadas e que serão apresentados nos materiais e métodos e resultados deste trabalho.

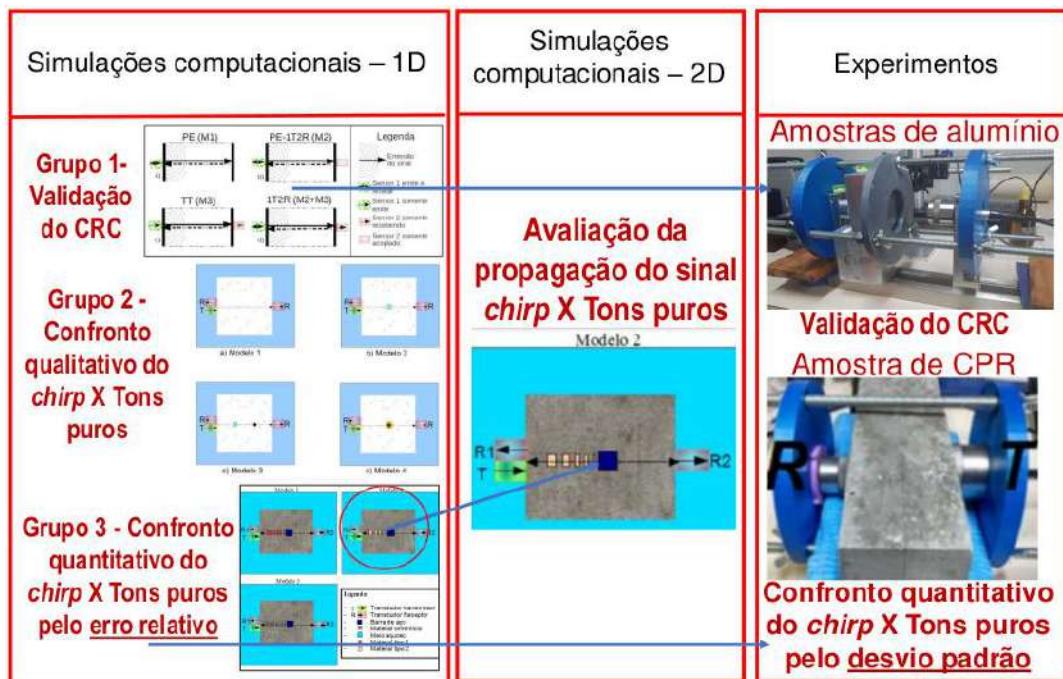


Figura 3.2: Infográfico representativo das medições ultrassônicas desenvolvidas.

## 3.5 Simulações computacionais

### 3.5.1 Introdução

As simulações numéricas exploradas neste trabalho empregaram o software de código aberto k-Wave (TREEBY e COX, 2010) e (TREEBY *et al.*, 2014), com acesso disponível em [www.k-wave.org](http://www.k-wave.org).

O referido programa foi desenvolvido originalmente para a propagação de ondas e sistemas fotoacústicos em 1D, 2D e 3D, possibilitando a modelagem de campos ultrassônicos, recorrendo à equação completa da onda, desde meios homogêneos e sem perdas, até meios heterogêneos seguindo uma lei de potência para representação dos efeitos de absorção e dispersão. O software também permite a simulação de campos não lineares por meio da inserção de parcelas adicionais às equações acopladas típicas de cenários mais complexos.

Vale ressaltar que os resultados gráficos das modelagens utilizaram rotinas do k-Wave e do MATLAB<sup>TM</sup>, enquanto que as imagens dos cenários modelados e demais figuras ilustrativas da tese foram produzidas a partir do software LibreOffice.

A modelagem computacional de sistemas acústicos para reproduzir a propagação das ondas é um recurso robusto que teve seu início no século passado com o advento dos computadores. A cada ano, com a expansão da capacidade de armazenamento e processamento de dados digitais, tal recurso tem se tornado mais atrativo, pois permite mimetizar cenários e expandir a compreensão de sistemas já existentes ou projetáveis que possam vir a ser requisitados por demandas científico-industriais.

Em problemas numéricos em acústica, em que equações diferenciais são empregadas na resolução dos problemas, os métodos das diferenças-finitas (MDF), elementos-finitos e dos elementos de contorno (MEC) são predominantes para a maioria das aplicações.

De um modo geral, quando esses e outros métodos matemáticos são adotados nas modelagens de sistemas, seus algoritmos dispõem de eficiência diferenciada, tanto relacionado ao volume de dados gerados como ao tempo computacional (KYRIAKOU, 2015). Como alternativa a tais dificuldades, o método pseudo-espectral (MPS), que corresponde a uma extensão do MDF, pode ajudar a reduzir o primeiro dos problemas e o método do espaço-k pode ajudar a reduzir o segundo (TREEBY e COX, 2010).

No apêndice dessa tese apresentam-se mais detalhes de como o k-Wave atua para produzir eficiência nas suas simulações, bem como relacionadas ao seu desenvolvimento matemático e informações acerca do método pseudoespectral do espaço-k. Descrições adicionais podem ser também consultadas no manual do referido programa (TREEBY *et al.*, 2016).

### 3.5.2 Considerações para as modelagens

Os modelos sintéticos simplificados inseridos no k-Wave consistiram em 3 grupos 1D e 1 grupo 2D. Foram definidos além dos parâmetros gerais requeridos para as simulações as propriedades físicas dos materiais com valores equivalentes às parcelas contidas nos cenários cimentícios montados.

O trabalho de LONG (2000) explorou pulsos ultrassônicos em simulações e amostras cimentícias de argamassa e concreto. No referido trabalho, além de discussões práticas relativas ao cálculo da velocidade ultrassônica e coeficientes de atenuação, são elencadas considerações para a modelagem de campos acústicos quando representando transdutores ultrassônicos, a saber:

- Os transdutores atuam de maneira uniforme podendo ser considerados como uma fonte de pistão simples;
- Somente serão consideradas as propagações de ondas longitudinais;
- O pulso de excitação será considerado como sendo aproximadamente contínuo (steady state);
- As amplitudes das ondas são pequenas, tal que as propagações acústicas no meio podem ser delineadas por equações de primeira ordem, permitindo que o sistema seja considerado como linear;
- O meio investigado será considerado como isotrópico, homogêneo e um meio espaço infinito;

Especificamente, para as simulações desta pesquisa, as seguintes premissas foram também consideradas:

- Um sistema sem perdas por dispersão, atenuação ou difração. Apenas considerando as perdas nas interfaces;
- Amostra imersa em meio com baixa impedância para o primeiro grupo e da água para os seguintes;
- Foi considerada uma única camada para representar a camada de proteção do transdutor e a película do fluido acoplante.

### 3.5.3 Simulações 1D - 03 Grupos

#### Grupo 1

O primeiro grupo de modelagens objetivou apresentar o método de aquisição *1T2R* bem como avaliar as equações desenvolvidas que relacionam as amplitudes de reflexões múltiplas medidas em uma amostra e os principais fatores responsáveis pelo decaimento da amplitude acústica. Ou seja, nestas simulações procurou-se demonstrar como a combinação dos métodos permitiu chegar a uma equação para determinação de um CRC que combina a camada de proteção do transdutor, o fluido acoplante e o meio investigado.

A figura 3.3 apresenta o esboço de uma vista lateral de um transdutor de recepção acoplado a uma interface que está recebendo uma frente de onda. Note que tanto o sinal de incidência ( $A_i$ ), o refletido ( $A_R$ ), o transmitido ( $A_T$ ) e o lido ( $A_{R'}$ ) são representados por vetores e indicados na referida figura.

Para sistemas ultrassônicos de contato, as condições da camada referente ao fluido acoplante (ou seja, o tipo, espessura e continuidade da película de acoplamento) tendem a interferir na partição dos sinais, uma vez que altera a impedância desta. Para este trabalho, será adotado um coeficiente de reflexão combinado entre a camada de proteção do transdutor, a película formada pelo fluido de acoplamento e o ambiente investigado.

Vale acrescentar que as discussões relacionadas à camada protetora do transdutor (em inglês *Match-Layer*), a camada de acoplamento, a rugosidade do meio investigado e como elas estão relacionadas entre si não são tratados nessa pesquisa. Para esta abordagem, decidiu-se definir uma impedância que os associa ( $I_{AT}$ ).

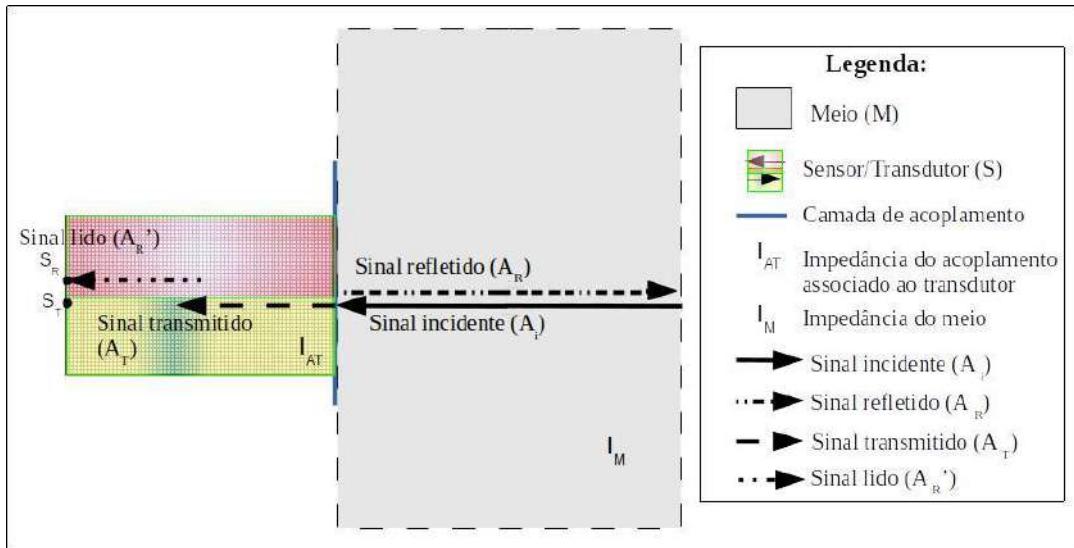


Figura 3.3: Esboço dos possíveis sinais da partição de amplitude, com incidência perpendicular em uma interface de um sistema ultrassônico de contato.

O sinal de excitação empregado foi representado por 10 ciclos de um tom puro centrado na frequência de 1 MHz. A este pulso foi aplicada uma função janela Gaussiana. Para este grupo, foram empregados três métodos, ou seja, o pulso-eco com um único elemento (figura 3.4a), o pulso-eco *1T2R* (figura 3.4b) e transmissão direta (figura 3.4c). Vale ressaltar que estas duas últimas técnicas ocorrem apenas quando outro sensor é colocado no lado oposto da peça sob investigação e que a união dos dois métodos anteriores permite a formação do arranjo *1T2R* (figura 3.4d).

A tabela 3.1 exibe os valores de velocidades, densidades, impedâncias para este grupo. A tabela 3.2 apresenta informações de geometria empregadas nestas simu-

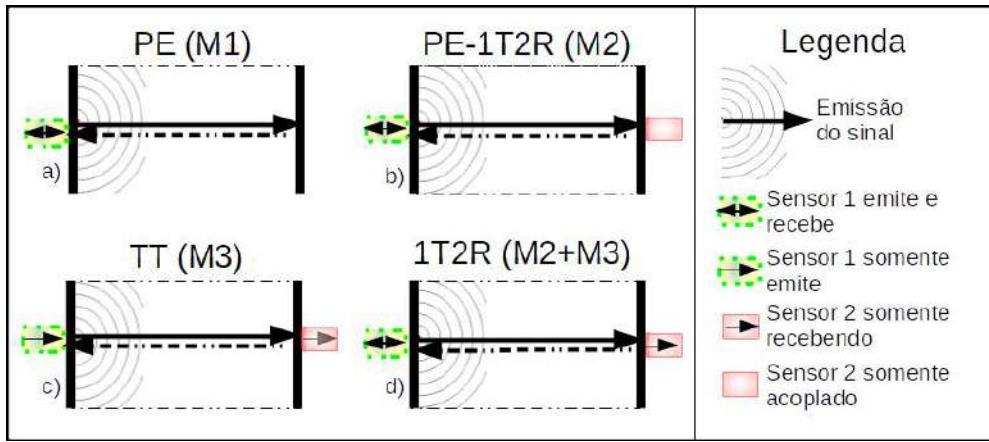


Figura 3.4: Métodos empregados na simulação do chamado grupo 1. Em: a) Pulso-eco; b) Pulso-eco 1T2R; c) Transmissão direta; e d) 1T2R.

lações, enquanto a tabela 3.3 contém os coeficientes de reflexão e refração entre os meios definidos para o cenário deste grupo de simulações. Vale ressaltar que a referida tabela lista os coeficientes de reflexão e refração entre as interfaces dos materiais usados nos dois grupos de simulações. No entanto, devido às limitações do software relacionadas a limites de contraste de impedância permitido, somente foi possível emplegar uma impedância maior que o valor real para o ar.

Tabela 3.1: Valores das propriedades usadas nas simulações do grupo 1.

	Velocidade ultrassônica [m · s <sup>-1</sup> ]	Densidade [kg · m <sup>-3</sup> ]	Impedância [MRayl]
Meio de baixa impedância	330	50	0,0165
Meio investigado	4000	2400	9,6
Acoplamento e proteção do transdutor	5920	7860	46,53

Vale ressaltar que a adoção dos valores das propriedades físicas para os materiais simulados seguiram referências clássicas da literatura para ultrassom em compósitos cimentícios.

Tabela 3.2: Variáveis usadas nas simulações para o grupo 1.

Variáveis	Descrição	Valor
kgrid.Nx	Número de pontos do gride	512 (1-D)
kgrid.dx	Espaçamento do gride [mm]	0,5
kgrid.dt	Discretização temporal [s]	60 x 10 <sup>-9</sup>
t <sub>end</sub>	Tempo de simulação [s]	2,5 x 10 <sup>-4</sup>
F <sub>central</sub>	Frequência central [Hz]	10 <sup>6</sup>
Qcycle	Quantidade de ciclos	10

Tabela 3.3: Coeficientes de reflexão e transmissão entre materiais usados nos dois grupos de dados simulados.

	(CR) [%]	(CT) [%]
Meio de baixa impedância/Acoplamento e proteção	94,8 e 99,5	5,28 e 0,5
Meio investigado/Acoplamento e proteção	45,5 e 56,1	54,5 e 43,9

A tabela 3.4 apresenta os métodos empregados enquanto a tabela 3.5 as nomenclaturas definidas para os janelamentos, em cada um dos métodos.

Tabela 3.4: Métodos empregados no grupo 1.

Método 1 (M1)	Pulso-eco (PE)
Método 2 (M2)	Pulso-eco com transdutor acoplado (PE- $1T2R$ )
Método 3 (M3)	Transmissão direta (TT)

Tabela 3.5: Janelas dos sinais medidos.

	Método	
	M1 e M2	M3
Janela W1	1° reflexões dos sinais	1° transmissões
Janela W2	2° reflexões dos sinais	1° reflexões das transmissões
Janela W3	3° reflexões dos sinais	2° reflexões das transmissões
Janela W4	4° reflexões dos sinais	3° reflexões das transmissões

#### *Métricas de medição*

A avaliação das equações desenvolvidas nesta pesquisa foi feita com base nas amplitudes dos sinais simulados. A partir do janelamento dos sinais, as leituras foram realizadas tanto no domínio temporal como no domínio da frequência:

- A primeira métrica consistiu na leitura das amplitudes pico a pico dos sinais temporais. Ou seja, para cada sinal janelado referente a um método, foi utilizada a soma dos valores absolutos dos picos máximos positivos e negativos;
- e
- A segunda métrica consistiu em medir os picos dos espectros de frequência dos sinais janelados para cada um dos métodos. A conversão entre domínios de cada sinal, para cada janela, ocorreu através da *Fast Fourier Transform* (FFT) após a aplicação do procedimento de *zero padding*<sup>1</sup>, inserindo zeros aos sinais temporais até um total de  $2^{10}$  pontos.

<sup>1</sup>Para melhorar a resolução do sinal no domínio da frequência, o procedimento de *zero padding* consiste em adicionar zeros ao sinal no domínio temporal antes da aplicação da transformação de domínios por meio da FFT.

## Grupo 2

O segundo grupo de modelagens objetivou, basicamente, avaliar o comportamento dos pulsos de excitação propostos em termos da sua capacidade qualitativa e da resolução observadas nos sinais temporais unidimensionais (A-SCAN), após seguir a propagação correspondente ao sentido do segmento de reta indicado no centro de cada modelo. Note que para estas simulações, além da aplicação dos métodos tradicionais de pulso-eco e transmissão direta, o arranjo *1T2R* também foi adotado.

Foram utilizados os conjuntos de sinais previstos para esta pesquisa. Os tons puros aplicados foram com 3 ciclos centrados nas frequências de 100 kHz, 300 kHz e 500 kHz. Além disso, foi aplicado um *chirp* linear crescente de 100 kHz a 700 kHz. A duração do *chirp* foi de 38,325  $\mu$ s.

As configurações para este grupo foram compostas por:

- modelo 1: foi definido como uma argamassa (água+cimento+areia) o qual pode ser considerada como um material homogêneo frente às baixa frequências acústicas usualmente operadas nestes materiais. Adotou-se uma densidade única de  $2200 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  e velocidade ultrassônica longitudinal de  $4000 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;
- modelo 2: foi prescrito como uma peça de concreto simples. A partir do modelo anterior somente acrescentou-se uma faixa linear com as propriedades de um agregado leve de seção quadrada de cerca de 20 mm de lado. Considerou-se para este novo material a densidade de  $1700 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  e velocidade ultrassônica longitudinal de  $4000 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;
- modelo 3: foi aproximado a uma peça de concreto armado. A partir do modelo anterior acrescentou-se outra faixa linear para representar uma seção típica de uma barra de aço redonda. Este novo elemento foi introduzido no k-Wave com 26 mm de diâmetro, densidade,  $7800 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  e velocidade ultrassônica longitudinal de  $5920 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ; e
- modelo 4: foi aproximado como uma peça de concreto armado em processo de corrosão<sup>2</sup>. A partir do modelo 1, inseriu-se ao centro dois círculos concêntricos com propriedades físicas (velocidade e densidade) diferentes, objetivando simular uma barra redonda corroída. Os dados de impedância do círculo interno (denominado de núcleo da barra) foram os mesmos da barra do modelo

---

<sup>2</sup>Destaca-se que o referido processo de corrosão em peças de concreto armado inicia-se a partir de alterações físico-químicas na parte mais externa das barras de aço. A fase posterior resulta na formação de nova uma camada externa, uma vez que ocorre desintegração progressiva da parte externa ao núcleo da ferragem (círculo interno), formando uma camada externa com densidade menor e, consequentemente, também com menores velocidade e impedância em relação ao núcleo. Por sua vez, esta parte mais interna da barra, teoricamente, permanece com impedância preservada. Segundo MEHTA (1994), a corrosão das armaduras é acompanhada por um aumento no volume que pode chegar a até 600 % do volume original do metal.

3. Para o núcleo externo (crosta) foram testadas duas configurações de diâmetros e impedâncias, ou seja, para os diâmetros externos, considerou-se 20 e 15 mm, com velocidades de  $4200 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  e  $3400 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  e densidades de  $3000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  e  $2200 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , respectivamente.

Vale ressaltar que este grupo de simulações também seguiu as mesmas premissas enunciadas para o grupo anterior.

A figura 3.5 esboça os modelos definidos para este segundo grupo:

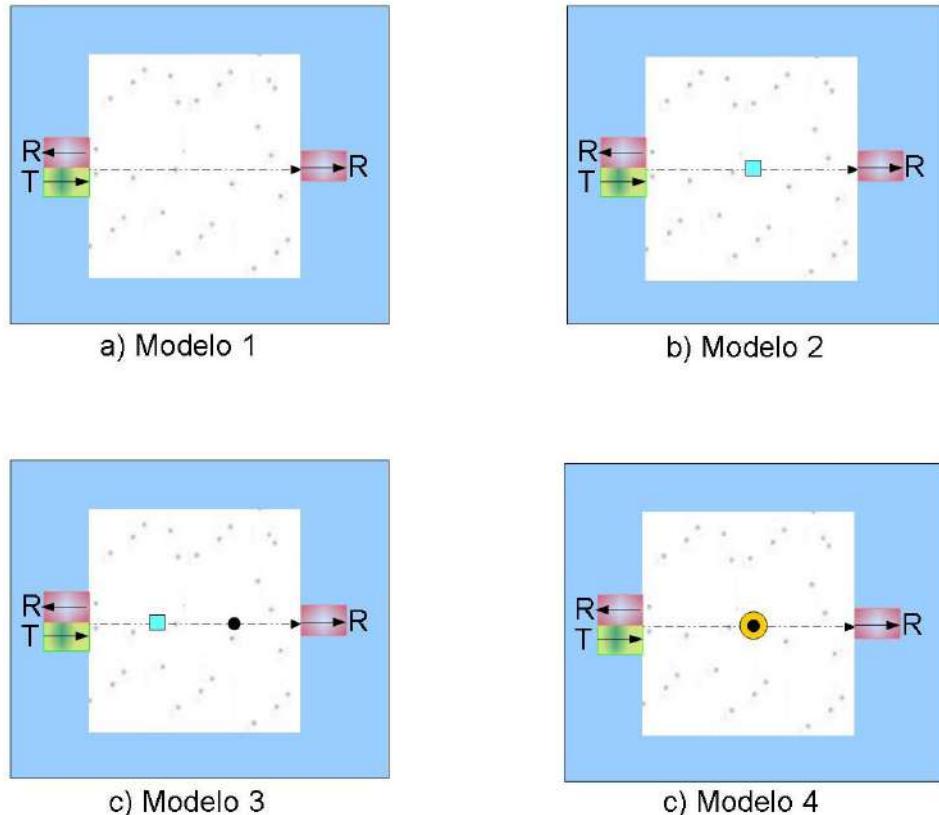


Figura 3.5: Modelos para a simulação do chamado grupo 2. Esboço representando em: a) uma peça de argamassa; b) uma peça de concreto; c) uma peça de concreto armado; e d) uma peça de concreto armado em processo de corrosão.

Tabela 3.6: Variáveis usadas nas simulações para o grupo 2.

Variáveis	Descrição	Valor
kgrid.Nx	Número de pontos do gride (Modelos 1, 2 , 3 e 4)	1024 (1-D)
kgrid.dx	Espaçamento do gride [mm] (Modelos 1, 2 , 3 e 4)	1
kgrid.dt	Discretização temporal [s] (Modelos 1, 2 , 3 e 4)	$75 \times 10^{-9}$
$t_{end}$	Tempo de simulação [s] (Modelos 1, 2, 3 e 4)	$2,56 \times 10^{-4}$
$F_{tom\ puro}$	Tons puros [Hz x $10^5$ ] (Modelos 1, 2 , 3 e 4)	1, 3, 5, 7
$F_{chirp}$	Limites do chirp [Hz x $10^5$ ] (Modelos 1, 2 , 3 e 4)	1 a 7
Db	Percorso no agregado [mm] (Modelos 2 e 3)	20
Dap	Percorso na barra de aço [mm] (Modelos 3 e 4)	26
ep	Percorso na crosta de corrosão [mm] (Modelo 4)	30 e 40

### Grupo 3

Para este grupo de modelagens, objetivou-se confrontar a capacidade de resolução entre os sinais de excitação do tipo tom puro e dos pulsos codificados por meio da análise do erro relativo entre os tempos de percurso medidos entre o caso mais simples (caso 0) e mais complexo (caso 5), para cada um dos modelos, seguindo descrição a seguir.

Foram simulados três modelos cimentícios, cada um composto por um meio trifásico: matriz de argamassa (fundo), agregados e aço. Em relação a um modelo real, os possíveis vazios e pequenos grãos foram desconsiderados. Uma barra de aço foi inserida no centro dos modelos.

A figura 3.6 esboça os três modelos para esse grupo de simulações que também seguiram o padrão unidimensional. O modelo 1 usou o tipo de material 1, simulando um agregado de maior impedância, enquanto nos modelos 2 e 3 o tipo de material 2 foi usado para simular agregados de menor impedância.

As variáveis definidas para cada simulação foram a velocidade do som, tamanho e quantidade de elementos dos meios heterogêneos e estão indicadas na tabela 3.7. A tabela 3.8 apresenta os demais parâmetros necessários à configuração do k-Wave.

Para todos os modelos, o Caso 0 foi modelado sem agregados, mas com uma única barra de aço como alvo individual. Os modelos 1 e 2 compreendem a adição de novos elementos com espessura de: 1 mm (Caso 1); 1 mm e 2 mm (caso 2); 1 mm, 2 mm e 3 mm (caso 3); 1 mm, 2 mm, 3 mm e 4 mm (caso 4); e 1 mm, 2 mm, 3 mm, 4 mm e 5 mm (caso 5). As simulações realizadas para o modelo 3, consideraram seis casos diferentes. Para o caso 1, foram adicionados dois novos elementos com largura de 1 mm e, posteriormente, foram adicionados mais dois elementos de 1 mm para cada caso em relação ao anterior (caso 5 com dez elementos).

Vale destacar que para a modelagem ultrassônica de meios heterogêneos é de-

sejável minimizar a interferência dos vários fatores responsáveis pelas variações nas medições do tempo de voo (ou velocidade do som). Embora computacionalmente seja possível garantir a repetibilidade dos sinais, outros artefatos podem afetar os resultados, como os causados por erros numéricos.

Tabela 3.7: Valores das propriedades usadas nas simulações do grupo 3.

	Velocidade ultrassônica [m · s <sup>-1</sup> ]	Densidade [kg · m <sup>-3</sup> ]	Impedância [MRayl]
Concreto endurecido	4000	2500	10,00
Material tipo 1	4700	3191	15,00
Material tipo 2	3330	2000	6,66
Barra de aço	5920	7860	46,53
Água	1500	1000	1,50

Tabela 3.8: Variáveis usadas nas simulações para o grupo 3.

Variáveis	Descrição	Valor
kgrid.Nx	Número de pontos do gride (Modelos 1, 2 e 3)	1024 (1-D) 512 x 512 (2-D)
kgrid.dx	Espaçamento do gride [mm] (Modelos 1, 2 e 3)	1
kgrid.dt	Discretização temporal [s] (Modelos 1, 2 e 3)	50,67 x 10 <sup>-9</sup>
t <sub>end</sub>	Tempo de simulação [s] (Modelos 1, 2 e 3)	3,46 x 10 <sup>-4</sup>
F <sub>tom puro</sub>	Tons puros [Hz x 10 <sup>5</sup> ] (Modelos 1, 2 , 3 e 4)	1, 3, 5, 7
F <sub>chirp</sub>	Limites do chirp [Hz x 10 <sup>5</sup> ] (Modelos 1, 2 e 34)	1 a 7,5
Dap	Percorso na barra de aço [mm] (Modelos 3 e 4)	26

Por isto, para evitar os possíveis erros de medição citados anteriormente, optou-se por medir as diferenças nos tempos de percurso entre o caso 0 e o caso 5, que proporcionam as máximas interferências destrutivas e construtivas entre os casos propostos.

Deve-se notar que o caso 0 é o mesmo para todos os três modelos, funcionando como uma referência geral. No caso do método de propagação de pulso-eco, os picos de referência foram os primeiros reflexos na barra de aço. Já para o método da transmissão direta, foi o primeiro sinal a chegar ao sensor oposto (R2).

A aquisição dos tempos de percurso foi feita a partir de dois métodos: primeiro, a leitura foi realizada na amplitude máxima do lóbulo principal dos sinais adquiridos; segundo, o tempo de percurso foi a partir do pico máximo do sinal, esse obtido com a transformada de Hilbert (COOK e BERNFELD, 1967).

Conforme já especificado, a avaliação comparativa dos sinais foi efetuada a partir do erro relativo, representado na equação 3.1 entre os valores teóricos e os tempos registrados nas simulações para os casos 0 e 5.

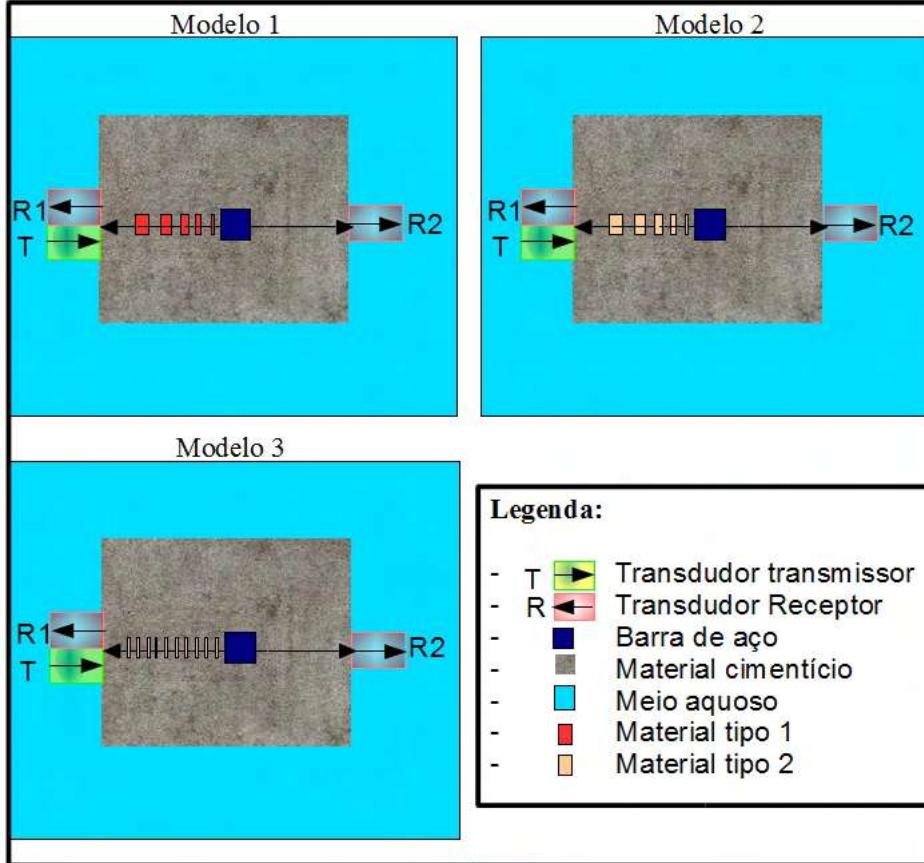


Figura 3.6: Esboço dos modelos de simulação referentes ao caso 5 do grupo 3, correspondendo a um meio cimentício imerso em água com agregados e uma barra de aço.

### 3.5.4 Simulações 2D - Grupo único

Para melhor entender a propagação de ondas nos cenários propostos, duas simulações bidimensionais também foram implementadas de acordo com o modelo 2 da figura 3.6.

Nesses modelos, os elementos inseridos foram quadrados, com lados iguais ao comprimento dos elementos empregados nos modelos unidimensionais. Mais uma vez, foram adotadas condições simplificadas (lineares, sem perda e sem ruído) e um *loop* de malha de 512 x 512 nós, ou seja, não foram definidas regiões de refinamento de pontos específicos da malha.

Basicamente, a modelagem 2D foi proposta para avaliar a propagação qualitativamente.

## 3.6 Experimentos ultrassônicos

Nesta seção serão apresentados os materiais e métodos empregados nos dois experimentais ultrassônicos de contato (UC) efetuados para esta tese.

### 3.6.1 Descrição do UC em CPR para comparação da resposta dos sinais de excitação

Para comparar experimentalmente os sinais de excitação definidos selecionou-se uma amostra de CPR paralelepípedica.

Nesta seção são apresentados os procedimentos adotados objetivando reproduzir as mesmas condições de repetibilidade<sup>3</sup> entre ensaios consecutivos, variando somente a frequência de excitação entre sinais fonte.

Para esta fase do trabalho o confronto dos sinais propostos ocorreu por meio da análise do desvio padrão das medições realizadas.

Um aparato foi montado com o objetivo de minimizar a variabilidade das medições e garantir o posicionamento do transdutor para cada interrogação do meio. O sistema produzido, além de melhorar as condições de acoplamento, permite preservar a força de contato constante entre as trocas dos sinais de excitação em teste. Estes procedimentos visaram melhorar a repetibilidade não apenas para o caminho acústico como também para as condições de partição e propagação de energia no interior da amostra. Vale mencionar que as medições foram realizadas 5 vezes para cada frequência. A figura 3.7 apresenta uma imagem do sistema de aquisição.

Foram utilizados dois transdutores de imersão de 500 kHz: modelo V389 (1 1/4" de diâmetro) para emissão; modelo A301S (1") para recepção. Os transdutores foram fabricados pela Olympus Panametrics-NDT (Japão). O transdutor foi excitado com 1 ciclo de tom puro nas frequências de 100 kHz, 300 kHz, 500 kHz e um *chirp* com frequência aumentando linearmente de 100 kHz a 700 kHz. A duração do *chirp* foi de 200 us. A tensão elétrica de emissão foi ajustada em 10 V<sub>pp</sub> (volts pico a pico). Em todas as aquisições, foram utilizados um gerador de formas de onda arbitrário modelo AWG 33250A (Agilent, Malásia) e um osciloscópio modelo DSO-2014-X (Keysight, Malásia). Cada sinal tinha 20.000 pontos capturados a 100 MSa.s<sup>-1</sup> (intervalo de amostragem temporal  $dt = 10$  ns). Os dados foram manipulados em um computador usando um software desenvolvido no LabView<sup>TM</sup> (National Instruments, EUA). Os tempos de percurso foram calculados a partir dos picos máximos dos sinais usando rotinas confeccionadas no MATLAB<sup>TM</sup>.

---

<sup>3</sup>Segundo o Vocabulário Internacional de Metrologia (VIM)

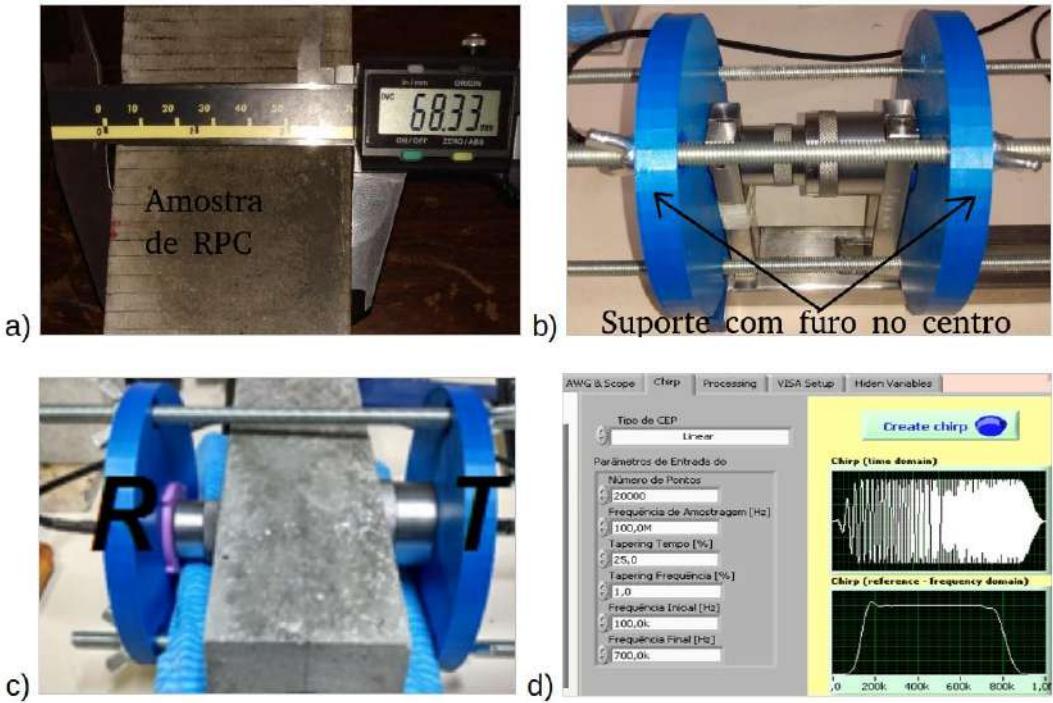


Figura 3.7: As imagens mostram em a) a amostra paralelepípedica de CPR com 68,33 mm de largura e referente ao caminho acústico; b) Aparato experimental para garantir alinhamento e força de contato constante; c) Sistema de aquisição montado na amostra; e d) Tela do aplicativo do software LabView<sup>TM</sup> usado para gerar e comprimir os *chirps* medidos.

### 3.6.2 Descrição do UC em amostras de alumínio

Com o objetivo de aplicar os métodos ultrassônicos discutidos nesta pesquisa e efetuar medições do CRC em alumínio, um sistema controlado foi montado a partir de duas amostras deste material com faces de aproximadamente 75 mm por 75 mm e espessuras de aproximadamente 40 mm e 70 mm. O sistema garantiu as condições de alinhamento entre transdutores posicionados em lados opostos das amostras. Após a limpeza das superfícies elas receberam 1 ml de vaselina líquida como fluido acoplante entre transdutor e superfície de contato. Este procedimento teve como objetivo melhorar as condições de transmissão e reproduzir para ambas faces de contato um modelo trifásico formado pela camada de acoplamento do transdutor, o fluido acoplante e o meio investigado. Segundo KIM *et al.* (2002), espessuras da camada de acoplamento da ordem de unidades a cerca de duas dezenas de micrômetros já garante uma boa transmissão dos dados (DOURADO *et al.*, 2022).

A figura 3.8 mostra a configuração do aparato usado para este experimento. Note que o sistema de alinhamento foi o mesmo utilizado no experimento anterior, acrescido de mais uma peça que também foi confeccionada por manufatura aditiva.

Na referida figura a peça possui cor cinza e um furo no centro (indicada por uma seta na referida figura). Esta nova configuração permitiu a realização de medições equivalentes às simulações, ou seja, foi possível aplicar os métodos PE-1T2R e TT, após realizar o teste de PE.

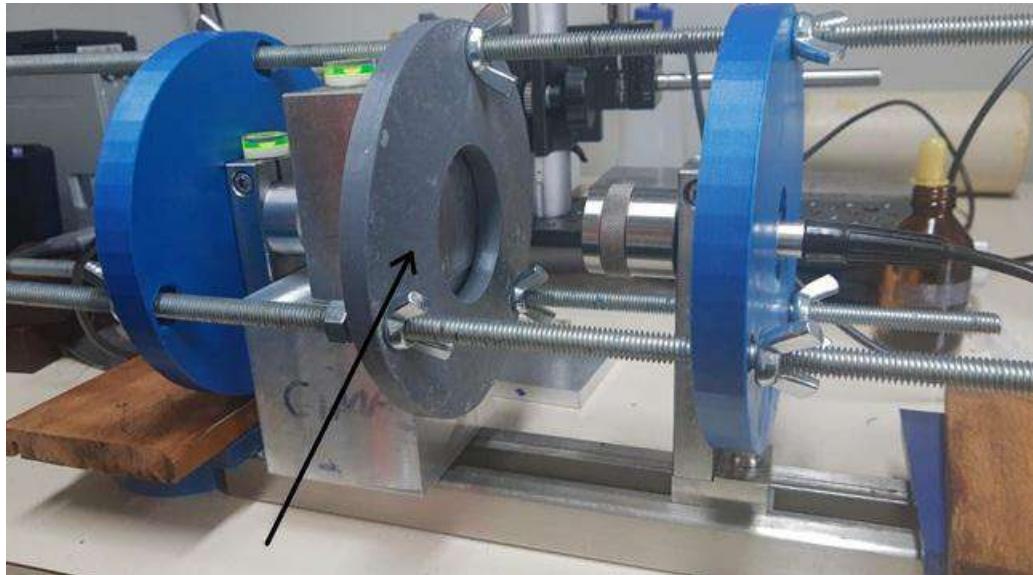


Figura 3.8: Aparato de aquisição ultrassônico para os métodos PE, PE-1T2R e TT.

As notações das tabelas 3.4 e 3.5 também guiaram os intervalos de janelas dos sinais de interesse que permitiram obter resultados seguindo as nomenclaturas definidas para as simulações. Dois pares de transdutores (modelo A-307S, Olympus Panametrics-NDT, Japão), cada um com diâmetro de 1", foram selecionados nas frequências de 2,25 MHz (F1) e 5 MHz (F2). Os transdutores foram excitados com 10 ciclos de tom puro nas frequências centrais com tensão de emissão de  $10V_{pp}$  (voltagem pico a pico). Um gerador de forma de onda arbitrária (modelo AWG 33250A, Agilent, Malásia) e um osciloscópio (modelo DSO-2014-X, Keysight, Malásia) foram usados para todas os registros medidos. Os dados foram registrados em um computador utilizando um software em LabVIEW<sup>TM</sup> (National Instruments, EUA), e as amplitudes foram avaliadas no MATLAB<sup>TM</sup>.

# Capítulo 4

## Resultados

### 4.1 Apresentação dos fatores influenciadores da propagação ultrassônica em concreto

Como forma de ampliar o entendimento acerca da propagação de ondas acústicas em meios cimentícios, em 4.1 apresentam-se os principais fatores influenciadores na propagação da onda acústica no concreto. Vale ressaltar que estes itens listados não esgotam o assunto, apesar de abranger os de maior relevância.

Figura 4.1: Principais fatores influenciadores do pulso ultrassônico no concreto.

Principais fatores influenciadores do sinal ultrassônico no concreto.		
Classes:	N.º	Fatores:
1. Instrumentação, aquisição e condições ambientais	1.1	Método de aquisição dos tempos de trânsito
	1.2	Frequência dos transdutores
	1.3	Tipo de transdutores
	1.4	Tipo de sinal de excitação
	1.5	Temperatura na realização do ensaio
	1.6	Acoplamento entre transdutores e superfícies
2. Geométricos e de superfície	2.1	Distância entre as superfícies de contato dos transdutores
	2.2	Direção do ensaio na peça
	2.3	Geometria dos agregados
	2.3	Conversões de modo das frentes de ondas
	2.4	Nível de rugosidade das superfícies de contato dos transdutores
3. Composição dos insumos	3.1	Tipo do cimento
	3.2	Relação água/cimento – A/C
	3.3	Relação água/agregados – A/Ag
	3.4	Tipo de agregado
	3.5	Densidade do concreto
	3.6	Presença de armadura
4. Patologia e qualidade	4.1	Permeabilidade do concreto
	4.2	Índice de vazios do concreto
	4.3	Umidade do concreto
	4.4	Grau de hidratação do cimento/idade do concreto
	4.5	Tipo de adensamento do concreto
	4.6	Concretos especiais (Presença de aditivos, CAD, ARI, concreto leve etc)
	4.7	Nível de tensão a que a peça está submetida na aquisição
	4.8	Se a peça já sofreu exposição ao fogo
	4.9	Se a peça já foi submetida a ciclos de congelamento
	4.10	Nível de contaminação do concreto

Conforme mencionado, procurou-se reunir os principais fatores já apontados pela literatura e registrados ou não em normas, responsáveis por variações nos pulsos ultrassônicos em concreto, uma vez que, em níveis diferenciados, podem afetar não

somente a velocidade de propagação do pulso como a energia disponível no meio.

Os fatores indicados no referido quadro estão agrupados em 4 classes e podem servir também como um modelo de *check-list* que pode auxiliar técnicos e operadores na coleta das informações a serem registradas em uma aquisição. Ou seja, destaca-se com este modelo o papel fundamental do registro detalhado das condições em que as medições foram realizadas e que poderão auxiliar na interpretação dos dados, seja no presente ou em inspeções futuras.

## 4.2 Gráficos e equações de decaimento da amplitude e atenuação acústica

O objetivo desta seção é apresentar a nomenclatura e definições gerais das variáveis necessárias para entendimento dos gráficos e equações desenvolvidas, bem como as etapas de desenvolvimento das equações gerais de decaimento da amplitude, estimativa da atenuação acústica e o protocolo que permite se chegar ao CRC, para cada um dos métodos estudados

### 4.2.1 Definições, gráficos e desenvolvimento matemático

A seguir serão efetuadas as definições necessárias para que seja possível o entendimento dos gráficos de amplitudes disponíveis e a apresentação de uma abordagem que permite se chegar às equações de decaimento da amplitude para os métodos de PE, TT e *1T2R* (DOURADO *et al.*, 2022).

Serão apresentadas as variáveis de maior representatividade e julgadas indispensáveis de serem consideradas. Estas serão exibidas no domínio da frequência, ou seja, para um sinal temporal qualquer, elas serão apresentadas após aplicação da FFT, ou seja, convertendo o sinal para o domínio da frequência. Vale ressaltar que esta seção do trabalho segue parte da nomenclatura de OLIVEIRA *et al.* (2015).

Considerando  $A0(\omega)$  a amplitude da tensão de entrada definida para um sistema,  $TF_{Tx}(\omega)$  e  $TF_{Rx}(\omega)$  as funções de transferência para transdutores na transmissão e recepção, respectivamente.

Para um sinal  $A0(\omega)$  definido como fonte de excitação de um sistema, a saída  $A0^*(\omega)$  do transdutor segue o modelo convolucionado aproximado na forma:

$$A0^*(\omega) = A0(\omega) \times TF_{Tx}(\omega) \quad (4.1)$$

em que  $\times$  representa o produto entre os sinais no domínio da frequência seguindo o teorema da convolução<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup>O teorema da convolução estabelece que a transformada de Fourier de uma convolução de duas

Definindo  $I_t$ ,  $I_a$  e  $I_m$  as impedâncias da camada de proteção do transdutor, do fluido de acoplamento e meio investigado, respectivamente, é possível escrever:

$$RC_{Tx \rightarrow c} = RC_{Txa} = \frac{(I_a - I_{Tx})}{(I_a + I_{Tx})} \text{ e } TC_{Tx \rightarrow a} = TC_{Txa} = (1 - RC_{Txa}) \quad (4.2)$$

e

$$RC_{a \rightarrow m} = RC_{am} = \frac{(I_m - I_a)}{(I_m + I_a)} \text{ e } TC_{a \rightarrow m} = TC_{cm} = (1 - RC_{am}) \quad (4.3)$$

e,

$$RC_{ar \rightarrow m} = RC_{arm} = \frac{(I_m - I_{ar})}{(I_m + I_{ar})} \text{ e como } I_m \gg I_{ar} \rightarrow RC_{am} \simeq 1 \quad (4.4)$$

no qual  $RC_{arm}$ ,  $RC_{Txa}$ , e  $RC_{am}$  são os coeficientes de reflexão e  $TC_{arm}$ ,  $TC_{Txa}$  e  $TC_{am}$  são os coeficientes de transmissão entre o ar e material investigado, a camada de proteção e o acoplamento e entre o acoplamento e o material, respectivamente. Note que para uma representação geral,  $RC$  e  $TC$  são considerados independentes da frequência.

Além disso, como os testes de contato ultrassônico são sempre realizados com um fluido acoplante, é possível considerar apenas um fator associado para cada coeficiente, ou seja,  $CTC_{Txm} = TC_{Txa} \times TC_{am}$  e  $RC_{Txm} = RC_{Txa} \times RC_{am}$ . Ou seja, depois de passar pelo transdutor, o sinal é transmitido além da interface e sua amplitude é reduzida pelo efeito do coeficiente de transmissão combinado ( $CTC_{Txm}$ ):

$$A0'(\omega) = A0(\omega) \times TF_{Tx}(\omega) \times CTC_{Txm} \quad (4.5)$$

A partir deste instante,  $A0'(\omega)$  será a amplitude disponível para propagação em cada meio seguindo qualquer um dos métodos disponíveis.

A figura 4.2 esboça graficamente o comportamento geral das perdas de amplitude dos sinais acústicos ao longo da propagação para os métodos de pulso-eco, transmissão direta e  $1T2R$ . Os decréscimos de amplitude dos trechos inclinados representam as perdas exponenciais típicas dos fenômenos de divergência esférica, espalhamento e atenuação do meio. Essas perdas geralmente ocorrem ao longo da propagação da frente de onda. Decaimentos verticais representam as perdas pontuais e tipicamente ocorrem em conversões entre diferentes interfaces do meio e entre estes e os sensores.

---

funções integráveis é equivalente ao produto ponto a ponto das suas transformadas (KEAREY et al., 2009).

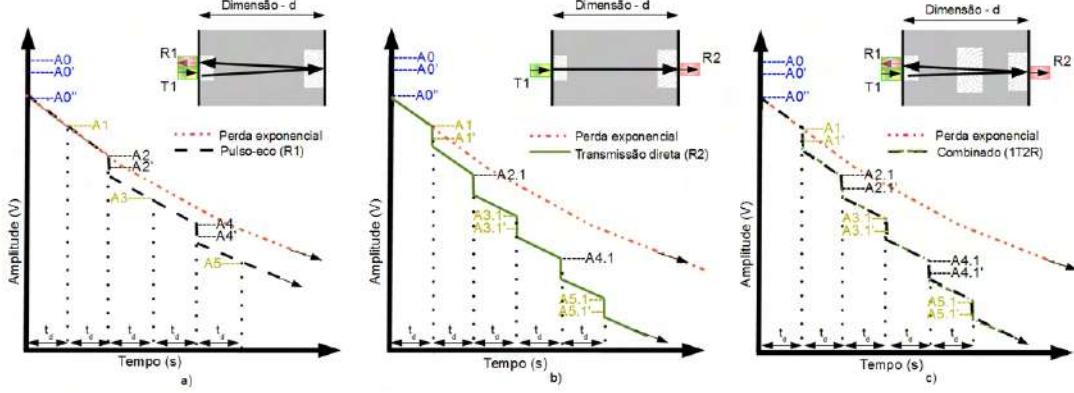


Figura 4.2: Esboço da redução de amplitude ao longo do tempo para: a) Método de PE; b) método de TT; e c) método *1T2R*.

É possível visualizar também na figura 4.2 letras associadas a números que representam em sequência as múltiplas medições de amplitude, realizadas por transdutores acoplados nas faces da amostra, para cada um dos métodos indicados. As amplitudes  $A1'$ ,  $A3'$ ,  $A5'$  e  $A7'$  (índices ímpares) são medidas para o método de transmissão e estão relacionadas a  $A1$ ,  $A3$ ,  $A5$  e  $A7$ , que correspondem às amplitudes dos sinais imediatamente antes de cruzarem a superfície de acoplamento do transdutor. Da mesma forma, as amplitudes  $A2'$ ,  $A4'$ ,  $A6'$  e  $A8'$  (índices pares) são medidas para o método PE, e estão relacionadas a  $A2$ ,  $A4$ ,  $A6$  e  $A8$ , antes de chegarem nos receptores.

Neste trabalho, fatores específicos foram adotados relacionados às perdas por difração no momento da transmissão ( $G_{Tx}(\omega)$ ) e da recepção ( $G_{Rx}(\omega, t)$ ). Observe que apenas o último varia com o espalhamento do sinal, em inglês *spread*.

Outro fator de correção chamado de Correção Média Espacial ( $SAC(\omega, t)$ ) foi também considerado. Entre esses termos, exceto pelo fator relacionado à perda de difração na transmissão, os outros dois dependem das distâncias entre transmissão e recepção, do diâmetro efetivo do transdutor e do conteúdo de frequência (KINO, 1987).

As perdas de energia para esses dois últimos fatores mencionados, embora não indicadas diretamente na figura 4.2, estão implicitamente consideradas nos instantes de decaimento vertical (parcela de  $G_{Rx}(\omega, t)$ ) e exponencial (parcela de  $SAC(\omega, t)$ ).

### Perdas pelo método pulso-eco (PE)

Ao usar o arranjo de aquisição de PE, é possível estimar a amplitude emitida pelo sensor de transmissão, após reflexão no fundo da amostra e ser medida no retorno por:

$$\begin{aligned}
A2'(\omega) = & A0(\omega) \times TTF_{Tx}(\omega) \times CTC_{T xm} \times G_{Tx}(\omega) \times e^{-\alpha(\omega)t} \times RC_{mar} \times e^{-\alpha(\omega)t} \\
& \times G_{Rx}(\omega, t) \times CTC_{m Tx} \times RTF_{Tx}(\omega) \times SAC(\omega, t)
\end{aligned} \tag{4.6}$$

em que o termo  $TTF_{Tx}(\omega)$  a função de transferência de um transdutor na transmissão, o termo  $CTC_{T xm}$  é o coeficiente de transmissão combinado entre sensor, acoplamento e amostra. O termo  $G_{Tx}(\omega)$  é o fator de difração na transmissão. O termo  $e^{-\alpha(\omega)t}$  representa as perdas exponenciais devido à atenuação. O termo  $RC_{mar}$  é o coeficiente de reflexão entre a amostra e o ar.  $G_{Rx1}(\omega, t)$  é o fator de difração no instante da recepção. O termo  $CTC_{m Tx}$  é o coeficiente de transmissão combinado entre amostra, acoplamento e transdutor. O termo  $RTF_{Tx}(\omega)$  é a função de transferência do sensor na recepção. O termo  $SAC(\omega, t)$  é o fator de correção devido à não planicidade da frente de onda ao ser lida pelo transdutor. Observe que quando os termos estão associados a  $(\omega)$ , eles indicam dependência apenas da frequência e, quando associados a  $(\omega, t)$ , podem variar ao longo da propagação.

Agrupando os termos equivalentes ( $CTC_{T xm} = CTC_{m Tx}$ ) e aproximando  $RC_{mar} \approx 1$ , ou seja, o coeficiente de reflexão entre sólido/ar é muito próximo da unidade, é possível reescrever (4.6) em (4.7):

$$\begin{aligned}
A2'(\omega) = & A0(\omega) \times TTF_{Tx}(\omega) \times CTC_{T xm}^2 \times G_{Tx}(\omega) \times e^{-2\alpha(\omega)t} \\
& \times RC_{mw} \times G_{Rx}(\omega, t) \times RTF_{Tx}(\omega) \times SAC(\omega, t)
\end{aligned} \tag{4.7}$$

Na próxima reflexão:

$$\begin{aligned}
A4'(\omega) = & A0(\omega) \times TTF_{Tx}(\omega) \times CTC_{T xm}^2 \times G_{Tx}(\omega) \times e^{-\alpha(\omega)t} \times e^{-\alpha(\omega)t} \times RC_{mw} \\
& \times CRC_{m Tx} \times e^{-\alpha(\omega)t} \times e^{-\alpha(\omega)t} \times RC_{mw} \times G_{Rx}(\omega, t) \times RTF_{Tx}(\omega) \times \\
& SAC(\omega, t)
\end{aligned} \tag{4.8}$$

É possível notar que em (4.8) um novo termo ( $CRC_{m Tx}$ ) aparece se referindo à reflexão que ocorre entre o material, acoplamento e transdutor.

Agrupando os termos iguais, é possível reescrever (4.8) em (4.9):

$$\begin{aligned}
A4'(\omega) = A0(\omega) \times TTF_{Tx}(\omega) \times CTC_{Txm}^2 \times RC_{mw}^2 \times G_{Tx}(\omega) \times e^{-4\alpha(\omega)t} \times CRC_{mTx} \\
\times G_{Rx}(\omega, t) \times RTF_{Tx}(\omega) \times SAC(\omega, t)
\end{aligned} \tag{4.9}$$

Para cada  $n$  (par) medido no sensor pelo método PE:

$$\begin{aligned}
An'(\omega) = A0(\omega) \times TTF_{Tx}(\omega) \times CTC_{Txm}^2 \times G_{Tx}(\omega) \times e^{-(n)\alpha(\omega)t} \times CRC_{mTx}^{\left(\frac{n}{2}-1\right)} \\
\times G_{Rx}(\omega, t) \times RTF_{Tx}(\omega) \times SAC(\omega, t)
\end{aligned} \tag{4.10}$$

Como os termos  $G_{Rx}(\omega, t)$  e  $SAC(\omega, t)$  dependem da distância de propagação entre emissão e recepção, é possível definir uma relação entre diferentes medições das reflexões consecutivas nos transdutores e considerar:

$$G_{Rx1}\left(\omega, \frac{t_n}{t_2}\right) = \frac{G_{Rx}(\omega, t_n)}{G_{Rx}(\omega, t_2)} \tag{4.11}$$

$$SAC\left(\omega, \frac{t_n}{t_2}\right) = \frac{SAC(\omega, t_n)}{SAC(\omega, t_2)} \tag{4.12}$$

Adicionalmente, combinando os termos (4.11) e (4.12) em um único:

$$DS\left(\omega, \frac{t_n}{t_2}\right) = G_{Rx}\left(\omega, \frac{t_n}{t_2}\right) \times SAC\left(\omega, \frac{t_n}{t_2}\right) \tag{4.13}$$

Dividindo a equação (4.10) por (4.7) e usando (4.13), é possível escrever  $An'(\omega)$  em função de  $A2'(\omega)$ :

$$An'(\omega) = A2'(\omega) \times e^{-(n+2)\alpha(\omega)t} \times CRC_{mTx}^{\left(\frac{n}{2}-1\right)} \times DS\left(\omega, \frac{t_n}{t_2}\right) \tag{4.14}$$

A partir da equação (4.14), é possível observar que a exceção dos termos:  $e^{-(n-2)\alpha(\omega)t}$ ,  $CRC_{mTx}^{\left(\frac{n}{2}-1\right)}$ ,  $DS\left(\omega, \frac{t_4}{t_2}\right)$  e parcelas de amplitude  $An'(\omega)$  e  $A2'(\omega)$ , todos os outros termos ocorrem na saída ou chegada dos transdutores e puderam ser simplificados.

Ao considerar na equação (4.14) o tempo de trânsito na amostra  $t_d$  e aplicando dois sinais consecutivos  $A2'$  e  $A4'$ , é possível escrever:

$$A4'(\omega) = A2'(\omega) \times e^{-2\alpha(\omega)t_d} \times CRC_{mTx} \times DS\left(\omega, \frac{t_4}{t_2}\right) \quad (4.15)$$

Para exibir a atenuação em função da dimensão ( $d$ ), substitui-se  $t_d$  por  $d$ . A partir da (4.15), é possível isolar o termo exponencial:

$$\frac{A4'(\omega)}{A2'(\omega) \times CRC_{mTx} \times DS\left(\omega, \frac{t_4}{t_2}\right)} = e^{-2\alpha(\omega)d} \quad (4.16)$$

E aplicando o logaritmo neperiano:

$$\ln \left[ \frac{A4'(\omega)}{A2'(\omega) \times CRC_{mTx} \times DS\left(\omega, \frac{t_4}{t_2}\right)} \right] = \ln [e^{-2\alpha(\omega)d}] \quad (4.17)$$

Assim:

$$\begin{aligned} -2\alpha(\omega)d &= \ln \left[ \frac{A4'(\omega)}{A2'(\omega) \times CRC_{mTx} \times DS\left(\omega, \frac{t_4}{t_2}\right)} \right] \text{ ou} \\ 2\alpha(\omega)d &= \ln \left[ \frac{A2'(\omega) \times CRC_{mTx} \times DS\left(\omega, \frac{t_4}{t_2}\right)}{A4'(\omega)} \right] \end{aligned} \quad (4.18)$$

e finalmente:

$$\begin{aligned} \alpha(\omega) &= \frac{\ln \left[ \frac{A2'(\omega) \times CRC_{mTx} \times DS\left(\omega, \frac{t_4}{t_2}\right)}{A4'(\omega)} \right]}{2d} \left[ \frac{\text{nepers}}{L} \right] \text{ ou, como 1 neper} = \frac{20}{\ln(10)} \text{ decibels} \\ \alpha(\omega) &= \frac{20 \log \left[ \frac{A2'(\omega) \times CRC_{mTx} \times DS\left(\omega, \frac{t_4}{t_2}\right)}{A4'(\omega)} \right]}{2d} \left[ \frac{\text{decibel}}{L} \right] \end{aligned} \quad (4.19)$$

Assim, em (4.19) estão apresentadas as equações para estimativa do coeficiente de atenuação em neper/dimensional ou decibel/dimensional, ambos para cada conteúdo específico de frequência.

### Perdas pelo método de transmissão direta (TT)

Por outro lado, ao usar apenas o sistema de aquisição por transmissão direta, é possível escrever a primeira amplitude emitida pelo sensor 1, após atravessar o material e ser lida no sensor 2, como:

$$\begin{aligned} A1'(\omega) = & A0(\omega) \times TTF_{Tx1}(\omega) \times CTC_{Tx1m} \times G_{Tx1}(\omega) \times e^{-\alpha(\omega)t} \times G_{Rx2}(\omega, t) \\ & \times CTC_{mTx2} \times RTF_{Tx2}(\omega) \times SAC(\omega, t) \end{aligned} \quad (4.20)$$

Para a primeira reflexão:

$$\begin{aligned} A3'(\omega) = & A0(\omega) \times TTF_{Tx1}(\omega) \times CTC_{Tx1m} \times G_{Tx1}(\omega) \times e^{-\alpha(\omega)t} \times RC_{mTx2} \times e^{-\alpha(\omega)t} \\ & \times RC_{mTx1} \times e^{-\alpha(\omega)t} \times G_{Rx2}(\omega, t) \times CTC_{mTx2} \times RTF_{Tx2}(\omega) \times SAC(\omega, t) \end{aligned} \quad (4.21)$$

Agrupando os termos iguais e considerando acoplamentos e transdutores similares em dimensão e superfície da camada correspondente para ambos sensores, é possível considerar que eles tenham iguais coeficientes de reflexão combinado ( $CRC_{mTx1} = CRC_{mTx2} = CRC_{mTx}$  and  $CTC_{mTx1} = CTC_{mTx2} = CTC_{mTx}$ ), e reescrever (4.21) da forma:

$$\begin{aligned} A3'(\omega, t) = & A0(\omega) \times TTF_{Tx1}(\omega) \times CTC_{Tx1m}^2 \times G_{Tx}(\omega) \times e^{-3\alpha(\omega)t} \times CRC_{mTx}^2 \\ & \times G_{Rx}(\omega) \times RTF_{Tx2}(\omega) \times SAC(\omega, t) \end{aligned} \quad (4.22)$$

Para cada  $n$  ímpar medido no sensor de receção seguindo o método da transmissão direta:

$$\begin{aligned} An'(\omega) = & A0(\omega) \times TTF_{Tx1}(\omega) \times CTC_{Txm}^2 \times G_{Tx}(\omega) \times e^{-(n)\alpha(\omega)t} \times CRC_{mTx}^{(n-1)} \\ & \times G_{Rx}(\omega, t) \times RTF_{Tx2}(\omega) \times SAC(\omega, t) \end{aligned} \quad (4.23)$$

Dividindo as equações (4.10) por (4.20) e usando (4.13), é possível escrever  $An'(\omega)$  em função de  $A1'(\omega)$ :

$$An'(\omega) = A1'(\omega) \times e^{-(n+1)\alpha(\omega)t} \times CRC_{mTx}^{(n-1)} \times G_{Rx}(\omega, t) \times SAC(\omega, t) \quad (4.24)$$

A partir da (4.24), também se observa que a exceção dos termos

$e^{-(n+1)\alpha t}, CRC_{mTx}^{(n-1)}, G_{Rx}\left(\omega, \frac{t_n}{t_2}\right), SAC\left(\omega, \frac{t_n}{t_2}\right)$  e parcelas de amplitude  $An'(\omega)$  e  $A1'(\omega)$ , todos os outros termos ocorrem na saída ou chegada dos transdutores e puderam ser simplificados.

Substituindo na equação (4.24) dois sinais consecutivos de amplitude  $A1'$  e  $A3'$ , é possível escrever:

$$A3'(\omega) = A1'(\omega) \times e^{-2\alpha(\omega)t_d} \times CRC_{mTx}^2 \times DS\left(\omega, \frac{t_3}{t_1}\right) \quad (4.25)$$

Assim, entre reflexões consecutivas, além das perdas exponenciais por atenuação, dos efeitos dos fatores de difração correção da abertura da frente de onda, pode-se observar na equação (4.25) um fator quadrático relacionado ao CRC entre a amostra e a face dos transdutores.

E aplicando os passos já aplicados para o método PE:

$$\frac{A3'(\omega)}{A1'(\omega) \times CRC_{mTx}^2 \times DS\left(\omega, \frac{t_4}{t_2}\right)} = e^{-2\alpha(\omega)d} \quad (4.26)$$

E aplicando o logaritmo neperiano:

$$\ln \left[ \frac{A3'(\omega)}{A1'(\omega) \times CRC_{mTx}^2 \times DS\left(\omega, \frac{t_3}{t_1}\right)} \right] = \ln [e^{-2\alpha(\omega)d}] \quad (4.27)$$

Assim:

$$\begin{aligned} -2\alpha(\omega)d &= \ln \left[ \frac{A3'(\omega)}{A1'(\omega) \times CRC_{mTx}^2 \times DS\left(\omega, \frac{t_3}{t_1}\right)} \right] \left[ \frac{\text{neper}}{L} \right] \text{ ou} \\ 2\alpha(\omega)d &= 20 \ln \left[ \frac{A1'(\omega) \times CRC_{mTx}^2 \times DS\left(\omega, \frac{t_3}{t_1}\right)}{A3'(\omega)} \right] \left[ \frac{\text{decibel}}{L} \right] \end{aligned} \quad (4.28)$$

### Perdas pelo método combinado ou **1T2R**

Quando dois transdutores estão posicionados no arranjo de transmissão direta, e ambos realizam medições de recepção de um mesmo sinal propagado por um deles, este arranjo corresponde ao método combinado ou **1T2R**. Conforme comentado no final do método anterior, para o caso das mesmas condições de geometria, acoplamento e continuidade entre sensores, o comportamento da amplitude recebida nos

diferentes sensores é idêntico ao método da transmissão direta, que corresponde à equação (4.20) e que pode ser reescrita em (4.29):

$$\begin{aligned} A1'(\omega) &= A0(\omega) \times TTF_{Tx1}(\omega) \times CTC_{Tx1m} \times G_{Tx1}(\omega) \times e^{-\alpha(\omega)t} \times G_{Rx2}(\omega, t) \\ &\quad \times TC_{mTx2} \times RTF_{Tx2}(\omega) \times DS\left(\omega, \frac{t_3}{t_1}\right) \end{aligned} \quad (4.29)$$

em que os índices 1 e 2 são referentes aos sensores de transmissão e recepção, respectivamente. Assim para este método, quando o transdutor de emissão receber a primeira reflexão, haverá incremento de um coeficiente de reflexão combinado ( $CRC_{mTx}$ ), caso sejam seguidas as condições mencionadas no parágrafo anterior, e a equação (4.7) se torna:

$$\begin{aligned} A2'(\omega) &= A0(\omega) \times TTF_{Tx1}(\omega) \times CTC_{Tx1m}^2 \times G_{Tx1}(\omega) \times e^{-2\alpha(\omega)t} \times CRC_{mTx} \\ &\quad \times G_{Rx1}(\omega, t) \times RTF_{Tx1}(\omega) \times SAC(\omega, t) \end{aligned} \quad (4.30)$$

Para qualquer número inteiro  $n$ , a equação geral para o método *1T2R* segue o desenvolvimento já seguido para os outros:

$$\begin{aligned} An'(\omega) &= A0(\omega) \times TF_{Tx}(\omega) \times CTC_{Txm}^n \times G_{Tx}(\omega) \times e^{-(n)\alpha(\omega)t} \times CRC_{mTx}^{(n-1)} \\ &\quad \times G_{Rx}(\omega, t) \times TF_{Tx}(\omega) \times SAC(\omega, t) \end{aligned} \quad (4.31)$$

Portanto, para o método *1T2R*, é possível dizer que a equação geral (4.31) é igual à equação (4.14) para transmissão direta e as equações do cálculo de atenuação podem ser representadas por uma extensão de (4.28). Ou seja, para este método, a única diferença na equação é que  $n$  é para qualquer inteiro, ao invés de somente para termos ímpares. Assim, devido a esta diferença, as equações finais para este serão:

$$An'(\omega) = A1'(\omega) \times e^{-(n+1)\alpha(\omega)t} \times CRC_{mTx}^{(n-1)} \times G_{Rx}(\omega, t) \times SAC(\omega, t) \quad (4.32)$$

$$An'(\omega) = A1'(\omega) \times e^{-(n+1)\alpha(\omega)t} \times CRC_{mTx}^{(n-1)} \times DS\left(\omega, \frac{t_{n+1}}{t_n}\right) \quad (4.33)$$

$$\alpha(\omega) = \frac{\ln \left[ \frac{An'(\omega) \times CRC_{mTx} \times DS\left(\omega, \frac{t_{n+1}}{t_n}\right)}{An+1'(\omega)} \right]}{2d} \left[ \frac{neper}{L} \right] \text{ ou} \\ \alpha(\omega) = \frac{20 \log \left[ \frac{An'(\omega) \times CRC_{mTx} \times DS\left(\omega, \frac{t_{n+1}}{t_n}\right)}{An+1'(\omega)} \right]}{2d} \left[ \frac{decibel}{L} \right]$$
(4.34)

para  $n$  inteiro, aqui apresentada de forma geral.

#### 4.2.2 Protocolo para o cálculo do CRC

A partir do desenvolvimento apresentado, é possível estimar os coeficientes combinados de reflexão (CRC) relacionados à combinação de transdutores, acoplamentos e os meios investigados. Para se chegar à expressão que permite determinar o CRC, pode-se dividir as equações gerais correspondentes aos métodos de pulso-eco *1T2R* (4.34) pela equação tradicional de pulso-eco (4.19). Com o cancelamento dos termos idênticos, será possível calcular os valores de CRC a partir das relações de amplitude medidas nesses métodos, da seguinte maneira:

$$\frac{An.1'(\omega)}{An'(\omega)} = \frac{e^{-(n+1)\alpha(\omega)t}}{e^{-(n+1)\alpha(\omega)t}} \times \frac{CRC_{mTx}^{(n-1)}}{CRC_{mTx}^{(\frac{n}{2}-1)}} \times \frac{G_{Rx}(\omega, t) \times SAC(\omega, t)}{G_{Rx}(\omega, t) \times SAC(\omega, t)}$$
(4.35)

Considerando que as amplitudes são medidas nas mesmas condições de repetibilidade para os métodos de PE-*1T2R* e o PE tradicional, é possível determinar o CRC entre quaisquer razões de amplitudes medidas em reflexões equivalentes, seguindo a equação:

$$CRC_{mTx}^{(\frac{n}{2})} = \frac{An.1'(\omega)}{An'(\omega)} \text{ ou } CRC_{mTx} = \sqrt[n/2]{\frac{An.1'(\omega)}{An'(\omega)}}$$
(4.36)

para  $n$  par.

#### 4.2.3 Determinação da atenuação acústica para meios de baixa perda

A partir da abordagem em que se amplia o coeficiente de reflexão para um coeficiente de reflexão combinado, também foram apresentadas expressões para o cálculo da atenuação acústica geral para cada um dos métodos. Adicionalmente, ao se considerar a medição em materiais de baixa perda, também foi possível estabelecer

equações simplificadas para estimativa da atenuação nestes meios.

Assim, de acordo com as equações desenvolvidas neste estudo, a seguinte expressão 4.37 permite uma boa aproximação para a determinação do coeficiente de atenuação para baixas perdas entre as primeiras e segundas reflexões do método PE:

$$\alpha(\omega) = \frac{20 \log \left[ \frac{A2'(\omega) \times CRC}{A4'(\omega)} \right]}{2d} \left[ \frac{\text{decibel}}{L} \right] \quad (4.37)$$

ou em 4.38, seguindo sua forma geral:

$$\alpha(\omega) = \frac{20 \log \left[ \frac{An'(\omega) \times CRC}{An+2'(\omega)} \right]}{2d} \left[ \frac{\text{decibel}}{L} \right] \quad (4.38)$$

em que  $n$  e  $n + 2$  são ecos consecutivos entre os múltiplos possíveis sinais refletidos nas faces de medição de uma amostra no método de PE.

A equação 4.38 foi comparada com a apresentada na norma IEC-63081 (2019) para o cálculo do coeficiente de atenuação para meios de baixa perda. Nesta nova abordagem há a inclusão do CRC dentro do logaritmo multiplicando a razão entre amplitudes consecutivas medidas no método PE.

## 4.3 Resultados das simulações computacionais

A seguir serão apresentados os resultados das simulações unidimensionais e bidimensionais executados com o software k-Wave. Assim como no capítulo anterior, os resultados encontram-se divididos em grupos. Vale lembrar que nas simulações, devido ao caráter determinístico das grandezas medidas, estas não são passíveis de incertezas oriundas das medições.

### 4.3.1 Resultados 1D - 03 Grupos

#### Resultados grupo 1

Nestas simulações foi empregado um sinal de excitação de 10 ciclos de tom puro centrado na frequência de 1 MHz (ver sinal temporal em 4.3a) e seu respectivo espectro de frequência em 4.3c)) e após aplicada uma função janela Gaussiana (ver sinal temporal em 4.3b) e seu respectivo espectro de frequência em 4.3d). Adicionalmente, as medições das amplitudes nos domínios temporal e da frequência foram empregadas para o cálculo do CRC a partir de versões gerais e simplificadas das equações desenvolvidas nesta pesquisa.

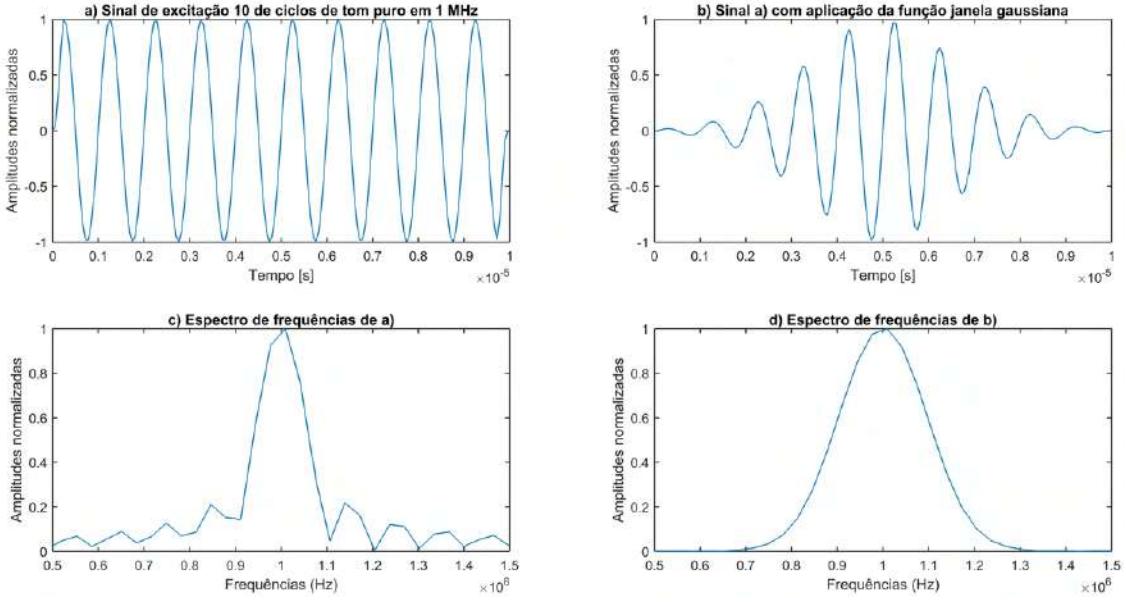


Figura 4.3: Sinais temporais de excitação antes e após aplicação da função janela Gaussiana (acima) e respectivos espectros de frequência (abaixo) utilizados para o grupo 1.

Comparando as figuras 4.3c) e 4.3d) é possível observar que a aplicação da função janela Gaussiana permitiu minimizar os efeitos de ripples, em inglês *ripple effect*, no espectro de frequência original. Este recurso, em termos práticos, permite que os sinais lidos apresentem uma melhor resolução temporal.

Nestas simulações, os sinais dos tons puros foram explorados a partir da medição direta dos tempos de trânsito das suas propagações nos cenários propostos mimetizando meios cimentícios. Quanto aos sinais codificados, após o registro dos sinais lidos diretamente nos pontos que simularam os receptores, estes foram submetidos ao processamento conhecido como deconvolução. A tabela 4.1 reúne as propriedades físicas de entrada para este grupo de simulações e a tabela 3.6 apresenta os demais parâmetros necessários à configuração do k-Wave.

Tabela 4.1: Valores das propriedades usadas nas simulações do grupo 2.

	Velocidade ultrassônica [m s <sup>-1</sup> ]	Densidade [kg m <sup>-3</sup> ]	Impedância [MRayl]
Argamassa	4000	2200	8,80
Agregado leve	4000	1700	6,8
Núcleo da barra de aço	5920	7860	46,53
Barra de aço com corrosão	4200 e 3400	3000 e 2200	12,6 e 7,4
Água	1500	1000	1,50

A figura 4.4 mostra os sinais de saída no domínio do tempo para os cenários e métodos propostos. O evento que ocorre no tempo inicial da referida figura é a excitação a que o meio foi submetido.

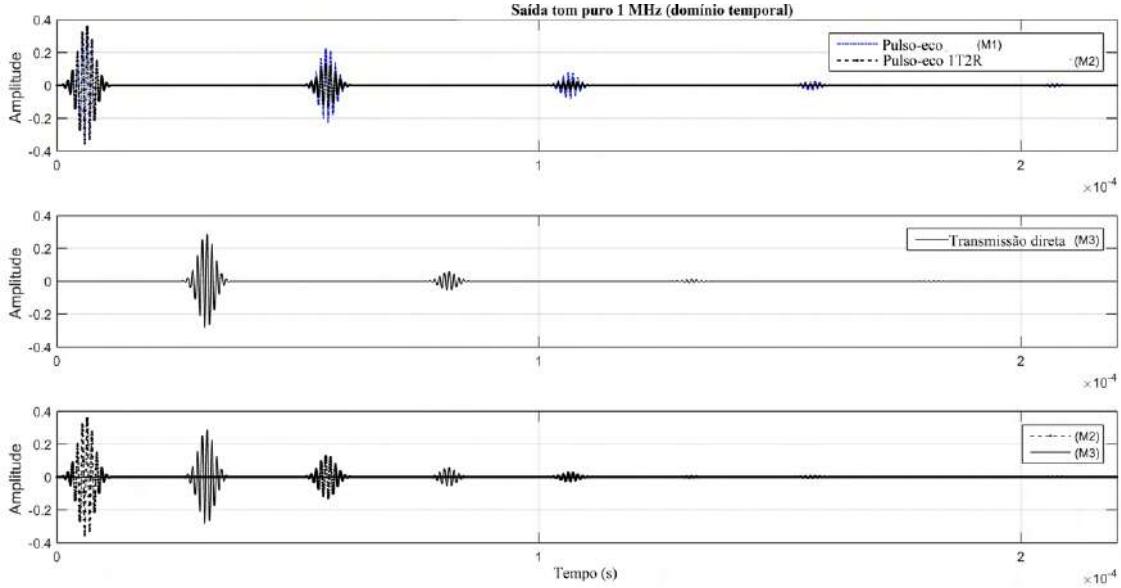


Figura 4.4: Sinais temporais dos três métodos aplicados em simulação.

Da mesma forma, a tabela 4.2 apresenta as amplitudes máximas de cada evento janelado no domínio temporal, conforme descrito nos materiais e métodos desta pesquisa. A tabela 4.3 exibe os valores de CRC calculados a partir das equações obtidas para CRC.

Tabela 4.2: Valores das amplitudes pico-a-pico para cada um dos sinais janelados.

Sinais janelados no domínio do tempo				
Método	W <sub>1</sub>	W <sub>2</sub>	W <sub>3</sub>	W <sub>4</sub>
M1 (PE)	0,579 e 0,494	0,265 e 0,278	0,120 e 0,156	0,055 e 0,088
M2 (PE-1T2R)	0,265 e 0,279	0,055 e 0,089	0,012 e 0,028	0,007 e 0,019
M3 (TT)	0,580 e 0,489	0,120 e 0,156	0,025 e 0,05	0,005 e 0,016

Cada um dos sinais mostrados na figura 4.4 foi janelado e recebeu terminologia de acordo com a tabela 3.4. Na parte superior, é possível ver dois traços unidimensionais, ou seja, do tipo A-SCAN. Aquele com a energia mais alta refere-se ao sinal de PE (M1), enquanto o outro é referente ao sinal de pulso-eco com um transdutor acoplado no lado oposto, referido neste método de PE-1T2R (M2). Para ambos os traços, os quatro primeiros sinais são observados. Esses sinais correspondem à sua primeira reflexão e aos seus três múltiplos subsequentes. A figura ao meio mostra a linha referente ao método de transmissão direta (M3). Também conforme a tabela 3.4, o sinal corresponde ao primeiro sinal recebido na transmissão e aos três múltiplos. Na linha inferior são exibidos os sinais combinados de M2 e M3, referente ao

Tabela 4.3: Valores calculados para os CRC no domínio do tempo e seguindo as equações indicadas para os métodos estudados.

Nº da equação	Forma geral	Valores calculados [%]		
(4.36)	$CRC = \sqrt[n]{\frac{A(M2W_n)}{A(M1W_n)}}$	45,8 e 56,5	45,5 e 56,5	45,8 e 56,7
Nº da equação	Forma sem perdas	Valores calculados [%]		
(4.19)	$CRC = \frac{A(M1W_{n+1})}{A(M1W_n)}$		45,9 e 56,3	45,4 e 56
(4.28)	$CRC = \sqrt{\frac{A(M3W_{n+1})}{A(M3W_n)}}$		45,5 e 56,4	45,9 e 56,5
(4.34)	$CRC = \frac{A(M3W_n)}{A(M2W_n)}$	45,7 e 56,4	45,7 e 56,5	45,7 e 56,6

método *1T2R*. A tabela 4.2 mostra os dados de amplitude pico a pico para sinais no domínio temporal. A partir destes valores foi possível calcular os valores de CRC de acordo com as equações desenvolvidas e são apresentados na tabela 4.3. Vale lembrar que, de acordo com a tabela 3.3, os valores esperados para o CRC (modelados a partir do coeficiente de reflexão teórico) foram de 45,5% e 56,1%.

Observa-se que apenas a equação 4.36 foi aplicada em sua forma geral, pois na abordagem adotada neste trabalho, não depende dos efeitos de perdas devido à atenuação, difração ou média espacial. Assim, a partir das relações de amplitude entre os respectivos sinais dos métodos M1 e M2, foi possível chegar a valores próximos do esperado. Além disso, como esta pesquisa utilizou simulações unidimensionais ( $SAC = 0$ ), sem perdas ( $\alpha = 0$ ) e desprezando quaisquer efeitos de difração ( $G = 0$ ), também foi possível aplicar versões simplificadas das equações (4.19), (4.28) e (4.34) para calcular os valores de CRC, os quais pode-se observar que são próximos dos valores teóricos, demonstrando também a validade teórica destas equações (DOURADO *et al.*, 2022).

### *Sinais no domínio da frequência*

A figura 4.5 apresenta os sinais após conversão para o domínio da frequência empregando a FFT.

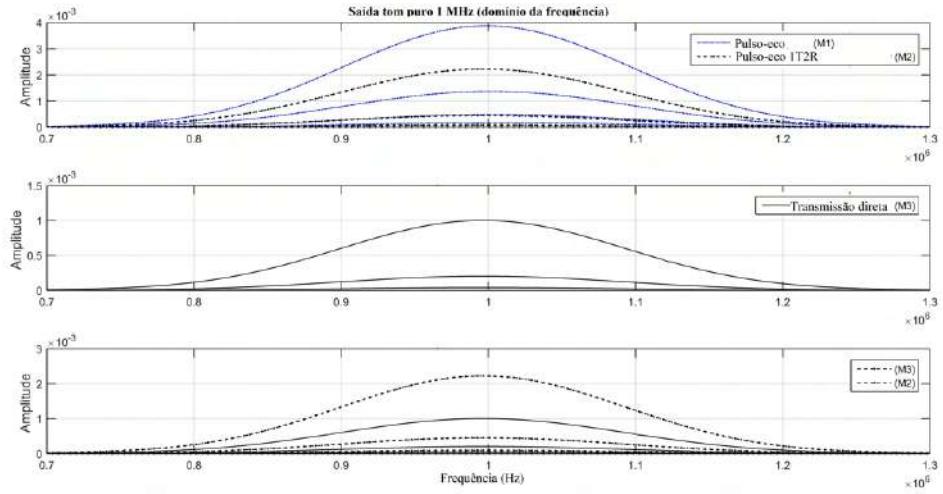


Figura 4.5: Espectro de frequênciados sinais nos três métodos aplicados neste grupo.

Conforme mencionado na seção dos materiais e métodos, as curvas dos espectros de frequênciados obtidos a partir dos janelamento dos eventos de reflexão para cada um dos métodos indicados.

Da mesma forma, a tabela 4.4 apresenta as amplitudes máximas de cada sinal janelado seguido da sua conversão para o domínio da frequênciados. A tabela 4.5 mostra os valores calculados das equações citadas para o cálculo do CRC apresentado neste trabalho.

Tabela 4.4: Amplitudes medidas e usadas nos cálculos dos coeficientes de reflexão combinados no domínio da frequênciados.

Sinais janelados no domínio da frequênciados [x 10-3]				
Método	W <sub>1</sub>	W <sub>2</sub>	W <sub>3</sub>	W <sub>4</sub>
M1 (PE)	5,0 e 5,6	2,3 e 4,2	1,0 e 2,4	0,47 e 1,3
M2 (PE-1T2R)	2,3 e 5,6	0,47 e 2,4	0,098 e 0,76	0,02 e 0,024
M3 (TT)	5,0 e 4,2	1,0 e 1,4	0,21 e 0,42	0,04 e 0,13

As tabelas 4.3 e 4.5 apresentam a Equação 4.36 em sua forma geral para cada um dos métodos. A abordagem descrita neste estudo foi adotada por não depender dos efeitos da perdas por atenuação, difração ou média espacial. Assim, foi possível obter valores próximos aos esperados das relações de amplitude entre os sinais M1 e M2.

As variações nos resultados do CRC apresentados nas referidas tabelas não indicam necessariamente melhores ou piores resultados dos diferentes métodos. Essas diferenças refletem apenas que os diferentes comprimentos de propagação dos sinais afetaram a precisão das simulações apresentadas. No entanto, isso não desqualifica o uso de recursos computacionais para validar as equações desenvolvidas.

Tabela 4.5: Valores calculados para os coeficientes de reflexão combinados no domínio da frequência.

N° da equação	Forma geral	Valores calculados [%]			
(4.36)	$CRC = \sqrt[n]{\frac{A(M2W_n)}{A(M1W_n)}}$	45,8 e 57,3	45,7 e 56,5	45,7 e 56,9	45,5 e 56,5
N° da equação	Forma simplificada	Valores calculados [%]			
(4.19)	$CRC = \sqrt{\frac{A(M1W_{n+1})}{A(M1W_n)}}$		45,6 e 57,1	45,6 e 54,2	45,6 e 57,8
(4.28)	$CRC = \sqrt{\frac{A(M3W_{n+1})}{A(M3W_n)}}$		45,6 e 57,7	45,6 e 55,1	45,7 e 56,3
(4.34)	$CRC = \sqrt{\frac{A(M3W_n)}{A(M2W_n)}}$	45,6 e 57,3	45,6 e 56,4	45,6 e 57,2	45,4 e 56,4

Como esta pesquisa utilizou simulações unidimensionais, implica em ( $SAC = 0$ ), sem perdas, logo ( $\alpha = 0$ ) e quaisquer efeitos de difração ( $G = 0$ ), foi possível aplicar versões simplificadas da equação 4.19 do método PE, 4.28 do método TT, e 4.34 do PE-*1T2R*. Os valores de CRC calculados para os dois exemplos aproximaram-se dos valores esperados de 45,5 % e 56,1 % para os dois grupos simulados. Esta proximidade na concordância dos resultados também contribui para a validade teórica destas equações.

Os parâmetros CRC discutidos neste estudo não estão diretamente relacionados com a atenuação do meio. No entanto, interferem diretamente nas amplitudes do sistema e na energia disponibilizada a este. Em resumo, seu valor depende basicamente de quatro fatores: i. impedância do material; ii. inclinação da frente de onda incidente; iii. espessura da camada de acoplamento; e iv. rugosidade do contato nas superfícies.

Vale ressaltar que estes resultados demonstram que o uso simultâneo das técnicas de PE e TT podem ser empregados para potencializar os resultados destes métodos em aplicações ultrassônicas (DOURADO *et al.*, 2022).

## Resultados grupo 2

Conforme mencionado, nos materiais e métodos desta pesquisa, este grupo de dados objetiva avaliar qualitativamente a resolução dos sinais propostos a partir das respostas das simulações computacionais empregando o k-Wave. A partir dos 4 cenários de complexidade crescente definidos para esta etapa, as figuras 4.6 e 4.7 apresentam os sinais de excitação a que estes modelos foram submetidos para a avaliação qualitativa pretendida nesta fase.

A partir destas respostas será possível visualizar os sinais temporais recebidos pelo método PE. Assim, será possível efetuar um comparação qualitativa para diferentes faixas do espectro. Adicionalmente, será possível identificar o sinal codificado

antes e após o processo de compressão do sinal.

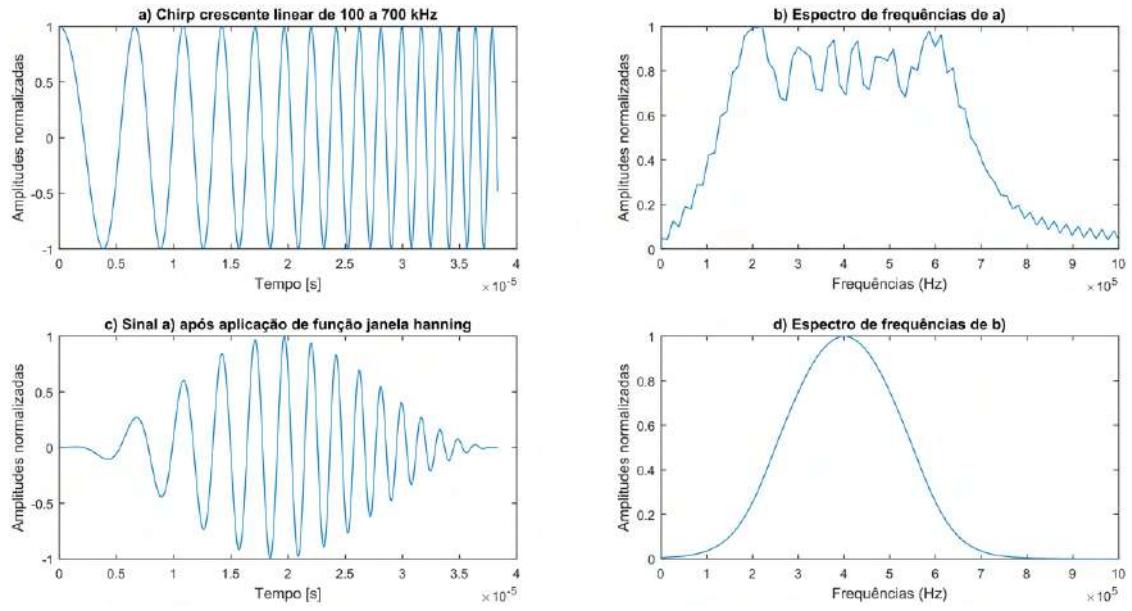


Figura 4.6: Pulso codificado do *chirp* 1 de 100 a 700 kHz. Em a) *Chirp* original no domínio temporal; b) o espectro de frequências antes de a); c) *Chirp* após aplicação da função janela do tipo Hanning; e d) Espectro de c) e que foi utilizado como sinal de excitação no software k-Wave.

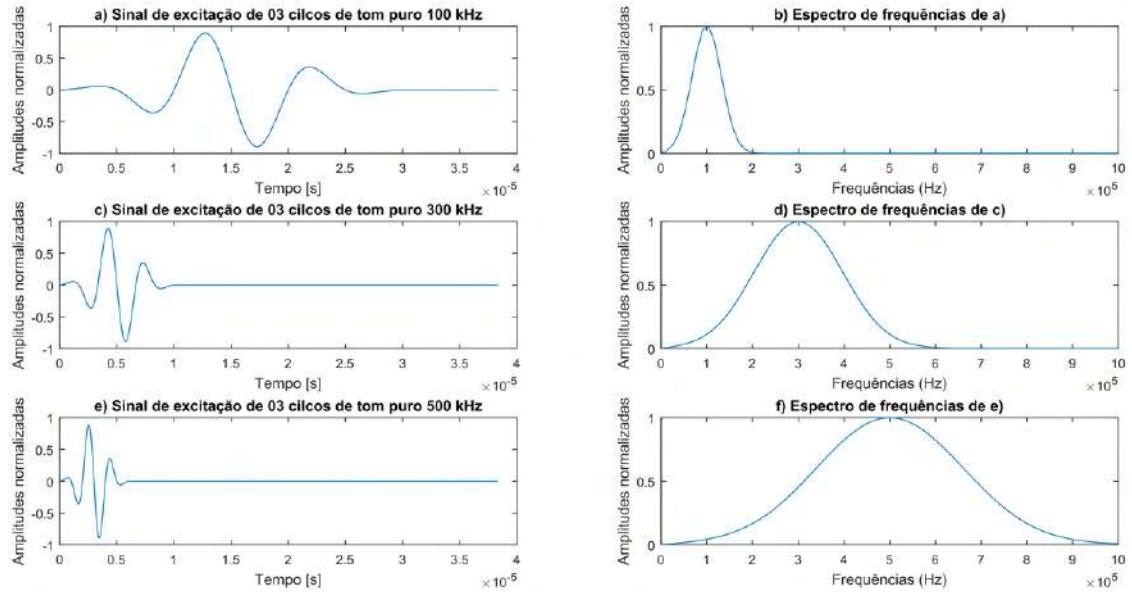


Figura 4.7: Tons puros empregados neste grupo de simulações. Em a) o sinal no tempo para 100 kHz; b) o espectro de frequências de a); Em c) o sinal no tempo para 300 kHz; d) o espectro de frequências de c); Em e) o sinal no tempo para 500 kHz; f) o espectro de frequências de e).

Em 4.8 pode-se visualizar o cenário para o modelo 1.

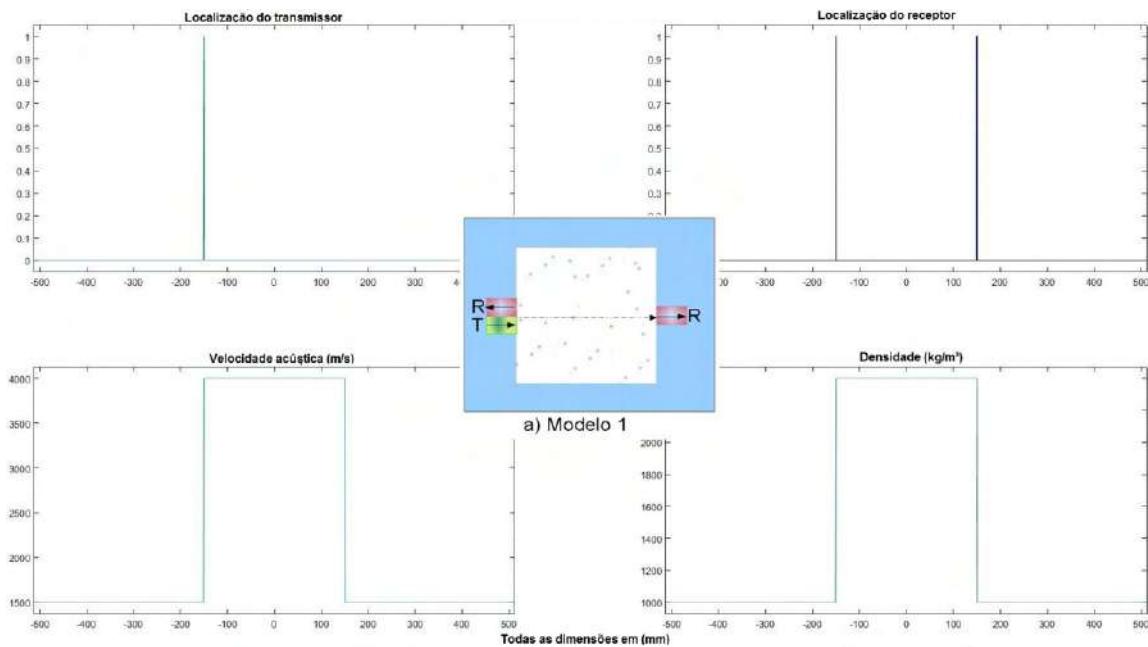


Figura 4.8: Arranjo de aquisição do modelo 1 utilizando o k-Wave.

Em 4.9 apresentam-se as respostas dos sinais selecionados para o modelo 1.

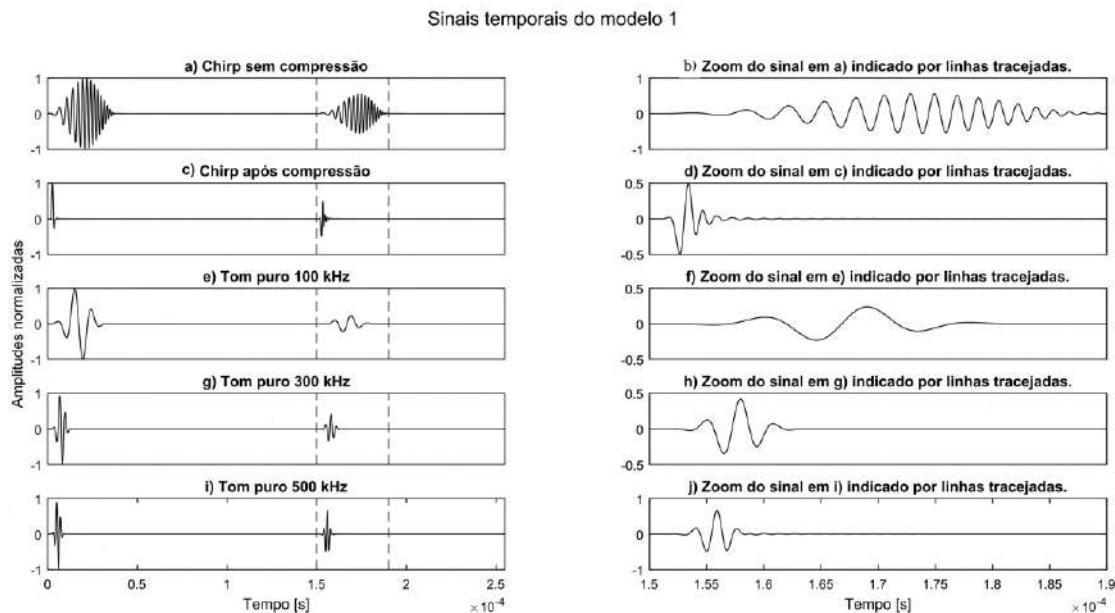


Figura 4.9: Sinais recebidos a partir do modelo 1.

Em 4.10 pode-se visualizar o cenário para o modelo 2.

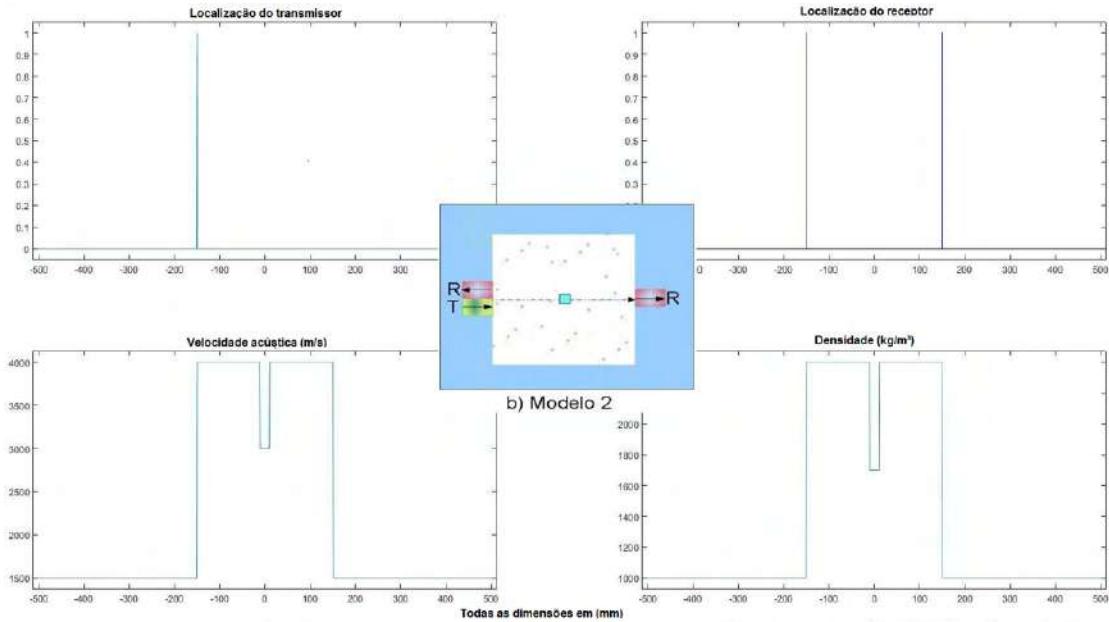


Figura 4.10: Arranjo de aquisição do modelo 2 utilizando o k-Wave.

Em 4.11 apresentam-se as respostas dos sinais selecionados para o modelo 2.

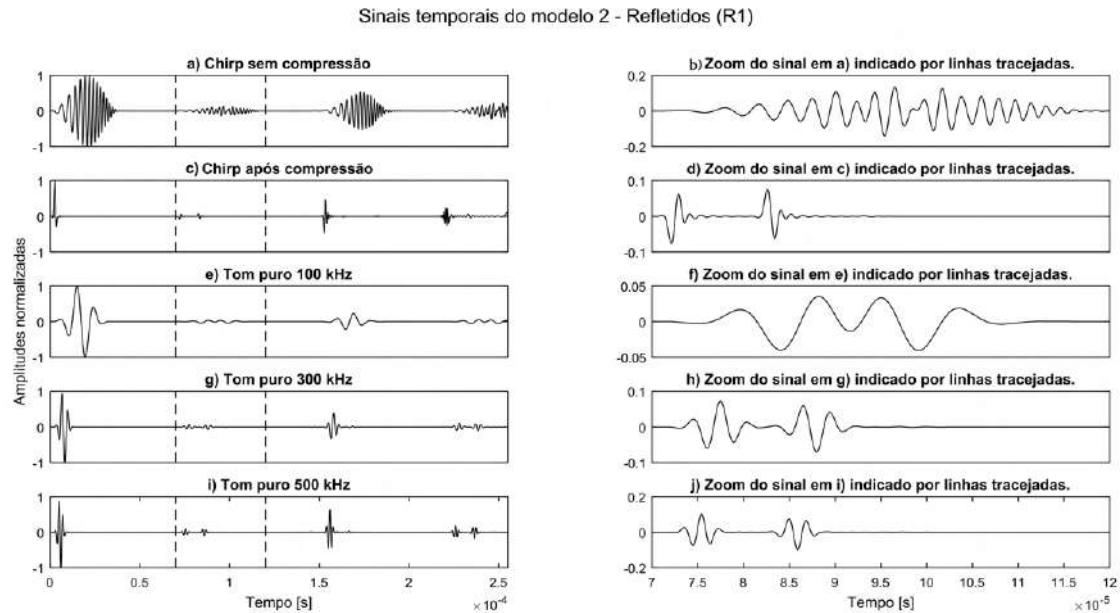


Figura 4.11: Sinais recebidos a partir do modelo 2.

A partir dos modelos 4.8 e 4.10 permite-se notar que o *chirp* tem resolução superior às frequências de 100 kHz e 300 kHz, embora os resultados obtidos com o *chirp* se assemelhem, neste caso, aos resultados obtidos com a frequência de 500 kHz.

Em 4.12, pode-se visualizar o cenário para o modelo 3.

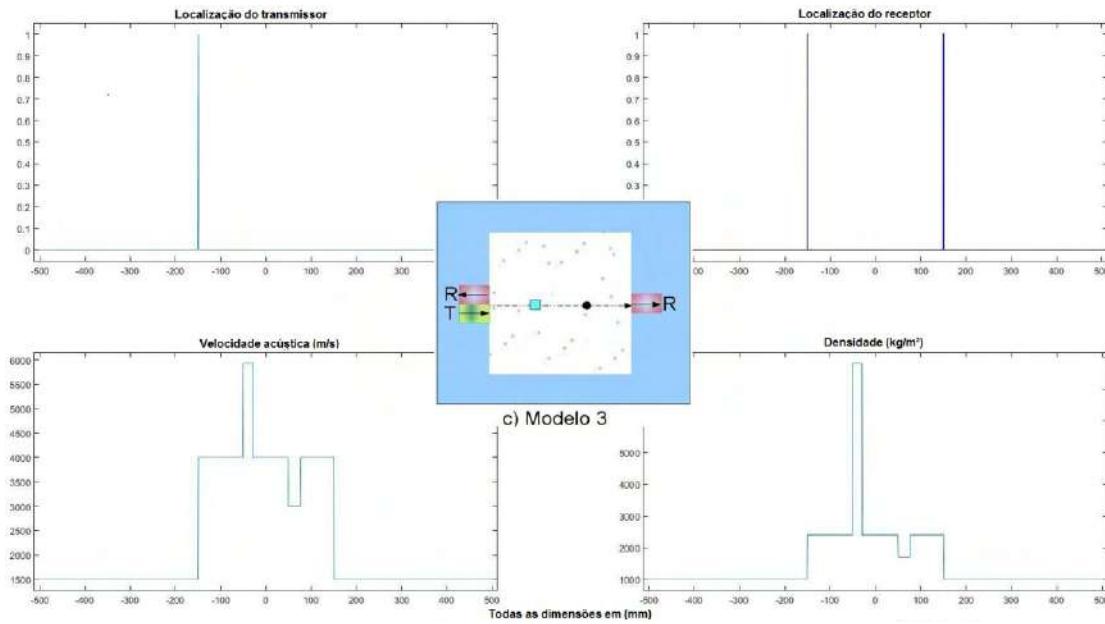


Figura 4.12: Arranjo de aquisição do modelo 3 utilizando o k-Wave.

Em 4.13, apresentam-se as respostas dos sinais selecionados para o modelo 3.

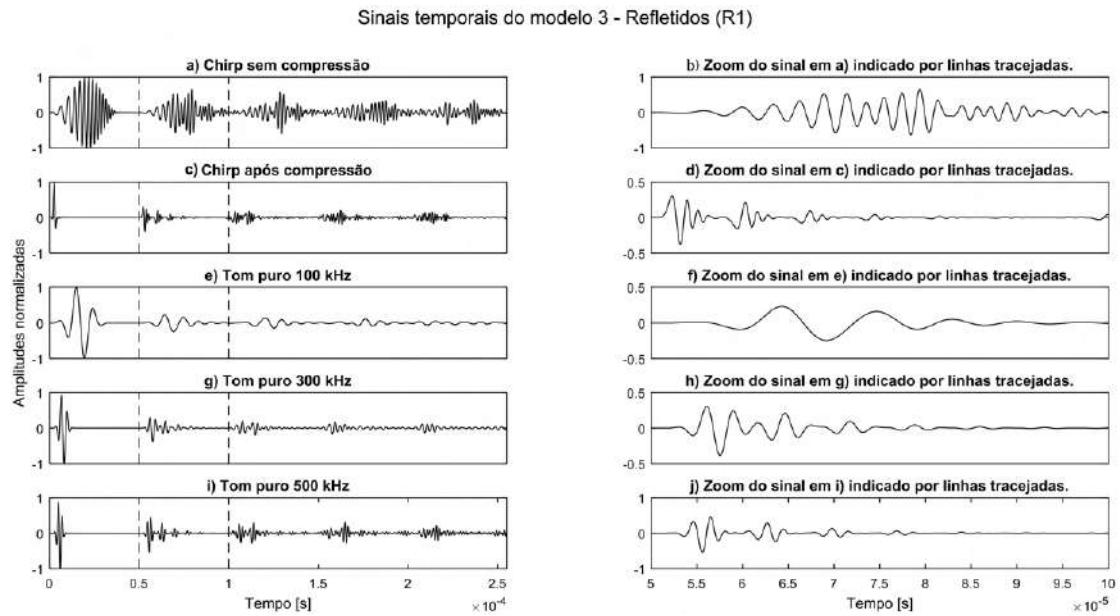


Figura 4.13: Sinais recebidos a partir do modelo 3.

Em 4.14 pode-se visualizar o cenário para o modelo 4.

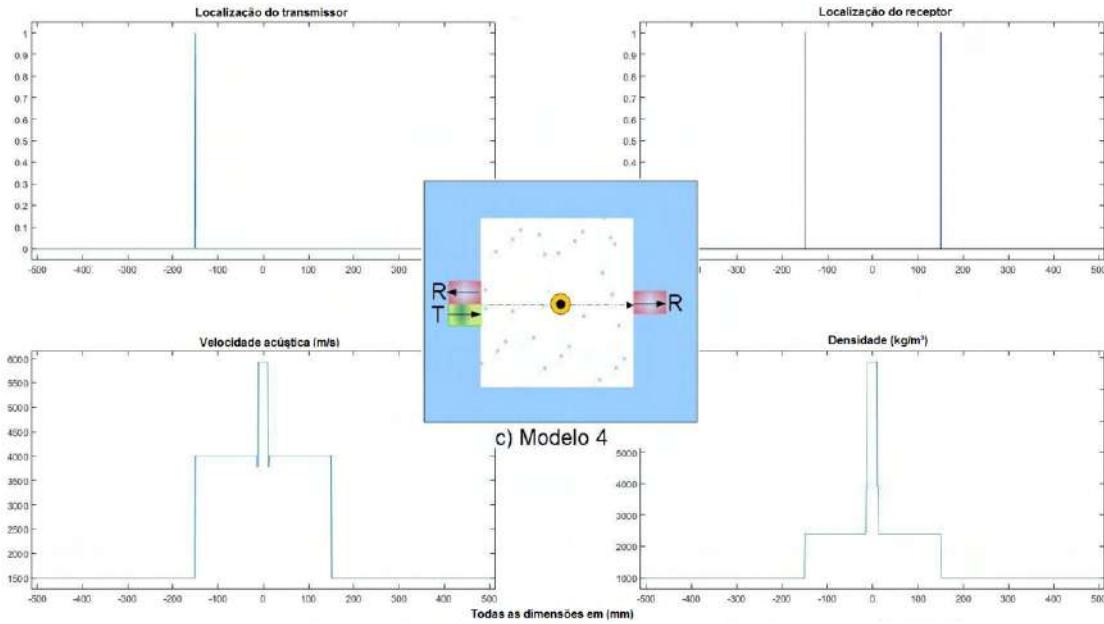


Figura 4.14: Arranjo de aquisição do modelo 4 utilizando o k-Wave.

Em 4.15 apresenta-se as respostas dos sinais selecionados para o modelo 4.

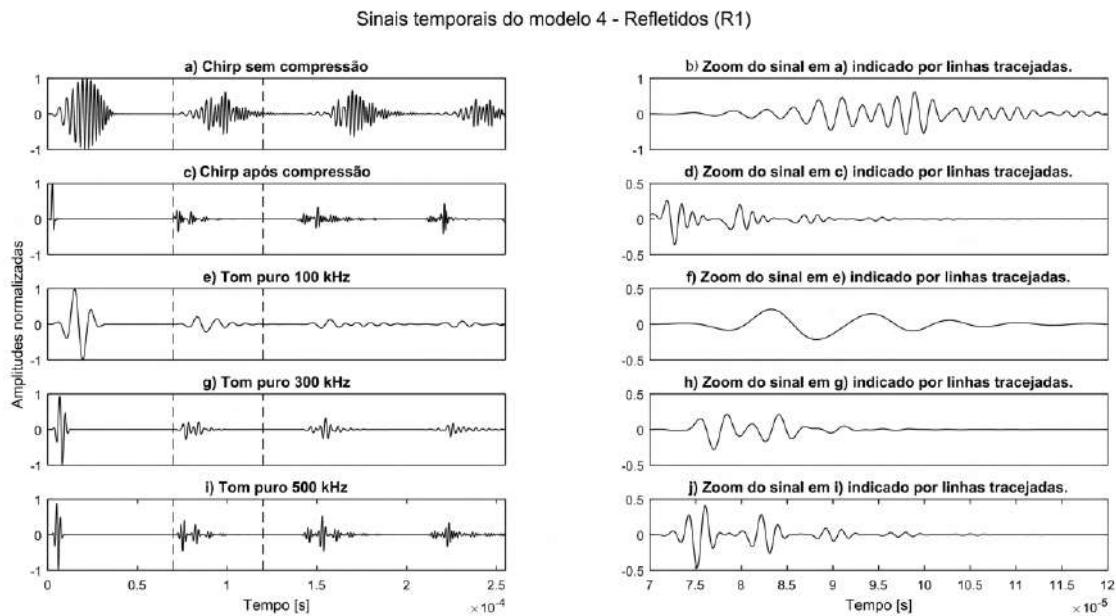


Figura 4.15: Sinais recebidos a partir do modelo 4.

Comparando a resposta dos sinais apresentados em 4.13 e 4.15, pode-se notar que a resposta do *chirp* apresenta superior resolução aos outros tons puros, inclusive aos sinais de 500 kHz. Ou seja, comparando a parcela final do primeiro sinal de reflexão (em cerca de 7,4 us) do *chirp* é possível inferir que ela possui melhor resolução que o tom puro mencionado.

## Resultados grupo 3

As figuras de 4.16 e 4.17 esboçam os sinais de excitação empregados neste grupo de simulações.

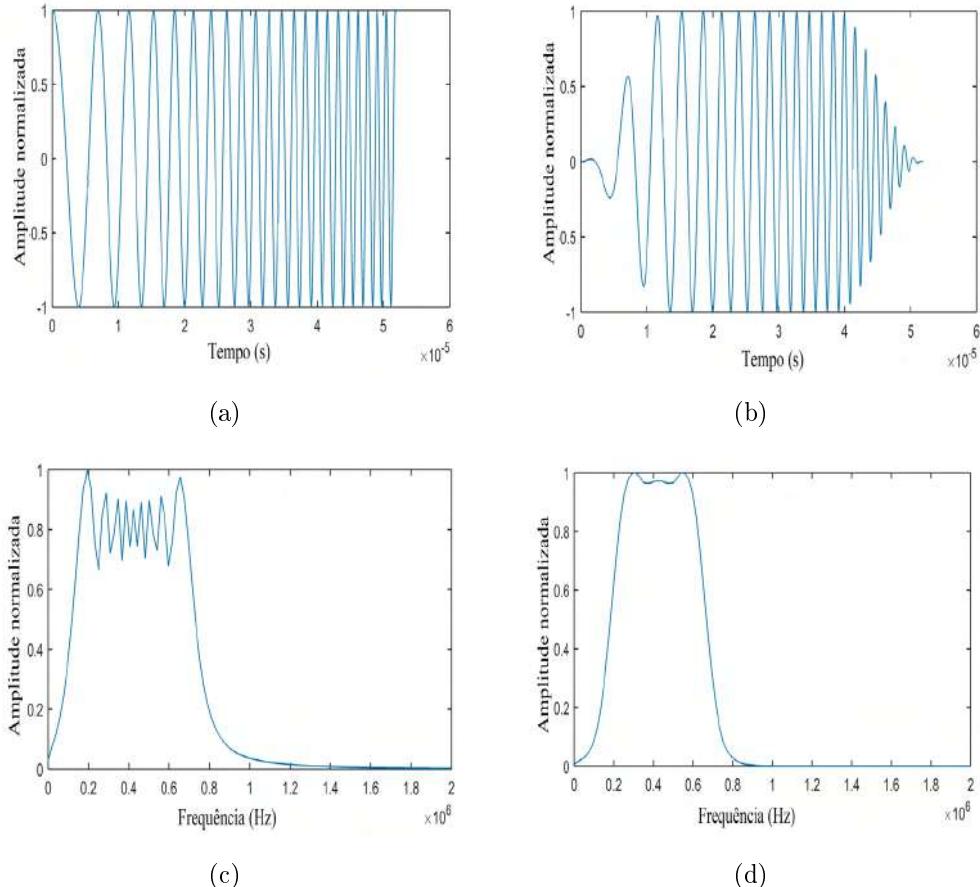


Figura 4.16: Em a) Sinal temporal do *chirp* crescente linear de 20 a 720 kHz; em b) Sinal a) após aplicação de uma função janela Tukey; c) Espectro de frequências de a); e d) Espectro de frequências de b).

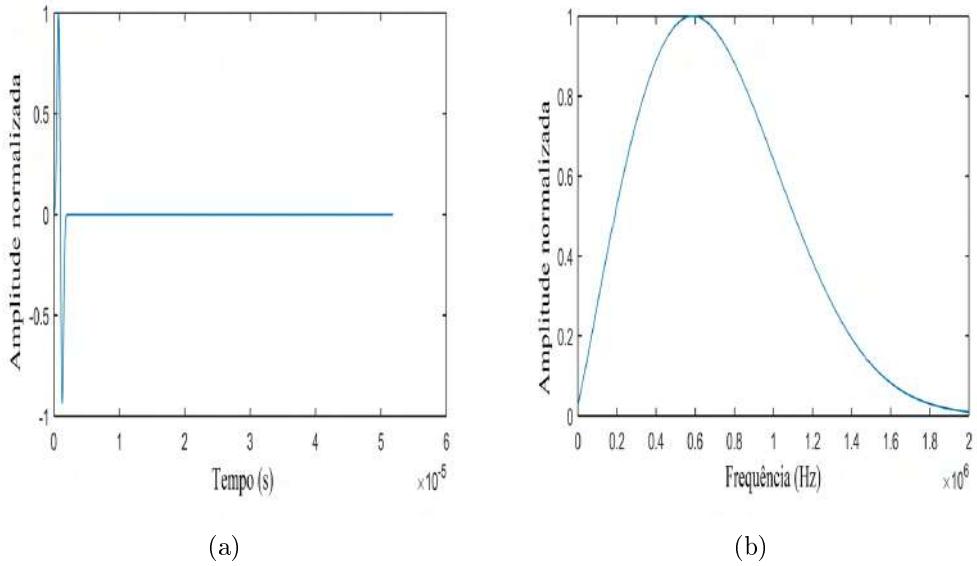


Figura 4.17: Em a) o sinal temporal capturado a partir de tom puro de 500 kHz; e b) Espectro de frequênciade a).

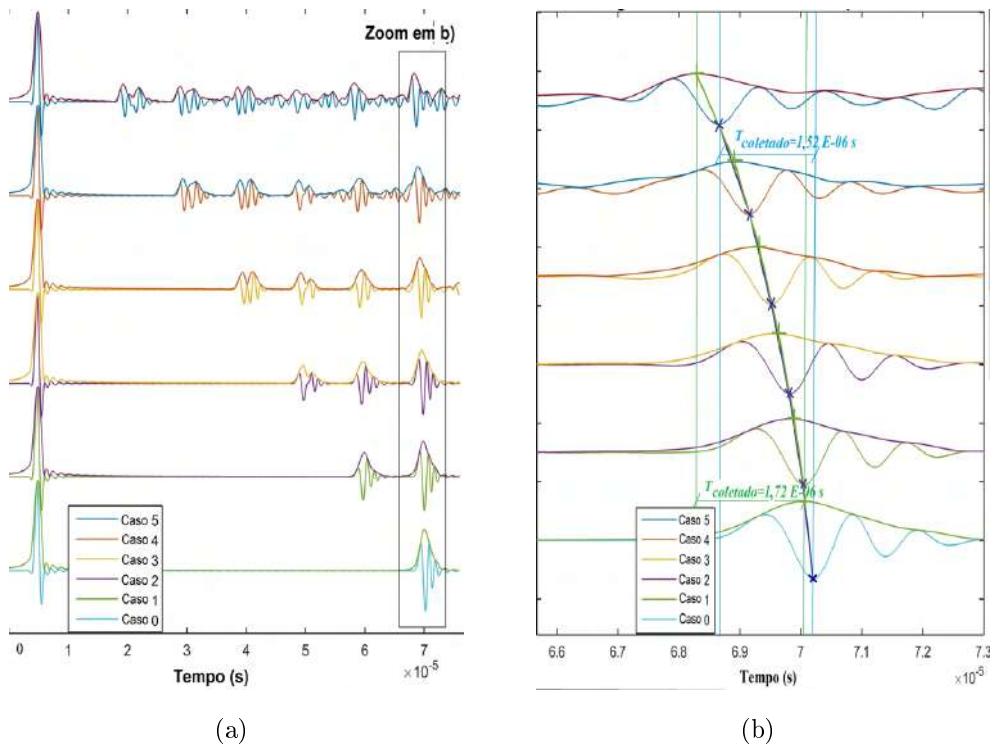


Figura 4.18: Em a) o sinal temporal refletido e capturado em R1 após o *chirp* de 20 e 700 kHz cruzar o modelo 1; em b) Zoom do retângulo indicado em a).

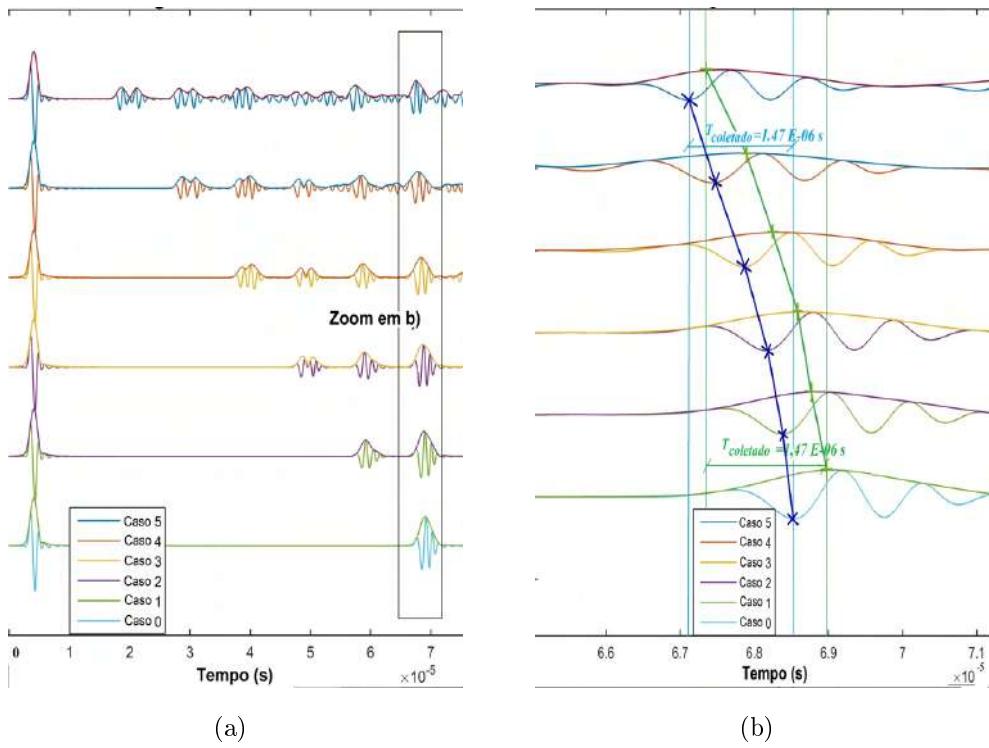


Figura 4.19: Em a) o sinal temporal refletido e capturado em R1 após o tom puro de 500 kHz cruzar o modelo 1; em b) Zoom do retângulo indicado em a).

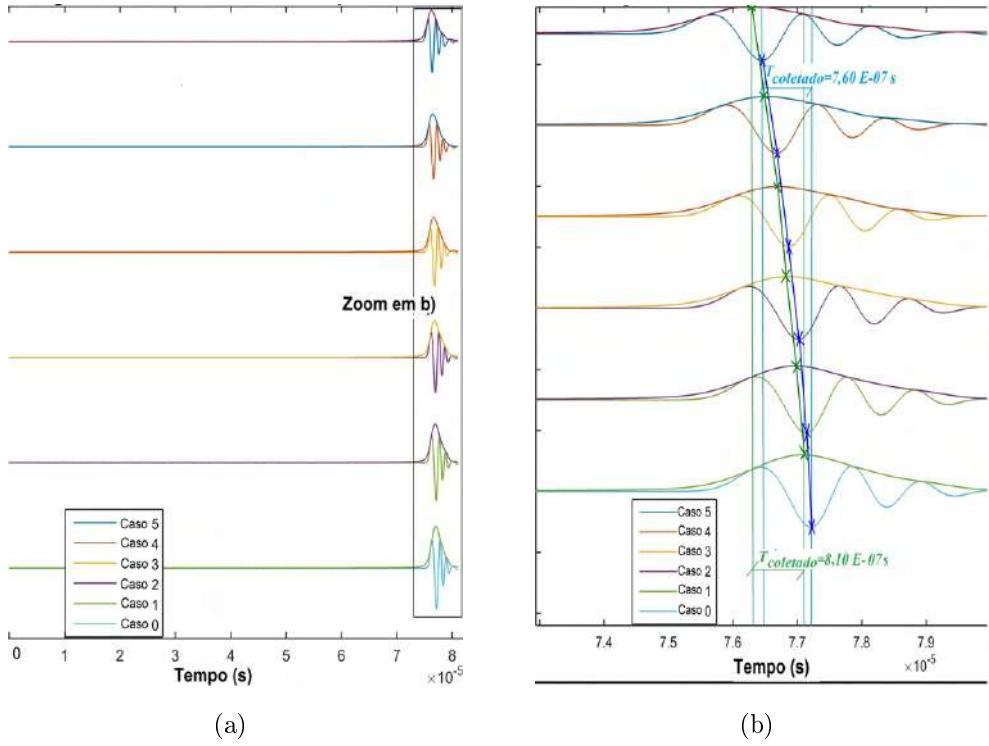


Figura 4.20: Em a) o sinal temporal medido em R2 a partir do *chirp* de 20 a 700 kHz; em b) Zoom do retângulo indicado em a).

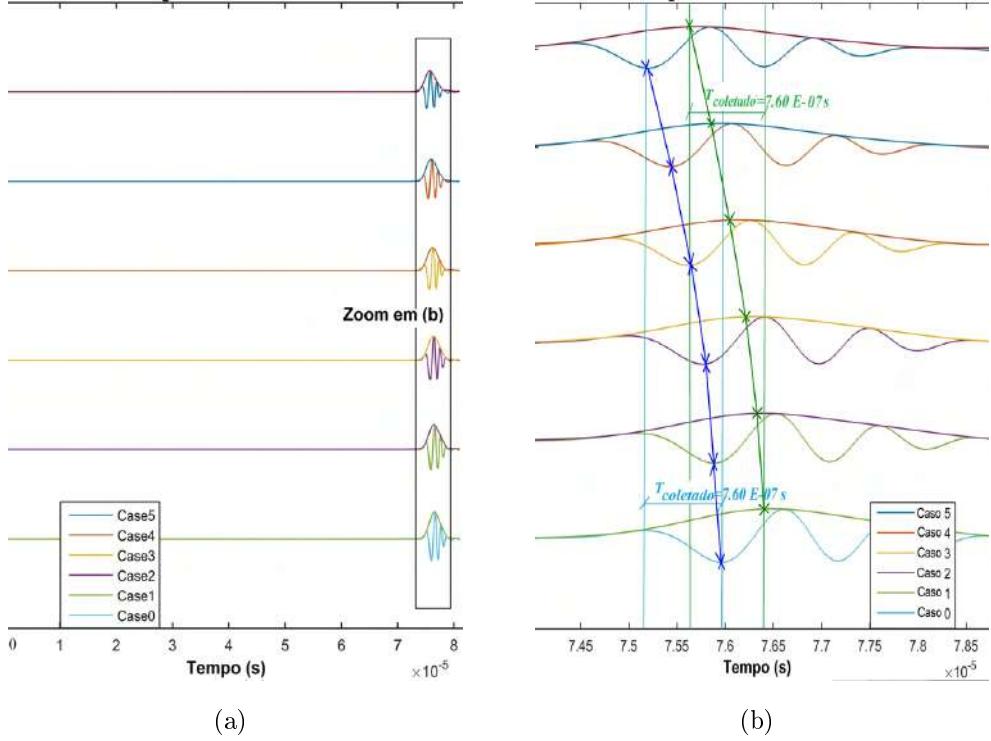


Figura 4.21: Em a) o sinal temporal medido em R2 a partir do tom puro de 500 kHz; em b) zoom do retângulo indicado em a).

Em 4.18 exibe-se a resposta simulada para o *chirp* com frequências de 20 a 750 kHz, após o sinal comprimido por deconvolução. A figura 4.19 mostra a saída no domínio do tempo do *chirp A* gerado pela simulação do modelo 1 usando o método de PE (R1) para os 6 casos descritos empregando um sinal de 500 kHz com um ciclo.

A saída do modelo 1 obtida com o método de PE (R1) empregando *burst* de 500 kHz e um ciclo para todos os casos (0 a 5).

As tabelas 4.6, 4.7 e 4.8 apresentam os tempos de trânsito das simulações para os dados do grupo 3 e os resultados semelhantes com valores teóricos obtidos a partir do erro relativo.

Analizando os resultados, observa-se que os erros relativos foram menores para os pulsos codificados após compressão, utilizando o pico do lóbulo principal como ponto de aquisição e o método de aquisição por transmissão. Embora o método PE tenha levado a pequenos erros relativos nos modelos 1 e 2, é possível inferir que a sobreposição de múltiplas reflexões, comum em meios heterogêneos, tende a prejudicar esta métrica de medição.

Em relação ao método de aquisição após o envelopamento do sinal (Hilbert), os lóbulos laterais foram sobrepostos, comprometendo os resultados. De um modo geral, foram piores do que os obtidos usando o lóbulo principal como métrica de medição.

Na maioria das simulações, foi possível observar que os tons puros empregando

Tabela 4.6: Diferenças nos tempos de trânsito entre o caso 0 e o caso 5 para o modelo 1 do grupo 3 com valores teóricos  $1,52 \mu s$  em R1 e  $0,76 \mu s$  em R2.

Sinais de R1		Frequências [kHz]							
		Tons puros							Chirp LFMP
		50	100	150	300	500	750	1000	20 to 750
Diferença de tempos [us]	Picos no lobo principal	0,8	1,2	1,4	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
	Picos por Hilbert	1,9	1,4	1,7	1,6	1,5	1,6	1,6	1,7
Erro relativo com o valor verdadeiro [%]	Picos no lobo principal	46	20,4	9,8	3,3	3,3	0,04	0,04	0,04
	Picos por Hilbert	23,1	9,8	9,9	3,3	3,3	3,3	7,4	13,2
Sinais de R2		Frequências [kHz]							
		Tons puros							Chirp LFMP
		50	100	150	300	500	750	1000	20 to 750
Diferença de tempos [us]	Picos no lobo principal	0,4	0,6	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
	Picos por Hilbert	0,7	0,9	0,9	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
Erro relativo com o valor verdadeiro [%]	Picos no lobo principal	46	19,7	0,04	0,04	0,04	6,6	0,04	0,04
	Picos por Hilbert	6,5	13,2	13,2	0,04	0,04	0,04	6,6	6,6

Tabela 4.7: Diferenças nos tempos de trânsito entre o caso 0 e o caso 5 para o modelo 2 do grupo 3 com valores teóricos  $-1,96 \mu s$  em R1 e  $-0,983 \mu s$  em R2.

Sinais de R1		Frequências [kHz]								
		Tons puros							Chirp LFMP	
		50	100	150	300	500	750	1000	20 to 750	100 to 750
Diferença de tempos [us]	Picos no lobo principal	-2,0	-2,1	-2,0	-2,1	-2,1	-2,0	-2,0	-2,0	-2,0
	Picos por Hilbert	-1,7	-2,0	-2,0	-2,1	-1,9	-1,7	-1,6	-1,9	-1,9
Erro relativo com o valor verdadeiro [%]	Picos no lobo principal	3,3	5,8	3,3	5,3	5,8	3,3	3,3	0,7	0,7
	Picos por Hilbert	14,6	3,3	0,7	8,3	2,3	12,5	17,6	1,8	1,8
Sinais de R2		Frequências [kHz]								
		Tons puros							Chirp LFMP	
		50	100	150	300	500	750	1000	20 to 750	100 to 750
Diferença de tempos [us]	Picos no lobo principal	-1,3	-1,1	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0
	Picos por Hilbert	-1,0	-0,9	-1,0	-1,1	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0
Erro relativo com o valor verdadeiro [%]	Picos no lobo principal	28,2	8,9	2,3	2,3	2,7	2,7	3,8	2,7	2,7
	Picos por Hilbert	2,7	7,4	1,3	7,8	2,7	2,7	1,3	3,8	3,8

Tabela 4.8: Diferenças nos tempos de trânsito entre o caso 0 e o caso 5 para o modelo 3 do grupo 3 com valores teóricos como  $-1,92 \mu s$  em R1 e  $-0,960 \mu s$  em R2.

Sinais de R1		Frequências [kHz]							
		Tons puros							Chirp LFMP
		50	100	150	300	500	750	1000	20 to 750
Diferença de tempos [us]	Picos no lobo principal	-3,0	-2,3	-2,6	-3,3	-1,9	-1,9	-1,9	-3,3
	Picos por Hilbert	-3,2	-1,3	-2,0	-3,3	-2,4	-2,1	-2,0	-3,8
Erro relativo com o valor verdadeiro [%]	Picos no lobo principal	55,7	21,9	34,4	71,4	0,0	0,5	0,5	69,3
	Picos por Hilbert	64,1	33,9	5,7	71,4	26,6	7,9	5,2	97,9
Sinais de R2		Frequências [kHz]							
		Tons puros							Chirp LFMP
		50	100	150	300	500	750	1000	20 to 750
Diferença de tempos [us]	Picos no lobo principal	-1,6	-1,3	-1,1	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0
	Picos por Hilbert	-1,6	-1,0	-0,9	-0,9	-1,4	-1,4	-1,2	-0,9
Erro relativo com o valor verdadeiro [%]	Picos no lobo principal	63,5	32,3	15,6	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0
	Picos por Hilbert	68,7	0,0	10,4	5,2	41,7	36,5	27,1	4,2

frequências abaixo de 150 kHz proporcionaram maiores tempos de trânsito quando comparados às altas frequências referentes aos valores teóricos. Este fato possivelmente está relacionado à capacidade inferior de resolução destas freqüências em relação às demais. Para essas simulações, para as quais foram consideradas apenas três fases do material, foi possível observar que as frequências mais baixas (comprimento de onda superior e menor resolução) foram mais afetadas que as maiores.

É importante observar que a diferença percentual significativa nos valores de ER de frequência mais baixa em relação à frequência mais alta e aos pulsos codificados não reflete diretamente erros em suas leituras, mas sua capacidade de resolver em frequências mais baixas nesses cenários. Como já mencionado, eles foram influenciados por sobreposição de sinais decorrentes da interferência de múltiplos sinais. Além disso, como os tempos de trânsito de referência eram da ordem da magnitude das diferenças nos tempos medidos, algumas porcentagens eram superiores a 50 %.

#### 4.3.2 Resultados 2D - Grupo único

Para a modelagem 2D, as imagens exibidas na figura 4.22 são instantâneos (em inglês *snapshots*) das simulações, em que a) e b) correspondem a um ciclo de tom puro centrado em 500 kHz; e c) e d) ao LFMP de 100 a 750 kHz. Esses instantâneos foram obtidos no modelo 1 usando um sinal fonte correspondente a um monopolo localizado em  $x = 0$  (vertical) e  $y = 150$  mm (horizontal) (borda entre a peça de trabalho de concreto de 30 cm x 46 cm).

Os instantâneos mostrados nas figuras 4.22a e 4.22c correspondem ao caso 0, em que apenas uma barra de aço foi colocada no centro. É possível visualizar a primeira reflexão e reverberações (múltiplas) que ocorreram dentro da barra. As figuras 4.22b e 4.22d foram obtidas a partir do cenário do caso 5. É possível observar as reflexões nos elementos pequenos e na barra quadrada de aço. Além disso, é possível ver que as reflexões se originaram do LFMP antes das compressões terem baixa resolução. Para todos os modelos, é possível observar uma alteração na onda frontal devido às velocidades superiores dos elementos de menores dimensões e da barra de aço.

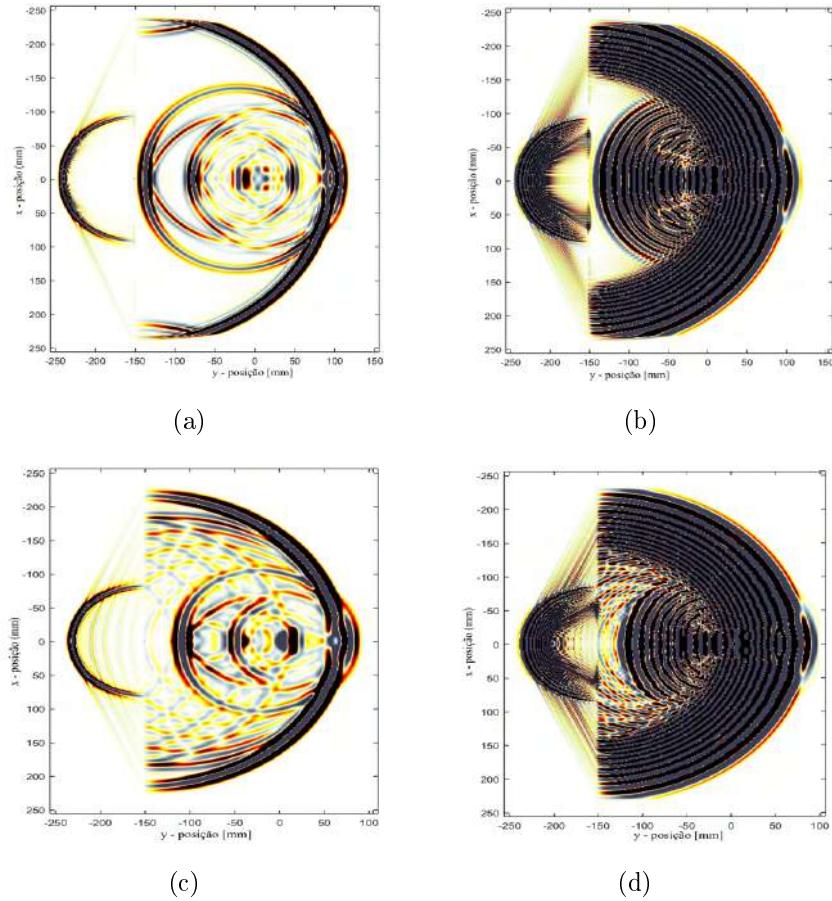


Figura 4.22: Instantâneos do modelo 1 empregando tons puros de 500 kHz. Em a) para o caso 0 (apenas barra de aço); b) para o caso 5 (barra de aço mais 5 elementos quadrados); c) para o caso 0 (apenas barra de aço) usando LFMP com uma faixa de 100 kHz a 750 kHz sem compressão por deconvolução); e d) para o caso 5 (barra de aço mais 5 elementos quadrados).

## 4.4 Resultados dos experimentos ultrassônicos

A seguir serão apresentados os resultados dos experimentos ultrassônicos em amostra de CPR e em amostras de alumínio.

### 4.4.1 Ensaios no CPR para comparação da resposta dos sinais de excitação

A figura 4.23 mostra os resultados experimentais para sinais de excitação dos *chirps* e tons puros. Representações de domínios de tempo e frequência são apresentadas para os tons puros de frequências de 100 kHz, 300 kHz e 500 kHz e do *chirp*. Para cada um dos sinais, foram medidos e registrados 5 sinais.

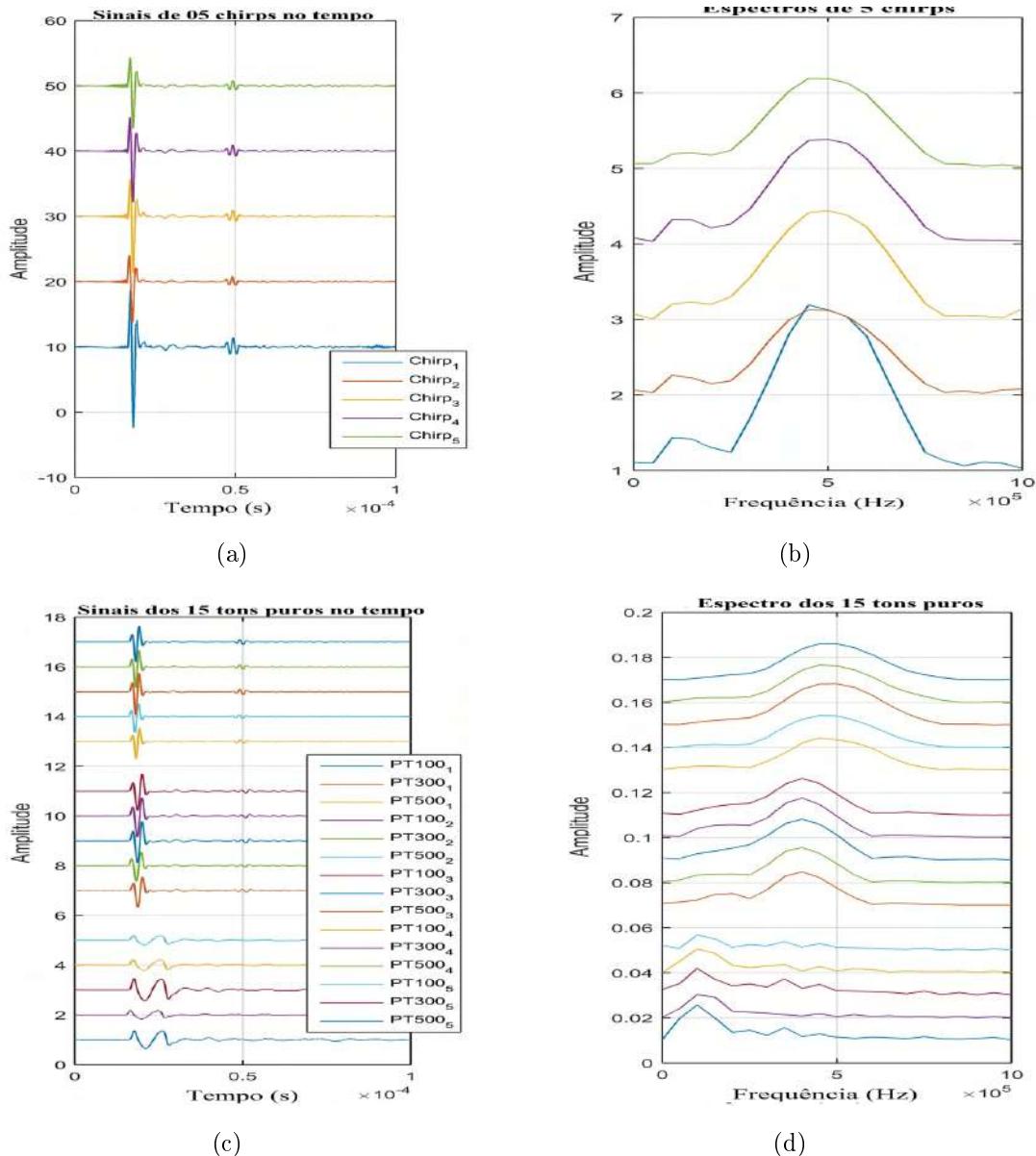


Figura 4.23: a) Sinais temporais medidas da resposta da excitação por *chirp* na amostra CRC; b) respectivos espectros de frequência a partir do janelamento do primeiro sinal recebido para cada uma das 5 aquisições. Em c) e d) são as mesmas representações para os tons puros nas frequências de 100 kHz, 300 kHz e 500 kHz.

É preciso mencionar que, para representar todos os sinais no domínio do tempo ou da frequência no mesmo gráfico, foi adicionado um deslocamento vertical para cada sinal. A maior amplitude apresentada pelo *chirp* em comparação com os tons puros indica que ele fornece uma melhor resposta em termos de disponibilidade de energia.

As tabelas 4.9 e 4.10 mostram os tempos de trânsito e amplitudes antes e após a aplicação do filtro passa-banda. Além disso, os desvios padrões para o tempo de trânsito para cada frequência são apresentados. Para os sinais de tom puro de 100

Tabela 4.9: Amplitudes absolutas, tempos instantâneos, tempos de trânsito e desvios padrões para cada sinal de excitação antes do filtro, em amostra CPR.

	Transmissão direta		1 <sup>a</sup> reflexão		\ t [us]	Desvios padrões dos tempos [us]
	Tempo [us]	Amplitude [mV]	Tempo [us]	Amplitude [mV]		
Chirp_1	26,63	14,31	57,68	1,79	31,05	0,038
Chirp_2	25,87	7,21	56,95	1,03	31,08	
Chirp_3	26,18	10,19	57,16	1,21	30,98	
Chirp_4	26,10	9,06	57,11	1,16	31,01	
Chirp_5	26,37	7,53	57,41	0,95	31,04	
PT-300 kHz_1	18,51	0,75	50,76	0,10	32,25	0,057
PT-300 kHz_2	18,17	0,70	50,38	0,08	32,21	
PT-300 kHz_3	18,49	0,99	50,59	0,11	32,10	
PT-300 kHz_4	18,44	0,93	50,60	0,11	32,16	
PT-300 kHz_5	18,50	0,86	50,70	0,10	32,20	
PT-500 kHz_1	18,10	0,83	49,23	0,13	31,93	0,071
PT-500 kHz_2	17,80	0,77	49,79	0,11	31,99	
PT-500 kHz_3	18,05	1,13	49,88	0,14	31,83	
PT-500 kHz_4	17,98	1,02	49,86	0,13	31,88	
PT-500 kHz_5	18,01	0,95	49,83	0,13	31,82	

kHz, não foi possível identificar a primeira reflexão, como pode ser visualizado no respectivo sinal da figura 4.23. Para os outros sinais o tempo de trânsito foi avaliado como a diferença ( $\delta t$ ) entre o instante do sinal direto e da primeira reflexão.

Observou-se que o desvio padrão dos tempos de trânsito foi menor para o *chirp* tanto antes como após a aplicação do filtro passa-banda (Butterworth de ordem 1, de 50 kHz a 700 kHz), se comparado aos tons puros. Comparando os tons puros de 300 kHz e 500 kHz, o primeiro apresentou maior variação dos resultados antes do filtro, mas menor após. Aparentemente, algum ruído de alta frequência (maior que 700 kHz) ou de baixa frequência (menos de 50 kHz) estava presente no sinal adquirido de 300 kHz, o que comprometia a avaliação do tempo de trânsito. Ou seja, para conclusões mais aprofundadas demandaria um estudo focado nos efeitos dos filtros de frequência e que não pertencia aos objetivos deste trabalho.

Além disso, como as amplitudes do *chirp* eram maiores que as do tom puro, pode-se inferir que é um sinal de excitação melhor para interrogar materiais heterogêneos, como CPR, por exemplo. Os tempos médios de trânsito para os *chirps*, tons puros de 300 kHz e 500 kHz foram, respectivamente, 31,014  $\mu s$ , 32,882  $\mu s$  e 32,468  $\mu s$  (para sinais filtrados).

Vale ressaltar que o *chirp* comprimido possui, teoricamente, todo o espectro de frequência, embora em termos experimentais dependerá da largura de banda

Tabela 4.10: Amplitudes absolutas, tempos instantâneos, tempos de trânsito e desvios padrões para cada sinal de excitação após o filtro, em amostra CPR.

	Transmissão direta		1 <sup>a</sup> reflexão		Tempo de trânsito	Desvios padrões dos tempos [us]
	Tempo [us]	Amplitude [mV]	Tempo [us]	Amplitude [mV]	\ t [us]	
Chirp_1	18,30	12,41	49,34	1,42	31,04	0,0305
Chirp_2	18,00	6,20	49,05	0,80	31,05	
Chirp_3	18,24	8,73	49,22	0,98	30,98	
Chirp_4	18,18	7,84	49,17	0,93	31,01	
Chirp_5	18,21	6,52	49,22	0,79	31,01	
PT-300 kHz_1	18,81	0,67	51,73	0,07	32,92	0,0502
PT-300 kHz_2	18,38	0,64	51,33	0,07	32,95	
PT-300 kHz_3	18,70	0,90	51,56	0,09	32,86	
PT-300 kHz_4	18,64	0,84	51,48	0,88	32,84	
PT-300 kHz_5	18,71	0,78	51,55	0,08	32,84	
PT-500 kHz_1	18,34	0,83	49,23	0,13	31,93	0,0432
PT-500 kHz_2	18,00	0,77	49,79	0,11	31,99	
PT-500 kHz_3	18,22	1,13	49,88	0,14	31,83	
PT-500 kHz_4	18,17	1,02	49,86	0,13	31,88	
PT-500 kHz_5	18,20	0,95	49,83	0,13	31,82	

de frequência dos transdutores empregados. Ou seja, as variações nos tempos de trânsito, embora pequenas, para as diferentes frequências testadas podem estar relacionadas à melhor resolução temporal das altas freqüências.

#### 4.4.2 Ensaios em alumínio para determinação do CRC

As figuras 4.24 e 4.25 exibem a resposta temporal para os blocos de alumínio de 40 mme 70 mm, respectivamente.

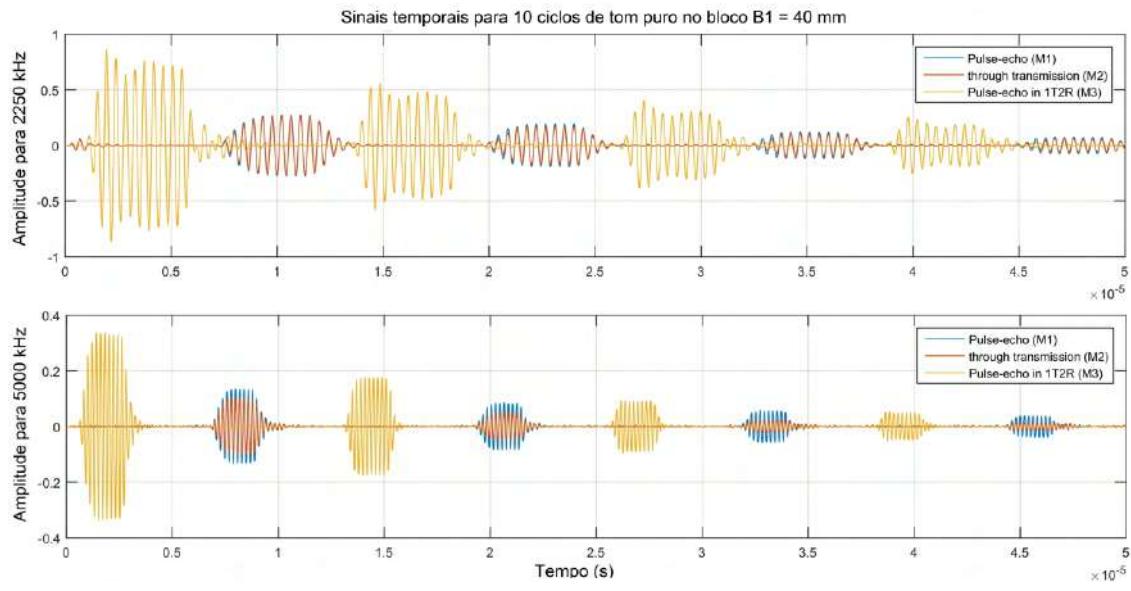


Figura 4.24: Sinais temporais dos três métodos empregados no bloco de alumínio com espessura em torno de  $B1=40$  mm seguindo as frequências indicadas.

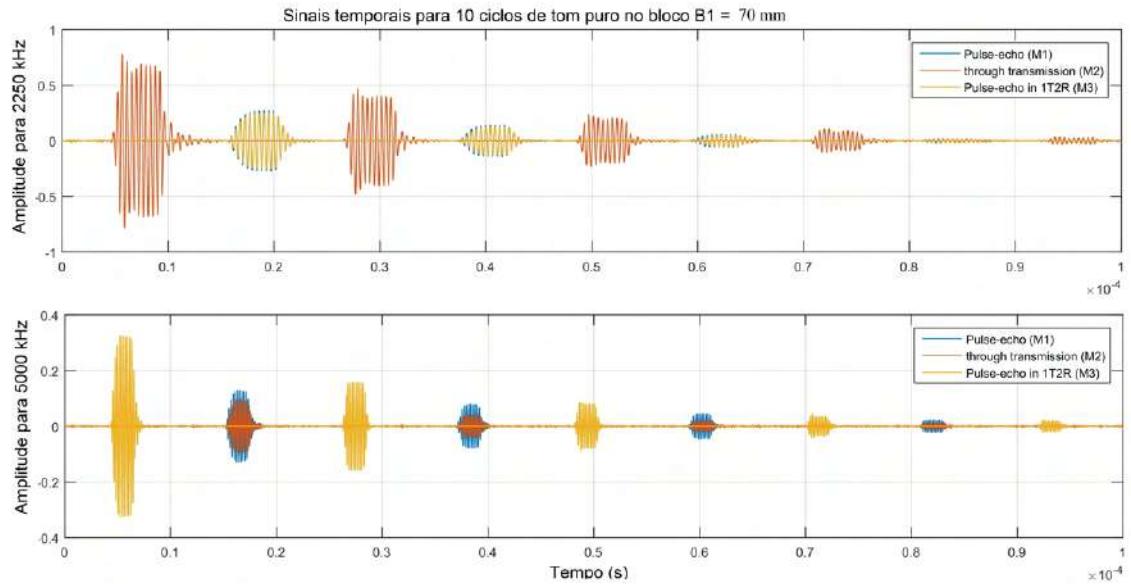


Figura 4.25: Sinais temporais dos três métodos empregados no bloco de alumínio com espessura em torno de  $B1=70$  mm seguindo as frequências indicadas.

Por outro lado, as figuras 4.26 e 4.27 exibem os espectros de frequência dos sinais temporais para cada um dos blocos.

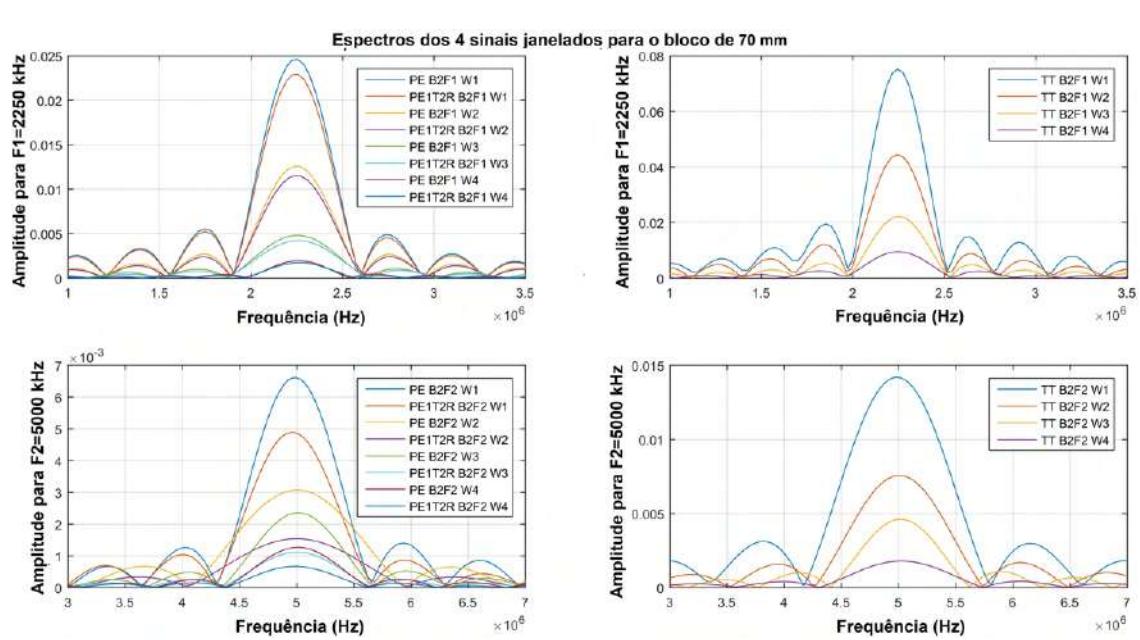
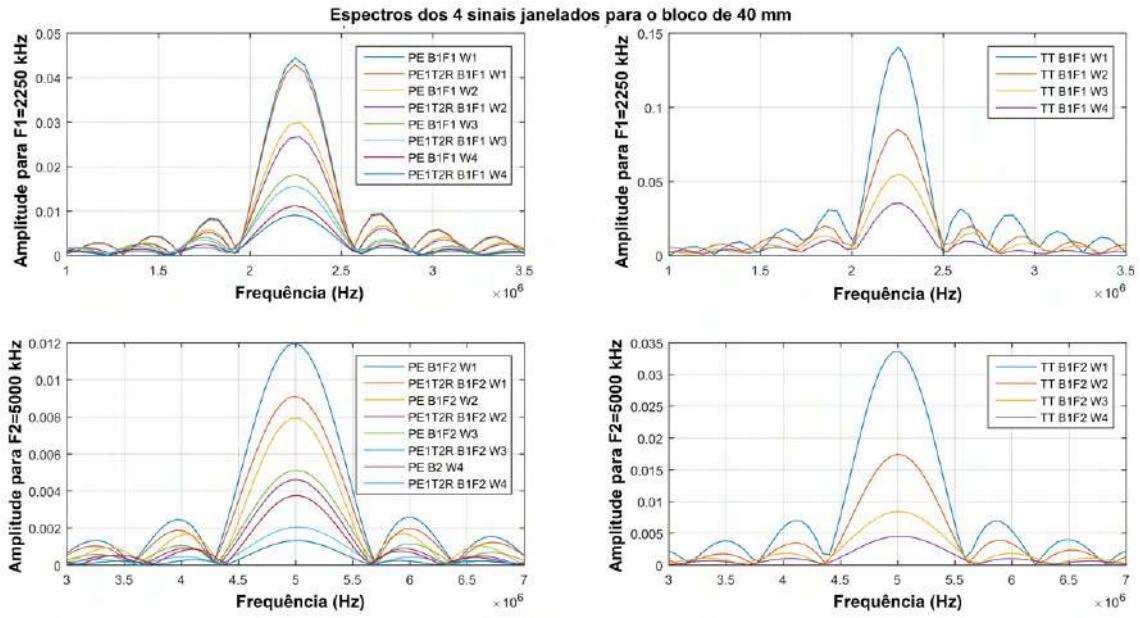


Figura 4.26: Espectro de frequência (FFT) para cada um dos quatro sinais de tempo janelados para os três métodos utilizados nas simulações no bloco com espessura em torno de  $B_1=40$  mm seguindo as frequências indicadas.

As tabelas 4.11 e 4.12 apresentam os valores calculados para o CRC segundo a abordagem apresentada neste trabalho, para cada um dos quatro sinais janelados, valor médio e respectivo desvio para cada bloco e frequência.

Tabela 4.11: Percentuais de CRC nas amostras de alumínio no domínio temporal.

Valores calculados para as frequências F1 (2,25 MHz) e F2 (5,0 MHz)						
CRC no domínio do tempo						
	W1	W2	W3	W4	Valor médio	Desvio padrão
B1_F1	96,8%	94,6%	97,1%	96,0%	96,1%	1,3%
B1_F2	76,3%	77,2%	73,5%	79,4%	76,6%	1,9%
B2_F1	92,8%	96,0%	97,0%	97,9%	95,3%	2,2%
B2_F2	76,3%	72,3%	77,6%	85,4%	77,9%	2,8%

Tabela 4.12: Percentuais de CRC nas amostras de alumínio no domínio da frequência.

Valores calculados para as frequências F1 (2,25 MHz) e F2 (5,0 MHz)						
CRC no domínio da frequência						
	W1	W2	W3	W4	Valor médio	Desvio padrão
B1_F1	96,5%	94,6%	95,1%	95,2%	95,4%	1,0%
B1_F2	76,2%	76,5%	73,4%	76,9%	75,4%	1,7%
B2_F1	93,8%	95,8%	96,0%	97,7%	95,2%	1,2%
B2_F2	74,2%	71,9%	77,9%	86,2%	77,5%	3,0%

Os dados experimentais apresentados demonstram consistência nos valores encontrados, inclusive com baixos valores de desvio padrão, tanto no domínio do tempo com no da frequência. Ou seja, assim como nos dados simulados, os dados experimentais validaram as expressões para determinação do CRC.

Foi possível perceber que para a maior frequência o CRC foi menor. Isso pode estar relacionado com a dependência do CRC no comprimento de onda e espessura do camada de acoplamento. No entanto, avaliações desta natureza demandarão estudos futuros com este foco.

Na sequência foram apresentados nas tabelas 4.13 e 4.14 os valores calculados para a atenuação acústica seguindo a expressão da norma IEC-63081 (2019) em confronto com os resultados da equação desenvolvida neste estudo. Vale ressaltar que as amplitudes usadas para os cálculos foram de valores absolutos do método PE e que tanto na equação da norma como na abordagem apresentada nesta pesquisa, estas expressões são simplificações e somente válidas para materiais de baixa perda (DOURADO *et al.*, 2022).

A partir dos dados destas tabelas, observou-se que os valores apresentados pela equação desenvolvida nesta tese foram consistentemente mais baixos do que os da

Tabela 4.13: Valores calculados dos coeficientes de atenuação para experimentos com blocos B1 (40 mm) e B2 (70 mm) nas frequências F1 (2,25 MHz) e F2 (5 MHz), a partir do método de PE.

Atenuação ( $\alpha$ ) a partir das amplitudes no domínio do tempo [dB cm $^{-1}$ ]					
	W1/W2	W2/W3	W3/W4	Valor médio	Desvio padrão
B1_F1 (IEC 63081)	0,90	1,20	1,18	1,09	17%
B1_F1 (Esta tese)	0,80	1,10	1,08	0,99	17%
B1_F2 (IEC 63081)	1,14	1,00	0,98	1,04	9%
B1_F2 (Esta tese)	0,47	0,33	0,31	0,37	9%
B2_F1(IEC 63081)	1,65	2,27	2,60	2,18	48%
B2_F1(Esta tese)	1,55	2,17	2,50	2,07	48%
B2_F2(IEC 63081)	0,68	0,80	0,97	0,81	14%
B2_F2(Esta tese)	0,32	0,44	0,61	0,46	14%

Tabela 4.14: Valores calculados dos coeficientes de atenuação para experimentos com blocos B1 (40 mm) e B2 (70 mm) nas frequências F1 (2,25 MHz) e F2 (5 MHz), a partir do método de PE.

Atenuação ( $\alpha$ ) a partir das amplitudes no domínio da frequência [dB cm $^{-1}$ ]					
	W1/W2	W2/W3	W3/W4	Valor médio	Desvio padrão
B1_F1 (IEC 63081)	1,21	1,36	1,46	1,34	13%
B1_F1 (Esta tese)	1,09	1,24	1,34	1,22	13%
B1_F2 (IEC 63081)	1,90	2,38	0,96	1,75	72%
B1_F2 (Esta tese)	1,21	1,69	0,26	1,05	72%
B2_F1(IEC 63081)	1,04	1,39	1,43	1,29	21%
B2_F1(Esta tese)	0,98	1,33	1,37	1,23	21%
B2_F2(IEC 63081)	1,19	0,80	1,43	1,14	32%
B2_F2(Esta tese)	0,82	0,43	0,43	0,56	23%

referida norma. Para esta análise comparativa entre expressões este comportamento é uma informação relevante.

No entanto, ao avaliar as diferenças nos valores de atenuação acústica para sucessivos múltiplos ecos que ocorreram para ambas expressões, pode-se suspeitar que as amostras utilizadas não possuem uma atenuação tão baixa e/ou regular entre si como esperada para este tipo de material e como requerido para estes tipos de equações, conforme mencionado no parágrafo anterior (DOURADO *et al.*, 2022).

# Capítulo 5

## Discussões

A partir dos resultados desta pesquisa apresentados no capítulo anterior serão feitas discussões complementares.

A apresentação dos principais fatores influenciadores da propagação acústica no concreto na forma de um quadro, além de auxiliar no entendimento do comportamento de sinais ultrassônicos, pode servir de base para a montagem de um *check-list* para operadores e técnicos.

Por meio de simulações acústicas em modelos que mimetizassem a geometria e características físicas de meios cimentícios foi possível constatar a superioridade em termos de exatidão e precisão dos pulsos codificados em comparação aos tons puros. Estas análises foram feitas qualitativamente (somente comparando a resolução do sinais A-SCAN) e quantitativamente (comparando os erros relativos).

Nos experimentos ultrassônicos foi possível verificar a superior capacidade dos sinais codificados como excitação ultrassônica em amostras de concreto.

Considerando as aplicações de UC foi apresentada uma abordagem em que a camada de proteção do transdutor, o acoplante e o material formam um sistema multicamada em que o conceito de coeficiente de reflexão foi ampliado como um coeficiente de reflexão combinado.

A partir do uso combinado dos dois métodos mais empregados em ultrassom foi possível apresentar e utilizar um novo arranjo. Este novo arranjo permitiu que fossem desenvolvidas expressões de decaimento da amplitude ao longo da propagação para cada um dos métodos. Adicionalmente, foram descritos os procedimentos para medição das amplitudes e cálculo do CRC. Na sequência, foi possível efetuar o desenvolvimento de equações que relacionam a energia dos sinais acústicos e os principais responsáveis pelas perdas da energia dos sinais. As equações finais foram testadas por meio de modelos numéricos e experimentos em amostras de alumínio que confirmaram a sua validade.

Os resultados desta pesquisa revelaram equações que em suas versões simplificadas permitem uma estimativa da atenuação acústica em meios de baixa perda. A

referida abordagem pode ser útil quando somente se dispõe de amostra única e não é possível executar ensaios ultrassônicos de imersão. A expressão apresentada difere da IEC-63081 (2019), em que acredita-se que esta norma poderá receber contribuições deste trabalho. Além disso, vale ressaltar que a nova formulação também difere da proposta por BIRKS (1991), que na época chegou à inclusão de  $\sqrt{R}$  (raiz de um coeficiente de reflexão) multiplicando a razão entre as duas primeiras amplitudes seguindo o método de PE, enquanto que aqui se concluiu que deve se multiplicar pelo CRC.

# Capítulo 6

## Conclusões

A partir das simulações computacionais, experimentos e desenvolvimento matemático para se chegar às equações apresentadas nesta pesquisa foi possível constatar que:

Foi possível classificar os principais fatores influenciadores da propagação ultrassônica em materiais cimentícios.

A partir do uso combinado dos métodos clássicos conclui-se que o novo método (*1T2R*) é útil para ultrassom de contato, uma vez que possibilitou extrapolar o conceito de coeficiente de reflexão como CRC, permitindo não somente estimar o seu valor como apresentar expressões da atenuação acústica para meios de baixa perda.

Os sistemas ultrassônicos excitados com pulsos modulados em frequências linear de banda larga fornecem tempos de trânsito estatisticamente equivalentes ou mais precisos do que os adquiridos quando excitados por tons puros centrados em frequências entre os valores dos limites da banda.

Foi possível constatar que o método da transmissão direta fornece resultados mais precisos do que o método de pulso-eco na determinação do tempo de trânsito do sinal ultrassônico em meios cimentícios. Isto ocorre principalmente porque no método de pulso-eco os efeitos de interferência destrutiva e construtiva dificultam a correta identificação dos picos no sinal medido.

Comparando as duas métricas de medição, ou seja, obtenção dos picos a partir do lobo principal e pela seleção do pico do envelope após aplicação da transformada de Hilbert, a primeira apresentou resultados mais precisos.

Outra conclusão a que esta pesquisa chegou é a importância de se vincular qualquer declaração de tempo, velocidade, atenuação ou qualquer outra propriedade acústica ao conteúdo de frequência do sinal de excitação empregado.

Foi possível criar um aparato experimental, através da impressão 3D combinado a parafusos e porcas em aço, o qual permitiu garantir o alinhamento e força de contato entre transdutores e amostras.

Por fim apresenta-se a seguir possíveis contribuições ao estado da arte bem como em normas.

## 6.1 Contribuições da pesquisa para o estado da arte e normas

Os resultados apresentados neste trabalho indicam que os pulsos codificados podem produzir informações com maior precisão e exatidão do que os tradicionais tons puros em medições ultrassônicas em materiais cimentícios. No entanto, embora a norma IEC-63081 (2019) já mencione a sua aplicação, a indústria ainda utiliza muito pouco este recurso. Por outro lado, como os resultados desta pesquisa corroboram com os que a literatura já tem demonstrado, a expectativa é que o emprego deste tipo de sinal determinístico seja expandido nos próximos anos.

Outra contribuição que este trabalho pode fornecer a normas relacionadas a ultrassom, é recomendar que em conjunto a toda declaração de tempo de trânsito, velocidade, atenuação ou qualquer outra propriedade acústica, sempre também seja declarado o tipo de sinal empregado e respectivas frequências nele contidas, principalmente quando se tratar de materiais com caráter heterogêneo, os quais podem reservar comportamento dispersivo da frente de onda. Esta premissa minimizará discrepâncias ocasionadas pela propagação dispersiva entre diferentes medições realizadas em meios onde este tipo propagação ocorre.

Com relação à apresentação do novo arranjo de medição que combina os métodos clássicos de PE e TT, espera-se que os resultados e discussões desta pesquisa possam fornecer contribuições para normas de acústica, como é o caso da IEC-63081 (2019). Acredita-se que o conceito de CRC e o protocolo para o seu cálculo possam ser inseridos no corpo do documento. E caso esta inclusão seja efetivada, recomenda-se também incluir as equações para estimativa do valor de atenuação acústica para meios de baixa perda.

Adicionalmente, a proposta de usar um sistema de alinhamento e fixação dos transdutores às amostras poderá se desdobrar na delimitação dos limites de força de contato e consequentemente da pressão a ser imposta nos transdutores. Vale ressaltar que este tipo de informação não aparece em normas, tendo somente sido identificada em trabalhos de ultrassom em madeira, por meio da informação da força de contato aproximada aplicada durante o ensaio.

# Referências Bibliográficas

- ABNT-NBR-6118, 2014, *Projeto de estruturas de concreto — Procedimento*. Standard, ABNT — Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo, Brasil, mai.
- ABNT-NBR-8802, 2013, *Concreto endurecido — Determinação da velocidade de propagação da onda ultrassônica*. Standard, ABNT — Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo, Brasil, fev.
- ABNTNBR-7211, 2019, *Agregados para concreto — Especificação*. Standard, ABNT — Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo, Brasil, mar.
- ALI, M. B., SAIDUR, R., HOSSAIN, M. S., 2011, “A review on emission analysis in cement industries”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 15, n. 5, pp. 2252 – 2261. ISSN: 1364-0321. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.02.014>. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032111000566>>.
- ANDREUCCI, R., 2014, *Ensaio não destrutivo por ultrassom*. Abendi.
- ASTM-C-597-16, 2016, *Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete*. Standard, ASTM International, West Conshohocken, PA - USA.
- BERRIMAN, J. R. S., 2004, *The application of air-coupled ultrasonic systems and signal processing to the interrogation of concrete*. Tese de d.sc., University of Warwick, Birmingham, UK, September. Disponível em: <<http://wrap.warwick.ac.uk/2637/>>.
- BHUSARI, J., 2017, “A State of the Art Report on Ultra High Performance Concrete: Reactive Powder Concrete”. v. 07.
- BIRKS, A. S., 1991, *Ultrasonic Testing (Nondestructive Testing Handbook)*. Paul McIntire.

- BOSSMANN, F., PLONKA, G., PETER, T., et al., 2012, "Sparse Deconvolution Methods for Ultrasonic NDT", *Journal of Nondestructive Evaluation*, v. 31, n. 3 (Sep), pp. 225–244. ISSN: 1573-4862. doi: 10.1007/s10921-012-0138-8. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10921-012-0138-8>>.
- BS-1881-PART203, 1991, *Recommendations for measurement of velocity of ultrasonic pulses in concrete*. Standard, International Organization for Standardization, London, United Kingdom, aug.
- BS-EN-12504-21, 2021, *Testing concrete. Determination of ultrasonic pulse velocity*. Standard, British Standard, London, United Kingdom, jan.
- BS-EN-12504-4, 2004, *Testing concrete. Determination of ultrasonic pulse velocity*. Standard, British Standard, London, United Kingdom, oct.
- BS-EN-ISO-2400, 2012, *Non-destructive testing. Ultrasonic testing. Specification for calibration block № 1*. Standard, International Organization for Standardization, Geneve, Switzerland, oct.
- CERVENY, V., 2001, *Seismic Ray Theory*. Cambridge University press.
- CHANG, Y., LEE, C., 2004, "Pulse compression technique applied to ultrasonic nondestructive testing of concrete", *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, v. 27, n. 2, pp. 187–192. doi: 10.1080/02533839.2004.9670863. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/02533839.2004.9670863>>.
- CHIAO, R., H.-X., 2005, "Coded excitation for diagnostic ultrasound: a system developer's perspective", *Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, IEEE Transactions*, v. 52, pp. 160–170.
- COOK, C. E., BERNFELD, M., 1967, *Radar signals: An introduction to theory and application*. New York, Academic Press.
- COSTA-FELIX, R. P. B. D., MACHADO, J. C., 2015, "Output bandwidth enhancement of a pulsed ultrasound system using a flat envelope and compensated frequency-modulated input signal: Theory and experimental applications", *Measurement*, v. 69, pp. 146 – 154. ISSN: 0263-2241. doi: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.03.019>. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224115001657>>.

- COSTA-FELIX, R., MACHADO, J., 2018, “Output bandwidth enhancement of a pulsed ultrasound system using a flat envelope and compensated frequency-modulated input signal”, *Measurement*, v. 69, pp. 146–154. doi: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.03.019>.
- COSTA-FÉLIX, R. P. B. D., 2005, *Aplicações metrológicas do ultrassom empregado em engenharia biomédica utilizando varreduras de senos (chirps)*. Tese de d.sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- COURLAND, R., 2011, *Concrete Planet: The Strange and Fascinating Story of the World's Most Common Man-made Material*. Prometheus Books. ISBN: 9781616144814. Disponível em: <<https://books.google.com.au/books?id=KPkiKQEACAAJ>>.
- DANTAS, T.M.; COSTA-FELIX, R., MACHADO, J., 2018, “Nonlinear frequency modulated excitation signal and modified compressing filter for improved range resolution and side lobe level of ultrasound echoes”, *Applied Acoustics*, v. 130, pp. 238–246.
- DANTAS, T. M., 2011, *Equalização da Resposta de um Sistema Ultrassônico Pulso Eco pela Modulação Não Linear em Fase do Sinal de Excitação*. Tese de d.sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- DOURADO, T., ALVARENGA, A., PETERS, F., et al., 2022, “Simultaneous use of pulse-echo and through-transmission methods in determining a combined reflection coefficient”, *Applied Acoustics*, v. 192, pp. 108700. ISSN: 0003-682X. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2022.108700>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0003682X22000743>>.
- ELIAS, C. M., 1980, “An Ultrasonic Pseudorandom Signal-Correlation System”, *IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics*, v. 27, n. 1 (Jan), pp. 1–6. ISSN: 0018-9537. doi: [10.1109/T-SU.1980.31136](https://doi.org/10.1109/T-SU.1980.31136).
- FIRESTONE, F. A., 1942, “Flaw detecting device and measuring instrument”, (Apr). Disponível em: <<https://www.google.com/patents/US2280226>>. US Patent 2,280,226.
- FURGASON, E. S.; NEWHOUSE, V. L. B. N. M., COOPER, G. R., 1975, “Application of random signal correlation techniques to ultrasonic flaw detection”, *Ultrasonics*, v. 13, n. 1, pp. 11 – 17. ISSN: 0041-624X. doi: [https://doi.org/10.1016/0041-624X\(75\)90017-7](https://doi.org/10.1016/0041-624X(75)90017-7). Disponível em: <[http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0041624X75900177](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0041624X75900177)>.

- GOSS, S.A.; FRIZZELL, L., DUNN, F., 1979, "Ultrasonic absorption and attenuation in mammalian tissues", *Ultrasound in Medicine and Biology*, v. 5, n. 2, pp. 181 – 186. ISSN: 0301-5629. doi: [https://doi.org/10.1016/0301-5629\(79\)90086-3](https://doi.org/10.1016/0301-5629(79)90086-3). Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0301562979900863>>.
- GUM, 2008, *Guia Para Expressão de Incerteza de Medição – GUM*, 1a ed. Brasileira, Rio de Janeiro. INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA, Rio de Janeiro, Brasil.
- HAIDER, B.; LEWIN, P. A., THOMENIUS, K. E., 1998, "Pulse elongation and deconvolution filtering for medical ultrasonic imaging", *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, v. 45, n. 1 (Jan), pp. 98–113. ISSN: 0885-3010.
- HARPUT, S., 2012, *Use of Chirps in Medical Ultrasound Imaging*. Tese de d.sc., University of Leeds, Leeds, West Yorkshire, Reino Unido.
- HARRIS, F. J., 1978, "On the use of windows for harmonic analysis with the discrete Fourier transform", *Proceedings of the IEEE*, v. 66, n. 1 (Jan), pp. 51–83. ISSN: 0018-9219. doi: 10.1109/PROC.1978.10837.
- IEA-2018, 2018, *Technology Roadmap - Low-Carbon Transition in the Cement Industry*. Report, IEA - International Energy Agency, Paris, France.
- IEC-63081, 2019, *Ultrasonics - Methods for the characterization of the ultrasonic properties of materials*. Standard, International Electrotechnical Commission, London, United Kingdom, dez.
- ISO-1920, 2020, *Non-destructive tests on hardened concrete*. Standard, British Standards Institution, Switzerland, jan.
- KEAREY, P., BROOKS, M., HILL, I., 2009, *Geofísica de exploração*. Oficina de Textos. ISBN: 9788586238918. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=j2GNQAAACAAJ>>.
- KIM, Y. H., SONG, S. J., KIM, J. Y., 2004, "A new technique for the identification of ultrasonic flaw signals using deconvolution", *Ultrasonics*, v. 41, n. 10, pp. 799 – 804. ISSN: 0041-624X. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2004.01.100>. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0041624X04001234>>.

- KIM, Y. H., SONG, S.-J., LEE, S.-S., et al., 2002, "A Study of the Couplant Effects on Contact Ultrasonic Testing", *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, v. 22, pp. 621–626.
- KINO, G. S., 1987, *Acoustic waves: devices, imaging, and analog signal processing*. Prentice-Hall Signal Processing Series. Prentice Hall PTR. ISBN: 9780130030474. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=hcsYAQAAIAAJ>>.
- KOMLOS, K., POPOVICS, S., NARNBERGEROVA, T., et al., 1996, "Ultrasonic pulse velocity test of concrete properties as specified in various standards", *Cement and Concrete Composites*, v. 18, n. 5, pp. 357 – 364. ISSN: 0958-9465. doi: [https://doi.org/10.1016/0958-9465\(96\)00026-1](https://doi.org/10.1016/0958-9465(96)00026-1). Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0958946596000261>>.
- KRAUTKRAMER, J., KRAUTKRAMER, H., 1977, *Ultrasonic testing of materials*. Springer-Verlag. ISBN: 9783540077169. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=9R4sAAAAIAAJ>>.
- KYRIAKOU, A., 2015, *Multi-Physics Computational Modeling of Focused Ultrasound Therapies*. Tese de Doutorado, ETH Zurich, Zürich. Diss., Eidgenössische Technische Hochschule ETH Zurich, Nr. 22413.
- LAURETI, S., RICCI, M., MOHAMED, M. N. I. B., et al., 2017, "Detection of rebars in concrete using advanced ultrasonic pulse compression techniques", *Ultrasonics*. ISSN: 0041-624X. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2017.12.010>. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0041624X17305826>>.
- LI, M., HAYWARD, G., 2017, "A robust approach to optimal matched filter design in ultrasonic non-destructive evaluation (NDE)", *43rd Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, v. 1806, n. 1, pp. 140002. doi: [10.1063/1.4974717](https://doi.org/10.1063/1.4974717).
- LONG, R., 2000, *The improvement of ultrasonic apparatus for the routine inspection of concrete*. Tese de d.sc., Imperial College of Science, technology and Medicine, London, UK.
- MALHOTRA, V. M., CARINO, N. J., 2003, *Handbook on Nondestructive Testing of Concrete*. 2 ed. New York, CRC Press.
- MARTIN, C. C., 1975, *Ultrassom*. Abendi - Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos e Inspeção. ISBN: 8599153048.

- MASON, W. P., MCSKIMIN, H. J., 1947, "Attenuation and Scattering of High Frequency Sound Waves in Metals and Glasses", *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 19, n. 3 (May), pp. 464–473. ISSN: 0001-4966. doi: 10.1121/1.1916504. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1121/1.1916504>>.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M., 1994, *Concreto: Estrutura, Propriedades, Materiais*. Pini, São Paulo.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M., 2014, *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*. McGraw-Hill.
- MISARIDIS, T., PEDERSEN, M. H., JENSEN, J. A., 1999, "An effective coded excitation scheme based on a predistorted FM signal and an optimized digital filter", *IEEE International Ultrasonics Symposium, Lake Tahoe, USA*.
- MISARIDIS, T., GAMMELMARK1, K., JORGENSEN, C. H., et al., 2000a, "Potential of coded excitation in medical ultrasound imaging", *Ultrasonics*.
- MISARIDIS, T., PEDERSEN, M. H., JENSEN, J. A., 2000b, "Clinical use and evaluation of coded excitation in B-mode images", *International Ultrasonics Symposium, Puerto Rico, USA*.
- MISARIDIS, T. X., 2001, *Ultrasound imaging using coded signals*. Tese de phd, Technichal University Denmark, Kongens Lyngby, Denmark.
- MISARIDIS, T. X., JENSEN, J. A., 2005, "Use of modulated excitation signals in medical ultrasound. Part I: basic concepts and expected benef its", *Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, IEEE Transactions*, v. 52, n. 2 (mar), pp. 177–191.
- MOHAMED, I., HUTCHINS, D., DAVIS, L., et al., 2014, "Pulse compression technique applied to ultrasonic nondestructive testing of concrete", *11th European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT 2014)*, (Oct).
- MULLER, S., MASSARANI, P. M., 2001, "Transfer-function measurement with sweeps", *J Audio Eng Soc*, v. 49, n. 6, pp. 443–471.
- O'DONNELL, M., 1992, "Coded excitation system for improving the penetration of real-time phased-array imaging systems", *Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, IEEE Transactions*, v. 39, pp. 341–351.

- OLIVEIRA, E. G., COSTA-FELIX, R. P. B., MACHADO, J. C., 2015, "Primary reciprocity-based method for calibration of hydrophone magnitude and phase sensitivity: complete tests at frequencies from 1 to 7MHz", *Ultrasonics*, v. 58, pp. 87–95. ISSN: 0041-624X. doi: 10.1016/j.ultras.2014.12.006. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0041624X14003643>>.
- PANAMETRICS, O., 2022. "Site do distribuidor." urlwww.olympus-ims.com/vi/ndt-tutorials/flaw-detection/wave-propagation/., maio.
- PANZERA, T. H., CHRISTOFORO, A. L., COTA, F. P., et al., 2011, "Ultrasonic Pulse Velocity Evaluation of Cementitious Materials", (09).
- PFEIL, W., 1988, *Concreto armado, 1: Introdução*. 5 ed. Rio de Janeiro, RJ, LTC - Livros técnicos e científicos Editora S.A.
- PHILIPPIDIS, T. P., AGGELIS, D. G., 2005, "Experimental study of wave dispersion and attenuation in concrete", *Ultrasonics*, v. 43, n. 7, pp. 584 – 595. ISSN: 0041-624X. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2004.12.001>. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0041624X04003117>>.
- POLLAKOWSKI, M., ERMERT, H., 1994, "Chirp signal matching and signal power optimization in pulse-echo mode ultrasonic nondestructive testing", *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, v. 41, n. 5 (Sept), pp. 655–659. ISSN: 0885-3010. doi: 10.1109/58.308500.
- POPOVICS, J. S., ROSE, J. L., 1994, "A Survey of Developments in Ultrasonic NDE of Concrete", *Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, IEEE Transactions*, v. 41, n. 1, pp. 140–143.
- POPOVICS, S., 1977, *Strength and related properties of concrete: a quantitative approach*. New York, Wiley. ISBN: 0471149039.
- POPOVICS, S., KOMLOS, K., POPOVICS, J., 1997, "Comparison of DIN/ISO 8047 (Entwurf) to Several Standards on Determination of Ultrasonic Pulse Velocity in Concrete", *International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE)*, v. 2, n. 4 (April).
- PRITCHARD, P. J.; MITCHELL, J. W., 2015, *Fox and MacDonal's Introduction to fluid mechanics*. John Wiley Sons.
- RAO, N. A. H. K., 1994, "Investigation of a pulse compression technique for medical ultrasound: A simulation study", v. 32 (mar), pp. 181–188.

- RAYLEIGH, L., 1877, *The theory of sound*. Dover publications.
- ROSE, J. L., 1999, *Ultrasonic waves in solid media*. Cambridge University press.
- SKOLNIK, M. I., 1981, *Introduction to Radar Systems*. New Yorkv, McGraw-Hill.
- TAKEUCHI, Y., 1979, “An investigation of a spread energy method for medical ultrasound systems - Part one: theory and investigation”, *Ultrasonics*.
- TREEBY, B. E., COX, B. T., 2010, “k-Wave: MATLAB toolbox for the simulation and reconstruction of photoacoustic wave-fields”, *J. Biomed. Opt.*, v. 15, n. 2, pp. 021314.
- TREEBY, B. E., JAROS, J., ROHRBACH, D., et al., 2014, “Modelling elastic wave propagation using the k-Wave MATLAB toolbox”, *IEEE International Ultrasonics Symposium*, pp. 146–149.
- TREEBY, B. E., JAROS, J., ROHRBACH, D., et al., 2016, *k-Wave - A MATLAB toolbox for the time domain simulation of acoustic wave fields User Manual - Version 1.1*. The Mathworks, Inc.
- UNEP, 2012, *The Emissions Gap Report 2012*. Report, United Nations Environment Programme (UNEP).
- VIKOROV, I. A., 1967, *Rayleigh and Lamb waves-Physical theory and applications*. Plenum press, New York.
- VIM, 2012, *Vocabulário Internacional de Metrologia – Conceitos fundamentais e gerais e termos associados (VIM 2012)*, 1<sup>a</sup> ed. Luso – Brasileira. INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA, Rio de Janeiro, Brasil.
- VOO, Y., FOSTER, S., 2009, *Reactive Powder Concrete: Analysis and Design of RPC*. Lambert Academic Publishing. ISBN: 9783838324067. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=JP3PQgAACAAJ>>.
- WASHER, G.; FUCHS, P. G. B., HARTMANN, J., 2004, “Ultrasonic testing of reactive powder concrete”, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, v. 51, n. 2 (may), pp. 193–201.
- YAMANI, A., BETTAYEB, M., GHOUTI, L., 1997, “High-order spectra-based deconvolution of ultrasonic NDT signals for defect identification”, *Ultrasonics*, v. 35, n. 7, pp. 525 – 531. ISSN: 0041-624X. doi: [https://doi.org/10.1016/S0041-624X\(97\)00023-1](https://doi.org/10.1016/S0041-624X(97)00023-1). Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0041624X97000231>>.

YILMAZ, O., DOHERTY, S. M., 1987, *Seismic Data Processing*. Investigations in geophysics. Society of Exploration Geophysicists. ISBN: 9780931830419. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=VCuYMwEACAAJ>>.

ZEQIRI, B., BOND, A. D., 1992, "The influence of waveform distortion on hydrophone spatial-averaging corrections—Theory and measurement", *Journal of the Acoustical Society of America*, v. 92, pp. 1809–1821.

# Apêndice A

Ao investigar as habilidades dos pulsos codificados e avaliar os métodos tradicionais de ultrassom, algumas técnicas tradicionais de processamento de sinais, habitualmente utilizadas na engenharia e geofísica, como aplicação de funções janelas, filtros passa-banda, deconvolução e transformada de Hilbert, foram requisitadas.

Nesta etapa do trabalho são apresentados alguns discussões e conceitos complementares para o bom entendimento da pesquisa.

## A.1 Revisitando conceitos de perdas da energia dos sinais

Para desenvolvimento do equacionamento matemático que permitiu estimar a atenuação acústica foi preciso se ter em mente os principais parâmetros/variáveis que regem os processos de decaimento da amplitude/energia, como: divergência esférica, dispersão, absorção, difração e perdas nas interface, processos associados aos princípios de Huygens e Fermat.

Para ampliar a abordagem acerca da atenuação do campo de pressão dos pulsos acústicos, recorre-se ao modelo de decaimento da pressão sonora de uma onda plana, a qual somente os efeitos de atenuação são considerados na redução da amplitude do sinal e pode ser representado matematicamente pela expressão:

$$p = p_0 e^{(-\alpha d)} \quad (\text{A.1})$$

onde  $p_0$  é a pressão inicial,  $p$  a pressão final,  $d$  o deslocamento entre os dois pontos analisados e  $\alpha$  o coeficiente de atenuação.

Escrevendo a mesma expressão de A.1, agora para representar o decaimento da intensidade da frente de onda, tem-se:

$$J = J_0 e^{(-\alpha_j d)} \quad (\text{A.2})$$

Como a intensidade é proporcional ao quadrado da pressão sonora, associando

A.1 e A.2, tem-se:

$$e^{(-\alpha_J d)} = e^{(-2\alpha d)} \quad (\text{A.3})$$

Logo:

$$\alpha_J = 2\alpha d \quad (\text{A.4})$$

E aplicando o logaritmo natural em A.1:

$$\alpha d = \ln \frac{p_0}{p} \text{ em } Np \quad (\text{A.5})$$

onde a pressão final da expressão em A.4 é dado em nepers (Np).

Outra forma de apresentar a pressão é na unidade de decibel (dB) ou decibel por metro ( $dBm/text{subscript}-1$ ), para tanto, utiliza-se o logaritmo na base 10 e multiplica por 20, conforme A.6:

$$\alpha d = 20 \log \frac{p_0}{p} \text{ em } dB \quad (\text{A.6})$$

Como  $\lg x = \frac{\ln x}{\ln 10} = 0,434 \ln x$ , uma unidade pode ser convertida na outra efetuando o produto por uma constante (8,686) que as relaciona, ou seja:  $1Np = 8,686 dB$ .

## A.2 Detalhamento do protocolo para o cálculo da atenuação acústica

- A partir da montagem do método de PE, usa-se um transdutor para excitar o sistema. Ajustando o transdutor com a sua melhor condição de acoplamento, efetua-se a medição das amplitudes ( $A_{RMS}$ , do inglês *Root Mean Square*) da duas primeiras respostas (por exemplo,  $A2'$  e  $A4'$ ), ou oriundas de quaisquer duas reflexões sucessivas da parede de fundo do sistema em análise;
- Na sequência, mantendo o sistema montado, inclusive garantindo acoplamento original, emprega-se um outro transdutor com características geométricas e de constituição (de preferência da mesma dimensão, marca e fabricante, por exemplo), efetua-se o acoplamento de um outro transdutor também com a sua melhor condição de acoplamento. Assim, permite-se registrar a leitura do sinal o de pulso eco acoplado com outro transdutor (método PE-1T2R), efetuando-se a medição de  $A2.1'$ ;
- A relação entre a primeira reflexão do método PE-1T2R pela primeira reflexão do PE, dará o coeficiente de reflexão entre o meio e o transdutor/acoplante:

$$CRC = \frac{A2.1'}{A2'}; \quad (A.7)$$

$$\alpha = 20\log \frac{A2}{CRCA4'}; dB cm^{-1} MHz^{-1} \quad (A.8)$$

Enquanto um outro transdutor, de preferência de mesma frequência, característica e geometria, ou seja, de preferência do mesmo fabricante, faz a aquisição ultrassônica como se fosse um arranjo pelo método transmissão direta. No entanto, somente o sinal lido por este segundo será utilizado para determinação dos tempos de interesse.

### A.3 Função Janela

Em processamento de sinais, uma *função janela*, também conhecida como função apodização ou função afilada, é uma função que possui valor nulo fora de um intervalo específico, visando anular a energia externa de um sinal fora dos limites desta “janela”, daí o seu nome. Com essa missão de zerar as amplitudes do sinal ao qual ele é multiplicado, de acordo com a função janela escolhida, restará a parte não nula dentro da janela, tipicamente não negativas e com o formato normalmente de sinos, uma vez que a maioria dos modelos de janelas possuem suas bordas suavizadas proporcionando amortecimento gradual nas extremidades. Em HARRIS (1978) apresenta-se uma ampla revisão das principais janelas de dados e seus usos na detecção de sinais harmônicos imersos em ruídos de banda larga bem como de outras interferências fortes nas proximidades do sinal. Nesse artigo pode-se ter acesso a discussões sobre as principais ferramentas de janelas, tais como Hanning, Kaiser, Blackman.

### A.4 Sistemas de equações acopladas no k-Wave

Quando uma onda acústica se propaga em meios elásticos como o concreto, variações são esperadas não somente na velocidade, como também na pressão, densidade, temperatura e etc. Tais oscilações são governadas por equações diferenciais parciais de primeira ordem, acopladas com base na conservação da massa, impulso e energia do meio. Frequentemente, as referidas equações são combinadas, após devidas simplificações, em uma única “equação de onda” que é uma equação diferencial parcial de segunda ordem em uma única variável acústica (normalmente a pressão acústica no meio) (TREEBY e COX, 2010).

Para driblar o inconveniente das grandes dimensões que estes modelos podem

levar, em relação ao comprimento de onda no meio, o k-Wave utiliza-se do método pseudospectral do espaço-k, objetivando reduzir a quantidade de pontos da malha de modelagem, requerida em função do comprimento de onda. O modelo é baseado em uma versão generalizada da equação de Westervelt-Lighthill (WLE) que consiste em uma equação completa da onda, em que após simplificações, consegue-se empregar equações acústicas acopladas de primeira ordem, permitindo simular desde meios homogêneos isotrópicos a meios mais complexos envolvendo propagação não linear em meios heterogêneos e com absorção, seguindo uma lei de potência.

As referidas equações incorporam relações entre densidade e pressão, que permitem simular a resposta da não-linearidade e atenuação dos meios mais complexos. Os termos adicionais que compõem os efeitos de não linearidade são representados por gradientes espaciais, tornando-os eficientes para a manipulação numérica.

As equações governantes são discretizadas usando uma técnica pseudoespectral no espaço-k em que os gradientes espaciais são calculados por meio do método espectral de coleta de Fourier. Segundo os desenvolvedores (TREEBY e COX, 2010) e TREEBY *et al.* (2014) do programa, tal recurso aumenta a precisão do cálculo do gradiente, além de condensar o volume de dados para pós tratamento, quando comparado a outros métodos convencionais. O referido programa disponibiliza para livre acesso vários *scripts* de modelos numéricos que permitem demonstrar sua precisão e diversos tipos de aplicabilidade, incluindo exemplos com simulações com transdutores ultrassônicos. A seguir, são apresentadas as equações de primeira ordem da onda acústica, seguindo a abordagem do k-Wave, ao se propagar através de um meio homogêneo, livre de perdas:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{\nabla p}{\rho_0}; \quad (\text{A.9})$$

representando a conservação do momento.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\rho_0 \nabla u; \quad (\text{A.10})$$

representando a conservação da massa.

$$p = c_0^2 \rho; \quad (\text{A.11})$$

representando a relação entre pressão e densidade.

Nas expressões A.9, A.10 e A.11  $u$  é a velocidade da partícula,  $p$  a pressão acústica,  $\rho$  a densidade do meio,  $\rho_0$  a densidade do ambiente ou de equilíbrio e  $c_0$  a velocidade isentrópica<sup>1</sup> para o referido meio. Estas equações também assumem que o ambiente no entorno é quiescente, ou seja, não possui rede de fluxo e os parâmetros

---

<sup>1</sup>Neste contexto, isentrópica se refere a um processo em que a velocidade não varia com o tempo.

do ambiente não se alteram; e isotrópico (significando que os parâmetros físicos dos materiais não são dependentes da direção). Assim, a partir das combinações destas equações e condições, tem-se a familiar equação de segunda ordem para a propagação de ondas:

$$\nabla^2 p - \frac{\partial^2 p}{c_0^2 \partial t^2} = 0; \quad (\text{A.12})$$

Entretanto, para os meios tipicamente heterogêneos, onde a velocidade e a densidade do meio sofrem mudanças, as equações apresentadas são insuficientes para uma correta modelagem física, devendo-se incluir termos adicionais que representem as perdas por absorção que no k-Wave segue a equação A.13 que atende a uma lei de potência.

$$\alpha = \alpha_0 \omega^y; \quad (\text{A.13})$$

onde  $\alpha$  é o coeficiente de absorção, conforme já introduzido no capítulo 3, em unidade de  $\text{Np m}^{-1}$ ,  $\alpha_0$  é um prefator da lei de potência em  $N_p(\text{rad/s})^{-y} \text{ m}^{-1}$  e  $y$  é o expoente escalar da referida lei. Esta abordagem da lei de potência tem sido adequada para representar o comportamento da maioria dos materiais encontrados na natureza, seja de sedimentos marinhos, tecidos biológicos ou na área de ensaios não destrutivos.

Após a inclusão desses termos adicionais, possibilitando expandir a capacidade de modelagem para modelos mais complexos, as expressões em A.9, A.10 e A.11 recebem termos que incorporam os efeitos de absorção e heterogeneidade, ficando o sistema de equações diferenciais acopladas de primeira ordem como:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\nabla p}{\rho_0}; \quad (\text{A.14})$$

representando a conservação do momento, a ser empregada para meios com heterogeneidade.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\rho_0 \nabla \cdot u - u \cdot \nabla \rho_0; \quad (\text{A.15})$$

representando a conservação da massa, a ser empregada para meios com heterogeneidade.

$$p = c_0^2(\rho + d \cdot \nabla \rho_0 - L\rho); \quad (\text{A.16})$$

representando a relação entre pressão e densidade, a ser empregada para meios com heterogeneidade.

Em A.16  $d$  se refere ao deslocamento das partículas do meio e  $L$  um operador linear que representa o efeito da absorção acústica e dispersão seguindo a referida lei de potência. Esse operador possui dois termos e ambos dependem de um Laplaciano

fracionário, conforme expressão a seguir:

$$L = \tau \frac{\partial}{\partial t} (-\nabla^2)^{\frac{y}{2}-1} + \eta (-\nabla^2)^{\frac{y+1}{2}-1}; \quad (\text{A.17})$$

onde  $\tau$  representa o coeficiente de proporcionalidade relacionado à absorção e  $\eta$  o coeficiente relacionado à dispersão.

Ao se expandir os modelos para ambientes onde a magnitude das ondas acústicas são bastante altas, a propagação passa a se enquadrar em um modelo de propagação não-linear, onde novos termos também deverão ser adicionados, expandindo o sistema formado por A.14, A.15 e A.16 em:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{\nabla p}{\rho_0}; \quad (\text{A.18})$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -(2\rho_0)\nabla.u - u.\nabla\rho_0; \quad (\text{A.19})$$

$$p = c_0^2(\rho + d.\nabla\rho_0 - L\rho + \frac{B\rho^2}{2A\rho_0}); \quad (\text{A.20})$$

onde  $B/A$  é o parâmetro da não linearidade definido pelo programa, que caracteriza os efeitos de amplitude-finita da velocidade acústica.

A inclusão da fonte na simulação pode ocorrer, principalmente, por meio da inserção de uma parcela de fonte de força ( $S_F$ ) na equação da conservação do momento ou de uma parcela de fonte de volume, também conhecida como fonte de massa  $F_M$ , na equação da conservação da massa.

A principal diferença entre esses dois principais modelos de fonte, consiste na direcionalidade do campo sonoro gerado, pois enquanto para as fontes de força são um vetor, as quais geram fontes direcionais, as fontes de massa ou pressão permitem transmitir radiação em todas as direções. A inserção de uma fonte de força representa a entrada de forças de corpo por unidade de massa na unidade de  $\text{N kg}^{-1}$  e um exemplo clássico deste modelo ocorre a partir de um fio ou esfera rígida oscilando em uma borda do modelo.

Por outro lado, a injeção de fontes de massa representam a taxa de tempo de entrada de massa por unidade de volume em unidade de  $\text{kg m}^{-3}\text{s}^{-1}$  e os transdutores do tipo pistão são um exemplo desse tipo de fonte. E assim, considerando o sistema de equações iniciais apresentados em A.9, A.10 e A.11, definidas para meios homogêneos e sem perdas, os quais serão suficientes aos objetivos relacionados às modelagens pretendidas neste trabalho, ao se considerar a inclusão das fontes de excitação, ficam da forma:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{\nabla p}{\rho_0} + S_F; \quad (\text{A.21})$$

representando a conservação do momento.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\rho_0 \nabla u + F_M; \quad (\text{A.22})$$

representando a conservação da massa.

$$p = c_0^2 \rho; \quad (\text{A.23})$$

representando a relação entre pressão e densidade.

E a equação A.24, após combinações das expressões acima e das possíveis fontes a inserir no modelo, fica da forma:

$$\nabla^2 p - \frac{\partial^2 p}{c_0^2 \partial t^2} - \rho \nabla \cdot S_F + \frac{\partial}{\partial t} S_M = 0; \quad (\text{A.24})$$

#### A.4.1 O método pseudoespectral do espaço-k

Para solucionar o sistema de equações acústicas acopladas, apresentadas na seção anterior, o k-Wave se utiliza do método da colocação ou pseudoespectral do espaço-k, cujo principal destaque em relação a outros métodos é conseguir minimizar não somente o tamanho final dos modelos como também o tempo necessário para gerar a simulação.

O método combina o cálculo espectral das derivadas espaciais, usando o método da colocação de Fourier<sup>2</sup>, com um propagador temporal expresso no domínio da frequência espacial ou espaço-k. Da mesma forma que o método das Diferenças Finitas (MDF), os gradientes espaciais são computados localmente baseados nos valores dos pontos vizinhos da malha (TREEBY e COX, 2010). Enquanto na operação mais simples, o gradiente pode ser calculado por meio de uma interpolação linear, melhores estimativas são conseguidas por meio do ajuste de um polinômio de ordem superior relacionado a um maior número de pontos da malha e assim pode-se recorrer à derivada do polinômio no ponto.

Segundo os autores do programa, existem duas vantagens que se destacam na utilização de séries de Fourier para o cálculo dos gradientes espaciais. A primeira

---

<sup>2</sup>O método da colocação espectral é o mais tradicional método entre os denominados métodos espetrais. O referido método é empregado na solução numérica de equações diferenciais ordinárias, equações diferenciais parciais e equações integrais. Este método faz uso de representações globais, representados por polinômios de alta ordem ou séries de Fourier e um número de pontos da malha (chamados de pontos de colocação) e seleciona a solução que satisfaz a equação dada nos pontos de colocação relacionados. Ele permite utilização de malhas mais grosseiras, produzindo menor quantidade de memória e velocidade no seu processamento.

delas é que as amplitudes dos componentes de Fourier podem ser calculadas eficientemente usando a FFT e a segunda é que são baseadas em funções senoidais, logo, necessitando teoricamente de somente dois pontos por comprimento de onda, ao invés de seis a dez dos métodos tradicionais.

## A.5 Introdução ao conceito de incerteza

Para as análises de exatidão e precisão que serão exploradas nesta pesquisa, faz-se necessário recorrer a alguns conceitos fundamentais no VIM (2012) e GUM (2008).

Em metrologia, quando uma medição é realizada, é consenso de que o valor verdadeiro<sup>3</sup> dessa grandeza é uma informação impossível de se determinar. Isto ocorre, principalmente, devido às possíveis variações instantâneas em cada sistema e que podem afetar a sua leitura, como diferentes operadores, condições ambientais, capacidade de leitura dos instrumentos, resolução dos equipamentos, dentre outros.

No entanto, as variações impostas por estas condições em cada uma das aquisições não podem ser necessariamente consideradas como erros de medição, mas oscilações no valor medido intrínseco ao instante e às suas características ambientais naquele procedimento de medição realizado. Por isto, é importante ter em mente o conceito de incerteza de medição associado a um mensurando.

Neste contexto, a incerteza de medição permite dar à apresentação de um resultado, limites estatísticos aceitáveis, superiores e inferiores, e que são calculados dentro de uma expectativa desejável definida por meio de um percentual esperado com base em uma distribuição normal (curva gaussiana). Ou seja, a incerteza atrelada a um mensurando tende a refletir a falta de conhecimento do seu valor exato (GUM, 2008).

### A.5.1 Requisitos para um modelo matemático

Quando se pretende elaborar um modelo matemático representado por uma equação em que uma variável depende de um conjunto de outras variáveis, a primeira etapa da avaliação da incerteza começa com a seleção das variáveis/grandezas que efetivamente podem influenciar nos resultados. Ou seja, a seleção de quais delas deverão fazer parte do procedimento de medição, consequentemente, permitirão estabelecer as ferramentas/equipamentos mais adequados para efetuar as medições e obtenção dos mensurandos e respectivas incertezas (GUM, 2008), dentro do intervalo de interesse.

Segundo o Guia Para Expressão de Incerteza de Medição (GUM) que é a versão

---

<sup>3</sup>Segundo (VIM (2012)) o valor verdadeiro de uma medição consiste em um número considerado único e, em termos práticos, impossível de ser conhecido.

brasileira traduzida do original em inglês, *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*, a qualidade na obtenção de um mensurando e de sua respectiva incerteza de medição estão condicionados ao rigor metrológico adotado, ou seja, ao nível de detalhamento na definição e aplicação do seu modelo de cálculo.

Assim, considerando uma variável  $y$  que se observou estar diretamente relacionada às variáveis  $x_1, x_2, x_3, x_4$ , o modelo metrológico de partida será algo do tipo:

$$y = f(x_1, x_2, x_3, x_4) \quad (\text{A.25})$$

No entanto, se for observado que uma variável  $x_5$  interfere no mensurando da variável de interesse, a expansão do tratamento metrológico incluindo também esta variável, tenderá a produzir resultados mais realísticos. Deste modo, o modelo estará relacionado a um maior controle das propriedades físicas, podendo ser mais desejável passar tratá-lo da forma:

$$y = f(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) \quad (\text{A.26})$$

Em GUM (2008) pode-se encontrar uma descrição mais completa referente ao tratamento metrológico adequado para delimitação das variáveis de interesse, inclusive com considerações pertinentes para os possíveis casos de correlação entre elas e a descrição das principais fases para a sua correta construção.

Uma vez definido um modelo matemático que se julgue adequado, uma etapa subsequente e de interesse metrológico dos dados consiste em selecionar os equipamentos disponíveis e verificar se estes estão ou poderão ser calibrados para atender aos níveis de incerteza que se pretende.

### A.5.2 Parcelas da incerteza de medição

De acordo com o Guia Para Expressão de Incerteza de Medição (GUM, 2008) a incerteza de uma grandeza medida pode ser classificada, basicamente, em dois tipos:

### A.5.3 Incertezas do tipo A

Novamente recorrendo ao GUM (2008), a incerteza do tipo A está vinculada às repetições da coleta de uma determinada propriedade capaz de fornecer dados estatísticos das oscilações do seu valor a partir de uma série de observações.

### A.5.4 Incertezas do tipo B

Por outro lado, as incertezas do tipo B estão relacionadas aos outros métodos de avaliação da incerteza que não a análise estatística das observações, como por exemplo

um certificado de calibração.

## A.6 Selecionando frequências mais efetivas para ultrassom em concreto

Com base nas formulações apresentadas e considerações coletadas em KRAUTKRAMER e KRAUTKRAMER (1977), pode-se realizar um planejamento para seleção das frequências mais recomendadas para um dado experimento, visto que a faixa de frequências entre 20 e 200 kHz são os limites recomendados em normas técnicas mais conservadoras e expandindo o intervalo a até 10 e 500 kHz para alguns trabalhos encontrados na literatura especializada no tema.

Adotando-se frequências de excitação próximas do limite inferior (20 kHz) em sinais de excitação em um meio com velocidade ultrassônica longitudinal de 4000 m/s, o comprimento de onda é da ordem de 0,2 m, o que proporciona baixa resolução. No outro extremo, para frequências de 200 e 500 kHz, para a mesma velocidade, o comprimento da onda propagada nesse meio passa a ser na ordem de 0,02 e 0,08 m, respectivamente. Entretanto nessa faixa de frequência, o pulso já começa a sofrer problemas de dispersão que podem inviabilizar o ensaio, a depender do objetivo pretendido, uma vez que na confecção da maioria dos concretos é comum encontrar peças com dimensões do agregado graúdo na ordem do comprimento de onda desses pulsos.

Com base nestas análises, a escolha da faixa de frequências a ser empregada em um experimento ultrassônico em concreto, dependerá principalmente de dois fatores que são fundamentais: primeiro, do diâmetro médio dos agregados graúdos que integram a composição do concreto a ser ensaiado visando selecionar frequências que minimizem os efeitos dispersivos. Esta informação pode ser obtida com dados de projeto (*as built*), memoriais de cálculo ou similares, ou seja, efetuando um estudo de anamnese preliminarmente. O segundo fator está relacionado à velocidade em que o meio é ensaiado, e que pode ser conseguido por meio de ensaios preliminares para reconhecimento da velocidade ultrassônica no concreto. De posse dessas duas informações, pode-se definir quais serão as frequências mais recomendadas para o ensaio em questão.

A tabela A.6 apresenta em negrito as frequências mais indicadas para utilização em ensaios de peças cimentícias, em função do critério de minimização do efeito dispersivo ( $D_g < \lambda/3$ ) apresentado no início dessa seção, e da velocidade ultrassônica longitudinal no meio  $V_L$ . Essa tabela pode ser útil para uma melhor seleção da frequência, ou faixa delas, que forneça mínima dispersão no meio de interesse, permitindo potencializar a resposta dos ensaios ultrassônicos.

Em situações de campo, normalmente não se detém informações do diâmetro máximo dos agregados ( $D_g$ ) em peças existentes, assim, recomenda-se a realização de ensaios de US prévios variando a frequência de excitação na amostra de interesse, pois ao se variar a frequência de excitação do sistema, e consequentemente o comprimento de onda, a análise comparativa da qualidade desses sinais pode ajudar a se ter uma ideia do  $D_g$ , permitindo inferir, com o auxílio da tabela A.6, a faixa de frequências mais recomendada para aquele ensaio específico.

Tabela A.1: Tabela de associação entre frequências, comprimento de onda e velocidade ultrassônica, para 4 classes de agregados graúdos  $D_g$  normalmente empregadas no concreto, limitadas pelo seu diâmetro máximo. Em negrito, estão as frequências recomendadas de acordo com o critério de minimização do efeito dispersivo ( $D_g < \lambda/3$ ).

Para $D_g$ menor que <b>9,5 mm</b> , $\lambda$ maior que 0,0285 m							
Vel (m/s)	f (kHz):	10	20	50	100	150	200
1000	$\lambda$ (m) =	<b>0,100</b>	<b>0,050</b>	<b>0,020</b>	<b>0,010</b>	0,007	0,005
2000	$\lambda$ (m) =	<b>0,200</b>	<b>0,100</b>	<b>0,040</b>	<b>0,020</b>	0,013	0,010
3000	$\lambda$ (m) =	<b>0,300</b>	<b>0,150</b>	<b>0,060</b>	<b>0,030</b>	0,020	0,015
3500	$\lambda$ (m) =	<b>0,350</b>	<b>0,175</b>	<b>0,070</b>	<b>0,035</b>	0,023	0,018
4000	$\lambda$ (m) =	<b>0,400</b>	<b>0,200</b>	<b>0,080</b>	<b>0,040</b>	0,027	0,020
Para $D_g$ menor que <b>19 mm</b> , $\lambda$ maior que 0,057 m							
Vel (m/s)	f (kHz):	10	20	50	100	150	200
1000	$\lambda$ (m) =	<b>0,100</b>	0,050	0,020	0,010	0,007	0,005
2000	$\lambda$ (m) =	<b>0,200</b>	<b>0,100</b>	0,040	0,020	0,013	0,010
3000	$\lambda$ (m) =	<b>0,300</b>	<b>0,150</b>	<b>0,060</b>	0,030	0,020	0,015
3500	$\lambda$ (m) =	<b>0,350</b>	<b>0,175</b>	<b>0,070</b>	0,035	0,023	0,018
4000	$\lambda$ (m) =	<b>0,400</b>	<b>0,200</b>	<b>0,080</b>	0,040	0,027	0,020
Para $D_g$ menor que <b>38 mm</b> , $\lambda$ maior que 0,108 m							
Vel (m/s)	f (kHz):	10	20	50	100	150	200
1000	$\lambda$ (m) =	0,100	0,050	0,020	0,010	0,007	0,005
2000	$\lambda$ (m) =	<b>0,200</b>	0,100	0,040	0,020	0,013	0,010
3000	$\lambda$ (m) =	<b>0,300</b>	0,150	0,060	0,030	0,020	0,015
3500	$\lambda$ (m) =	<b>0,350</b>	0,175	0,070	0,035	0,023	0,018
4000	$\lambda$ (m) =	<b>0,400</b>	<b>0,200</b>	0,080	0,040	0,027	0,020
Para $D_g$ menor que <b>76 mm</b> , $\lambda$ maior que 0,228 m							
Vel (m/s)	f (kHz):	10	20	50	100	150	200
1000	$\lambda$ (m) =	0,100	0,050	0,020	0,010	0,007	0,005
2000	$\lambda$ (m) =	0,200	0,100	0,040	0,020	0,013	0,010
3000	$\lambda$ (m) =	<b>0,300</b>	0,150	0,060	0,030	0,020	0,015
3500	$\lambda$ (m) =	<b>0,350</b>	0,175	0,070	0,035	0,023	0,018
4000	$\lambda$ (m) =	<b>0,400</b>	0,200	0,080	0,040	0,027	0,020

# Anexo

## A.7 Artigos desenvolvidos

### A.7.1 Artigo 1

A figura A.1 apresenta o título, cabeçalho e *abstract* do primeiro artigo aceito produzido com base no desenvolvimento desta tese.

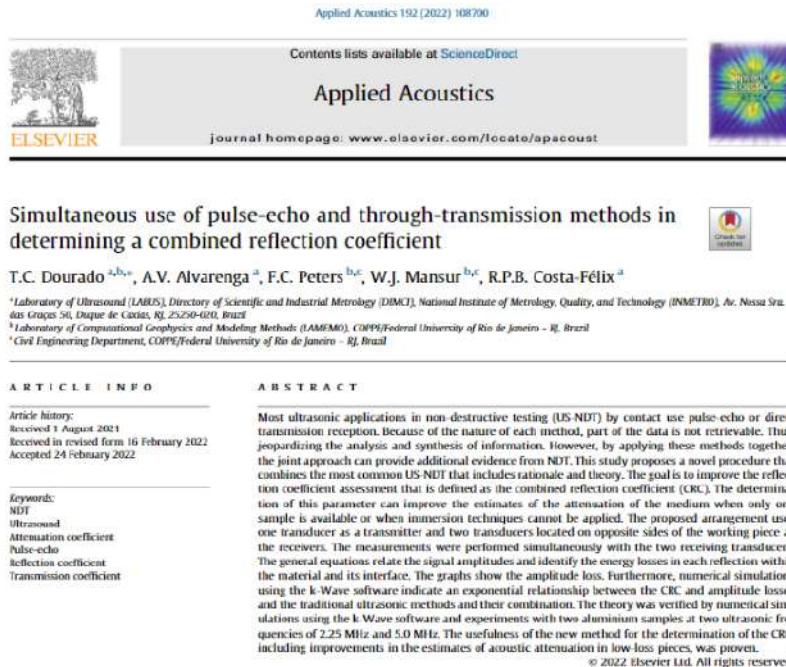


Figura A.1: Primeira página do artigo disponibilizado *on line* em 05 de março de 2022 na *Applied Acoustic* e pode ser acessado por meio do DOI = <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2022.108700>

## A.7.2 Artigo 2

A figura A.2 apresenta o título, cabeçalho e *abstract* de um segundo artigo aceito para revisão também produzido com base nesta tese.

### Comparison between linear frequency-modulated ultrasonic excitation signals and pure tones for concrete applications

Tiago C. Dourado<sup>a,b</sup>; Rodrigo P. B. Costa-Félix<sup>a\*</sup>; Franciane C. Peters<sup>b,c</sup>; Webe J. Mansur<sup>b,c</sup>

<sup>a</sup>Laboratory of Ultrasonics (LABUS), Directory of Scientific and Industrial Metrology (DIMCI), National Institute of Metrology, Quality, and Technology (INMETRO), Duque de Caxias - RJ, Brazil

<sup>b</sup>Modelling Methods in Engineering and Geophysics Laboratory (LAMEMO), COPPE/Department of Civil Engineering, Federal University of Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - RJ, Brazil

<sup>c</sup>Civil Engineering Department, COPPE/Federal University of Rio de Janeiro - RJ, Brazil

#### ABSTRACT

Non-destructive testing has for decades supported prognosis and health management in the construction industry. Among them, ultrasonic tests (UT) are increasingly used to assess the structural integrity of concrete. Typically, the UT uses pure tones as the excitation signal. However, an alternative is to use a linear frequency-modulated pulse (LFMP) followed by compression. This process improves the signal-to-noise ratio, provides broadband frequency responses, and is less susceptible to propagation dispersion. This work compared the ultrasonic transit times (UTT) of LFMP and pure tones. Three nondispersive models for concrete materials were numerically simulated using the k-Wave MATLAB toolbox. Additionally, a sample of reactive powder concrete (RPC) was experimentally tested. The frequencies ranged from 50 kHz to 750 kHz for both simulations and experiments. The simulation results presented LFMP relative errors in UTTs ranging from 0.0% to 2.7% compared to the theoretical values, whereas for pure tones, the RE was 2% to 63%. Experimentally, as no theoretical value can be considered, the quantitative comparison was the measurement dispersion under repeatability conditions. LFMPs disclosed a standard deviation in transit time of 35 ns, whereas for pure tones, it ranged from 43 to 51 ns. This research reinforces the potential of LFMP excitation compared to traditional pure tones, providing more accurate and precise ultrasonic velocity measurements in heterogeneous environments.

Figura A.2: Primeira página do artigo submetido também na *Applied Acoustic* e que retornou com *major revision*. Este foi ressubmetido em 14 de abril de 2022.