ENSAIOS QUANTITATIVOS NÃO-DESTRUTIVOS UTILIZANDO MEDIÇÃO DE IMPEDÂNCIA ACÚSTICA COM TRANSDUTOR PIEZOELÉTRICO RADIAL

Sandro Aureliano Miqueleti

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Instrumentação e Óptica Aplicada, do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ e Universidade Federal Fluminense, UFF, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Instrumentação e Óptica Aplicada.

Orientador: Geraldo Roberto Carvalho Cernicchiaro
Coorientador: Rodrigo Pereira Barretto da Costa-Félix

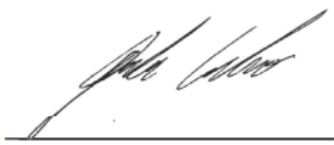
Rio de Janeiro,
Março 2024

ENSAIOS QUANTITATIVOS NÃO-DESTRUTIVOS UTILIZANDO MEDIÇÃO DE IMPEDÂNCIA ACÚSTICA COM TRANSDUTOR PIEZOELÉTRICO RADIAL

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Instrumentação e Óptica Aplicada, do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, e Universidade Federal Fluminense, UFF, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Instrumentação e Óptica Aplicada.

Sandro Aureliano Miqueleti

Banca Examinadora:



gov.br Documento assinado digitalmente
GERALDO ROBERTO CARVALHO CERNICCHIARO
Data: 19/03/2024 15:32:20-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Presidente, Professor Dr. Geraldo Roberto Carvalho Cernicchiaro, (CBPF)
(Orientador)

gov.br Documento assinado digitalmente
RODRIGO PEREIRA BARRETTO DA COSTA FELIX
Data: 20/03/2024 13:04:59-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Professor Dr. Rodrigo Pereira Barretto da Costa-Félix, (INMETRO)
(Coorientador)

Ana Lucia Ferreira de Barros
Assinado de forma digital por Ana Lucia Ferreira de Barros
Dados: 2024.03.19 21:45:29 -03'00'

Professora Dra. Ana Lucia Ferreira de Barros, (CEFET)

gov.br Documento assinado digitalmente
RICARDO MARQUES RIBEIRO
Data: 22/03/2024 16:43:27-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Professor Dr. Ricardo Marques Ribeiro, (UFF)

gov.br Documento assinado digitalmente
GLAUBER JOSE FERREIRA TOMAZ DA SILVA
Data: 21/03/2024 16:23:31-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Professor Dr. Glauber Jose Ferreira Tomaz da Silva, (UFAL)

gov.br Documento assinado digitalmente
WAGNER COELHO DE ALBUQUERQUE PEREIRA
Data: 21/03/2024 22:14:04-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Professor Dr. Wagner Coelho de Albuquerque Pereira, (UFRJ)

Rio de Janeiro
Março 2024

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

M669 Miqueleti, Sandro Aureliano
Ensaios quantitativos não-destrutivos utilizando medição de impedância acústica com transdutor piezoelétrico radial / Sandro Aureliano Miqueleti. — 2024.
80f. + apêndice : il. color. , enc.

Tese (Doutorado) Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, 2024.
Bibliografia : f. 73-80
Orientador: Geraldo Roberto Carvalho Cernicchiaro
Coorientador: Rodrigo Pereira Barretto da Costa-Félix

1. Teste não-destrutivo. 2. Ultrassom. 3. Audição. 4. Metrologia. I. Cernicchiaro, Geraldo Roberto Carvalho(Orient.). II. Costa-Félix, Rodrigo Pereira Barretto da (Corient.). III. Título.

CDD 620.11274

Elaborada pela bibliotecária Tania Mello – CRB/7 nº 5507/04

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus filhos, com quem, agora, quero aproveitar mais a vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço profundamente ao Prof. Doutor Geraldo Cernicchiaro, meu orientador, pela confiança e incentivo que foram vitais para a concretização deste trabalho. Suas críticas construtivas, discussões e reflexões desempenharam um papel fundamental ao longo de toda a jornada acadêmica.

Ao meu coorientador, Prof. Doutor Rodrigo Costa-Félix, expresso minha gratidão pela sua amizade e apoio inestimável durante todo este percurso.

Aos meus colegas e amigos no Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO), que me acompanharam ao longo da minha trajetória e contribuíram significativamente por meio da troca de ideias, tornando a realização deste trabalho possível, expresso minha sincera gratidão.

Agradeço ao Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Católica de Petrópolis, que, através do convênio existente com o INMETRO, tornou possível as medições de resistência de ruptura das amostras de concreto utilizadas nesta pesquisa.

Gostaria de agradecer à Norte Energia S.A, através do projeto PD-07427-0421/2021, por contribuir parcialmente na aquisição dos equipamentos utilizados neste trabalho.

RESUMO

Ensaios quantitativos não-destrutivos utilizando medição de impedância acústica com transdutor piezoelétrico radial

As propriedades mecânicas e a composição dos materiais podem mais bem compreendidas por meio de testes ultrassônicos não destrutivos. O ultrassom serve como uma ferramenta valiosa para caracterizar módulos elásticos, microestrutura de materiais, condições morfológicas e propriedades acústico-mecânicas correlacionadas. Embora as técnicas de medição por ultrassom, como transmissão e reflexão, estejam bem estabelecidas, há uma demanda crescente por novas tecnologias para facilitar a inspeção automatizada e melhorar a aplicação generalizada desta tecnologia. Este trabalho apresenta uma nova abordagem para avaliar a impedância acústica característica de uma amostra utilizando medições de ondas esféricas refletidas. Ao empregar uma fonte sonora esférica, a distribuição de energia torna-se mais uniforme em todas as direções, minimizando erros de medição causados pelo alinhamento do sistema. Além disso, esta configuração auxilia na determinação da geometria experimental. A impedância foi avaliada pela análise de pulsos senoidais modulados por uma envoltória gaussiana refletidos esfericamente, que são menos suscetíveis à interferência de ruído. O sinal adquirido é ajustado em um modelo matemático para cálculo da impedância acústica, levando em consideração a diminuição da amplitude da pressão sonora na frente de onda esférica de acordo com a lei do inverso da distância. Materiais com uma ampla faixa de impedâncias acústicas (2 MRayl < Z < 46 MRayl) foram medidos para validar o método. As impedâncias experimentais exibiram concordância estatisticamente significativa com os valores obtidos por meio da avaliação da impedância utilizando o método estabelecido de transmissão; em que a onda ultrassônica atravessa a amostra. A regressão linear indica, para o método proposto, um erro sistemático de 1,0 % com um erro padrão total de 1,4 %. Esta configuração experimental é promissora para avaliar com precisão estruturas submersas, oferecendo vantagens potenciais para inspeção quantitativa.

Palavras-chave: ensaios não-destrutivo; ultrassom; impedância acústica; metrologia.

ABSTRACT

Non-destructive quantitative testing using acoustic impedance measurement with radial piezoelectric transducer

The mechanical properties and composition of materials can be better understood through ultrasonic non-destructive testing. Ultrasound is a valuable tool for characterizing elastic moduli, material microstructure, morphological conditions, and correlated acoustical-mechanical properties. Although ultrasound measurement techniques like transmission and reflection are well-established, there is a growing demand for new technologies to facilitate automated inspection and enhance the widespread application of this method. This paper presents a novel approach to evaluate the characteristic acoustic impedance of a sample using measurements of reflected spherical waves. Employing a spherical sound source makes the energy distribution more uniform in all directions, minimizing measurement errors caused by system alignment. Additionally, that configuration aids in determining the experiment's geometry. The impedance was evaluated by analysis of the spherically reflected Gaussian-modulated sinusoidal pulses, which are less susceptible to noise interference. The acquired signal is fitted into a mathematical model to calculate the acoustic impedance, considering the decrease in sound pressure amplitude at the spherical wavefront according to the inverse distance law. Materials with a wide range of impedances (2 MRayl < Z < 46 MRayl) were measured to validate the method. The experimental impedances exhibited statistically significant agreement with values obtained via through-transmission impedance evaluation. Linear regression indicates a systematic error of 1.0 % for the proposed method with a standard error of 1.4 %. This experimental setup holds promise for accurately assessing submerged structures, offering potential advantages for quantitative inspection.

Keywords: non-destructive testing; ultrasound; acoustic impedance.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Tanque de ensaios de reflexão acústica. 23

Figura 2 – Tanque de ensaios de transmissão acústica. 24

Figura 3 – Divergência do feixe: (a) na água, (b) divergência com amostra inserida. ... 24

Figura 4 – Tubo de impedância ultrassônica. 25

Figura 5 – Transdutores piezoelétricos: esférico e hemisférico. 26

Figura 6 – Modelo de linha de transmissão de Leach para o transdutor piezelétrico..... 28

Figura 7 – Impedância acústica da onda esférica em função de kr. 32

Figura 8 – Relações entre a impedância acústica e a incidência norma da onda plana.. 33

Figura 9 – Incidência obliqua da onda plana. 34

Figura 10 – Dispositivo para estudo da incidência oblíqua da onda plana..... 35

Figura 11 – Campo acústico de um transdutor de disco, (a) plano frontal, (b) plano lateral. 36

Figura 12 – Mapeamento axial central para localizar o início do campo distante (*d*).... 36

Figura 13 – Padrão de diretividade espacial de um transdutor piezoelétrico radial. 38

Figura 14 – Quadro resumo dos módulos de elasticidade 40

Figura 15 – Velocidade de propagação longitudinal (c_L). 40

Figura 16 – Velocidade de propagação transversal (c_s)..... 40

Figura 17 – Sistema de medição; (a) hidrofone; (b) tanque de acrílico; (c) sistema cartesiano de posicionamento; (d) osciloscópio; (e) amplificador de carga; (f) gerador. 44

Figura 18 – Modelo de propagação acústica. (a) caminho acústico direto d_1 e caminho refletido d_2; (b) Ilustração da reflexão da frente de onda radial. 45

Figura 19 – Propagação acústica simulada (a) sinal direto; (b) sinal refletido e (c) reflexão interna. 46

Figura 20 – Um conjunto de amostras utilizados para determinação de elasticidade 51

Figura 21 – Ensaio de rompimento das amostras de concreto. 52

Figura 22 – Amplitude da frente de onda acústica em relação ao tempo de propagação. 55

Figura 23 – Posicionamento típico da amostra no suporte para mapeamento ultrassônico. A régua indica o afastamento aproximado, as distâncias são calculadas através do processamento do sinal acústico..... 56

Figura 24 – Resposta ultrassônica típica na varredura de uma amostra. (a) o sinal direto, (b) o sinal refletido e (c) as múltiplas reflexões internas no tanque ultrassônico..... 57

Figura 25 – Projeção das formas de onda obtidas ao longo da amostra. 58

Figura 26 – Exemplo de processo de ajuste: a linha vermelha representa o sinal adquirido; a linha verde é a curva ajustada. 59

Figura 27 – Amplitude do sinal refletido na amostra de alumínio; em vermelho o trecho considerado para o cálculo de impedância. 59

Figura 28 – Precisão do método de onda esférica em relação ao método de transmissão. 62

Figura 29 – Método UPV de medição da velocidade ultrassônico no concreto..... 63

Figura 30 – Elasticidade do concreto medida pelo método da onda esférica comparada com a previsão de modelos em normas técnica..... 65

Figura 31 – Resistência do concreto prevista pelo método da onda esférica 66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dimensões dos materiais e impedância acústica característica 49

Tabela 2 – Composição das misturas de concreto utilizadas nas medições ultrassônicas 51

Tabela 3 – Equações para estimativa da elasticidade em concreto reportadas na literatura 53

Tabela 4 – Impedância acústica característica das amostras pelo método direto..... 61

Tabela 5 – Impedância acústica característica das amostras pelo método proposto 61

Tabela 6 – Impedância acústica característica das amostras em outros trabalhos..... 63

Tabela 7 – Velocidade ultrassônica obtida pelos dois métodos de medição [m/s]..... 63

Tabela 8 – Módulo de Young obtido pelos dois métodos de medição [GPa] 64

Tabela 9 – Impedância acústica [MRayl] no concreto 64

Tabela 10 – Tensão de ruptura f_{ck} [MPa] no concreto..... 64

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABENDI	Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos e Inspeção
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASNT	American Society For Nondestructive Testing
BASIC	Beginner's All-purpose Symbolic Instruction Code
CBPF	Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas
CC BY 4.0	Creative Commons Attribution 4.0 International license
CEFET	Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca
EuroCODE	Série de Normas Européias de Construção Civil
fib	Federation Internationale du Beton
IEC	International Electrotechnical Commission
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
ISSN	International Standard Serial Number
KLM	Modelo elétrico de transdutor piezoelétrico (**K**rimholtz, **L**eedom, **M**attaci)
k-Wave	Toolbox do MATLAB (MathWorks®, USA)
LABVIEW	Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench (NI, USA)
MATLAB	MATrix LABoratory - software de cálculo numérico (MathWorks®, USA)
NBR	Norma Brasileira
NDT	Nondestructive Testing
PI	Physik Instrumente
PPGIO	Programa de Pós-Graduação em Instrumentação e Óptica Aplicada
TS	Technical Specification
UFAL	Universidade Federal de Alagoas
UFF	Universidade Federal Fluminense
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
UPV	Ultrasonic Pulse Velocity

LISTA DE SÍMBOLOS

A - amplitude de tensão elétrica [V]
c - velocidade de propagação do meio [m s^{-1}]
c_L - velocidade de propagação longitudinal [m s^{-1}]
c_S - velocidade de propagação transversal [m s^{-1}]
d - distância [m]
dB - decibel, razão logarítmica na base 10
E - módulo de Young [Pa]
E_d - módulo de Young dinâmico [Pa]
f - frequência em hertz [s^{-1}]
f_{ck} - tensão de ruptura do concreto [Pa]
F_n - força normal [kg m s^{-2}]
F_s - força tangencial [kg m s^{-2}]
G - módulo de cisalhamento [Pa]
H - distância até a amostra [m]
I - intensidade sonora [W m^{-2}]
j - unidade imaginária, j = $\sqrt{-1}$
k - número de onda angular [rad m^{-1}]
K - módulo de Bulk [Pa]
kr - quantidade de ciclos na propagação esférica
L - comprimento da amostra [m]
p - pressão [N m^{-2}]
r - raio da coordenada esférica [m]
R - coeficiente de reflexão da pressão acústica
Rayl - unidade de impedância característica, 1 Rayl = 1 [N s m^{-3}]
R_I - coeficiente de reflexão da intensidade sonora
Rx - transdutor piezoelétrico receptor
S - área [m^2]
t - tempo [s]
T - coeficiente de transmissão da pressão acústica
T_I - coeficiente de transmissão da intensidade sonora
Tx - transdutor piezoelétrico emissor
u - velocidade da partícula do meio [m s^{-1}]
V - volume [m^3]

V_L - velocidade acústica longitudinal [m s^{-1}]

y - distância entre máximos de interferência

z_0 - impedância acústica característica [Rayl]

z_1 - impedância característica do meio de origem [Rayl]

z_2 - impedância característica do meio incidente [Rayl]

Z_A - impedância acústica [Rayl m^{-2}]

Z_c - impedância característica do concreto [Rayl]

Z_M - impedância mecânica [Rayl m^2]

Z_S - impedância acústica específica [Rayl]

δ - tensão mecânica [Pa]

ΔV - variação de volume [m^3]

ε - deformação [m]

θ_i - ângulo plano de incidência [rad]

λ - comprimento de onda [m]

ν - coeficiente de Poisson

ρ_0 - massa específica [Kg m^{-3}]

σ - desvio padrão

φ - fase entre a pressão e a velocidade [rad]

ϕ - fase da excitação elétrica [rad]

ω - frequência angular [rad s^{-1}]

SUMÁRIO

Introdução.....16
1. REVISÃO DA LITERATURA 19
1.1. O uso do ultrassom na determinação de propriedades dos materiais 19
1.2. O estado da arte na medição de impedância acústica por ultrassom 20
1.2.1. O método da reflexão ultrassônica 22
1.2.2. O método da transmissão ultrassônica.....23
1.2.3. O método do tubo de impedância 25
1.2.4. Transdutores esféricos e hemisféricos 25
1.3. Lacunas no conhecimento existente 26
1.4. História da piezoeletricidade 27
1.5. Modelagem de um transdutor piezoelétrico 27
1.6. Impedância acústica de uma onda plana 29
1.7. Impedância acústica de uma onda esférica.....30
1.8. A transmissão e reflexão na incidência normal da onda acústica plana.....32
1.9. Impedância obtida por reflexão da onda plana com incidência oblíqua 34
1.10. Transdutores de onda plana com polarização axial 35
1.11. Transdutores de onda esférica com polarização radial 37
1.12. Os módulos de elasticidade e correlação com a velocidade de propagação.....38
1.13. Correlação entre elasticidade e impedância acústica.....41
2. MATERIAIS E MÉTODOS.....43
2.1. Descrição do método proposto de medição de impedância acústica.....43
2.2. Descrição dos componentes do sistema de medição 43
2.3. Diagrama esquemático do método de medição de impedância acústica.....44

2.4. Geração do pulso de excitação gaussiano utilizado no método de medição 46
2.5. Curva de calibração da sonda de medição de impedância acústica.....47
2.6. Processamento de sinal utilizado no método de medição de impedância 47
2.7. Determinação da impedância utilizando os parâmetros do ajuste.....48
2.8. Materiais utilizados para avaliação do método de medição de impedância.....49
2.9. Determinação da impedância acústica de referência das amostras 49
2.10. Aplicação do método proposto para determinar a elasticidade em concreto.....50
2.10.1. Planejamento das amostras de concreto 50
2.10.2. Composição das amostras de concreto 51
2.10.3. Determinação das propriedades elásticas do concreto.....52
2.11. Avaliação das incertezas de medição.....53
3. RESULTADOS.....55
3.1. Calibração da sonda de medição de impedância acústica 55
3.2. Mapeamento acústico das amostras selecionadas 56
3.3. Processamento de sinal para medição dos parâmetros acústicos 58
3.4. Interferência sofrida nas reflexões em amplitude.....59
3.5. Determinação da impedância acústica caracteristica das amostras.....60
3.6. Elasticidade das amostras de concreto 63
4. DISCUSSÃO 67
5. CONCLUSÕES 70
PRODUÇÃO CIENTÍFICA.....71
TRABALHOS FUTUROS.....72
Referências.....73
APÊNDICE A - PROGRAMA DE SIMULAÇÃO DE CAMPO ACÚSTICO.....81

Introdução

Acústica é o ramo da Física que se dedicada ao estudo da geração, propagação, captação e interação das ondas mecânicas com o ambiente. Neste contexto, o ultrassom, uma tecnologia que utiliza ondas acústicas de alta frequência, acima da faixa audível, desempenha um papel fundamental em diversas áreas, incluindo engenharia, medicina, geofísica e hidroacústica.

A propriedade utilizada para descrever a interação da onda acústica com um meio material é a impedância acústica característica do meio (BERANEK, MELLOW, 2012). Quando as ondas se propagam de um meio para outro com diferentes impedâncias acústicas, diversos fenômenos ondulatórios podem ocorrer, como reflexão, refração e difração (KINSLER, FREY, *et al.*, 2000). A quantidade de energia refletida e transmitida nessa interface é estabelecida pelos valores de impedância acústica dos materiais envolvidos, sendo este o principal mecanismo empregado na formação de imagens médicas.

Segundo PIERCE (2019), a impedância acústica característica é uma propriedade intrínseca do meio material homogêneo e isotrópico, sendo independente da frequência. Na abordagem linear, que leva em consideração as condições de colisão elástica, ela depende da densidade e da velocidade de propagação do meio, portanto, ela é uma propriedade de camada e não uma propriedade da interface (SANCEVERO, REMACRE, *et al.*, 2006). A impedância acústica está relacionada à elasticidade do meio e permite a sua avaliação (SIGRIST, LIAU, *et al.*, 2017).

A maioria dos métodos de medição da impedância acústica foi originalmente desenvolvida para a faixa audível. Eles utilizam uma fonte de ondas acústica constante em combinação com um sensor de pressão, situação na qual o sinal pode ser considerado proporcional à impedância (HIREMATH, KUMAR, *et al.*, 2021). No entanto, nem todos os métodos desenvolvidos para a faixa audível estão validados na região ultrassônica. De acordo com as especificações técnicas da IEC TS 63081 (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC), 2019), apenas os métodos de transmissão e reflexão são recomendados para medições na faixa ultrassônica.

A implementação dos métodos de transmissão ou reflexão ultrassônicos frequentemente envolve o uso de discos piezoelétricos polarizados axialmente, com a suposição que esses transdutores geram ondas planas. No entanto, essa suposição traz consigo uma série de desafios práticos. No método de reflexão, um dos principais desafios é a divergência do feixe ultrassônico. A divergência implica variações na amplitude do sinal, dependendo da distância percorrida e das características do meio de propagação (KAUSHIK, GUPTA, 2021). No caso do método de transmissão, é essencial a garantia do alinhamento preciso entre a fonte e o receptor para maximizar a amplitude do sinal de medição (FENG, JIAN-XIN, *et al.*, 2018). Esses desafios práticos relacionados à implementação de métodos de transmissão e reflexão ultrassônicos evidenciam a importância de se considerar cuidadosamente os aspectos técnicos e operacionais envolvidos na implementação do sistema de medição.

Objetivo principal

O objetivo deste trabalho foi implementar um método de medição de impedância acústica, empregando transdutores piezoelétricos radialmente polarizados, tanto para a fonte quanto para o sensor. O transdutor de polarização radial produz um campo acústico aproximadamente isotrópico (SADEGHPOUR, MEYERS, *et al.*, 2019). A polarização radial possui a vantagem da não-diretividade do campo acústico (LI, Haoran, HU, *et al.*, 2022). A aplicação desta propriedade pretende solucionar o problema de alinhamento do sistema de medição e, além disso, a divergência do feixe pode ser modelada pelo decaimento inversamente proporcional com à distância da fonte (BERANEK, MELLOW, 2012). Transdutores esféricos estão sendo desenvolvidos atualmente para produzir campos omnidirecionais quase ideais (SADEGHPOUR, MEYERS, *et al.*, 2019, ZHANG, WANG, *et al.*, 2021).

Objetivo secundário

O propósito adicional deste estudo concentra-se na aplicação da técnica desenvolvida com o intuito de avaliar com precisão e eficácia estruturas submersas. A precisão na avaliação de tais estruturas é fundamental em áreas como engenharia civil, construção naval e inspeção de infraestrutura submarina. Esta técnica busca proporcionar resultados que permitam uma determinação mais precisa das propriedades mecânicas

dessas estruturas, contribuindo assim para a segurança, integridade, manutenção otimizada e prolongamento da vida útil delas.

Validação do método

A validação do método proposto foi conduzida por meio de experimentos nos quais comparam-se as medições de impedância acústica obtidas utilizando transdutor axial com aquelas feitas através do método proposto de transmissão com transdutor radial. Para esse propósito, selecionaram-se amostras que abrangiam uma ampla faixa de impedâncias acústicas e foi demonstrado que as medições resultantes foram equivalentes. A fim de ilustrar a aplicação prática dessa técnica recém-desenvolvida, ela foi utilizada para estimar a elasticidade de amostras de concreto submersas com base em medições de impedância acústica. Atualmente, a variável acústica mais utilizada para monitorar a condição do concreto é a velocidade do pulso ultrassônico, conforme destacado por Caldas *et al.* (2023). Velocidades abaixo de valores iniciais pré-estabelecidos indicam fragilidade do concreto. Contudo, esta pesquisa aponta uma abordagem alternativa, propondo a utilização da impedância acústica como uma substituta viável da velocidade. Essa abordagem amplia a análise da integridade do material ao possibilitar a avaliação de sua rigidez, resultando em um conjunto mais robusto e enriquecido de informações.

1. REVISÃO DA LITERATURA

Os ensaios não destrutivos, conhecidos pela sigla em inglês NDT (Nondestructive Testing), compreendem um conjunto de técnicas de medição e análise empregadas na ciência e na indústria para a avaliação das propriedades de materiais, componentes ou sistemas. Esses ensaios desempenham um papel fundamental na garantia da qualidade, integridade de materiais e componentes utilizados em diversas indústrias, incluindo setores como petróleo e gás, manufatura, construção civil e aeroespacial. A relevância dos ensaios NDT é tão significativa que se reflete na existência de periódicos especializados dedicados exclusivamente à divulgação de avanços nesta área, destacando-se periódicos como: "NDT & E International" (ISSN: 0963-8695), "Nondestructive Testing and Evaluation" (ISSN: 1058-9759), "Journal of Nondestructive Evaluation" (ISSN: 0195-9298) e "NDT" (ISSN: 2813-477X). A disseminação desse conhecimento é promovida tanto por entidades nacionais, como a Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos e Inspeções (ABENDI), quanto por organizações internacionais, exemplificada pela American Society For Nondestructive Testing (ASNT).

1.1. O uso do ultrassom na determinação de propriedades dos materiais

Dentre os métodos de ensaios não destrutivos, destacam-se aqueles que empregam a tecnologia de ultrassom, notadamente devido à sua repetibilidade e habilidade em realizar avaliações internas de materiais. A automação das técnicas ultrassônicas possibilita a condução eficiente de inspeções em larga escala ou repetitivas. Sistemas automatizados podem ser programados para deslocar o transdutor ao longo de uma trajetória predefinida, assegurando inspeções detalhadas e consistentes (MORTADA, MOUSHARRAFIE, *et al.*, 2023). É importante salientar que, mesmo em aplicações já estabelecidas, os ensaios ultrassônicos continuam passíveis de um processo contínuo de aprimoramento (ZEQIRI, SCHOLL, *et al.*, 2010). Abaixo, apresentam-se alguns exemplos atuais dessas melhorias em aplicações consagradas:

Medição de espessura: os ensaios ultrassônicos podem ser usados para medir a espessura de materiais, como tubos ou chapas de metal. Ao medir o tempo que as ondas ultrassônicas levam para viajar através do material, a espessura pode ser determinada com precisão (PIERCE, 2019). No estudo conduzido por Garcia *et al.* (2020), foi proposto a

aplicação de técnicas de Machine Learning para filtrar o ruído presente na análise de sinais ultrassônicos em medições de espessura e melhorar a qualidade das medições automáticas.

Detecção de falhas: as ondas ultrassônicas refletidas são utilizadas para identificar falhas ou irregularidades dentro do material. O tempo necessário para as ondas ultrassônicas percorrerem até um defeito e retornarem é empregado no cálculo da distância até a falha. Tanto a amplitude quanto o tempo de voo dos sinais refletidos fornecem informações sobre o tamanho e forma da falha (PIERCE, 2019). No estudo conduzido por Marcantonio *et al.* (2019), são avaliadas técnicas recentes de análise não linear dos sinais refletidos, contribuindo para uma compreensão mais abrangente dessa abordagem.

Caracterização de materiais: os ensaios ultrassônicos também podem ser usados para avaliar as propriedades de um material, como densidade, elasticidade e impedância acústica (PIERCE, 2019). Estas informações são eficazes na avaliação da integridade do material. O ultrassom com frequências superiores a 25 MHz tem sido utilizado como método de caracterização de materiais em microscopia de impedância acústica, como no estudo de Altun *et al.* (2021), permitindo uma análise minuciosa do material em escala microscópica.

Phased Array: além dos testes ultrassônicos tradicionais, esta tecnologia utiliza múltiplos elementos no transdutor para direcionar eletronicamente e focalizar o feixe ultrassônico. Essa abordagem confere maior versatilidade à inspeção de geometrias complexas e à detecção de falhas em variados ângulos (PIERCE, 2019). Seu desenvolvimento segue uma trajetória pautada na adaptação de técnicas provenientes da ultrassonografia médica. Um novo método para controlar a focalização do feixe ultrassônico foi proposto por Wang *et al.* (2023) através da correspondência de fase reversa do sinal ultrassônico.

1.2. O estado da arte na medição de impedância acústica por ultrassom

Milhares de artigos são publicados a cada ano utilizando técnicas ultrassônicas com os mais distintos propósitos. Na lista que segue destacam-se algumas aplicações atuais e relevantes no uso da impedância acústica, especificamente para ensaios não destrutivos de materiais. Deve-se notar que esta lista está longe de exaurir as novas aplicações que estão sendo desenvolvidas.

- A impedância acústica pode ser utilizada na medição da espessura de películas de óleo em casquilhos de eixos pelo método da reflexão (BEAMISH, REDDYHOFF, *et al.*, 2022);
- A avaliação do concreto degradado por exposição à alta temperatura pode ser feita pela medição das variações da impedância acústica sofrida pelo material (DVOŘÁK, CHOBOLA, *et al.*, 2018);
- As condições internas de um material podem ser monitoradas através da tomografia de impedância acústica avaliando sua elasticidade de forma tridimensional (KHAIRI, IBRAHIM, *et al.*, 2019);
- A impedância acústica pode ser empregada no monitoramento do nível de líquidos em reservatórios (GAO, LIU, *et al.*, 2020);
- O monitoramento da temperatura na água pode ser realizado através da sua correlação com a impedância acústica (TOHMYOH, TERASHIMA, 2019); e
- Materiais que mimetizam tecidos humanos podem ser caracterizados quanto a impedância acústica para utilização no desenvolvimento de aplicações médicas in vitro (ALTUN, DEMIRKAN, *et al.*, 2021).

Ao longo dos anos, a caracterização de materiais por ultrassom tem sido realizada de diversas maneiras. Alguns métodos utilizam apenas sinais refletidos (ADAMOWSKI, BUIOCHI, *et al.*, 2010, KUSHIBIKI, ARAKAWA, 2000, SELFRIDGE, 1985), enquanto outros se baseiam exclusivamente na transmissão de ultrassom através de uma amostra (HE, 1999, PETERS, PETIT, 1978, SACHSE, PAO, 1978). Existem ainda métodos que incorporam tanto sinais refletidos quanto transmitidos (BLOOMFIELD, LO, *et al.*, 2000, HSU, HUGHES, 1992, METWALLY, LEFEVRE, *et al.*, 2016). A seleção do método de caracterização pode ser influenciada pelas propriedades do material sob medição ou pelas limitações da geometria e orientação da amostra. Na escolha adequada, os seguintes fatores precisam ser considerados:

- O método de medição que dependa da reflexão na superfície interna da amostra requer que a onda acústica tenha percorrido a espessura da amostra duas vezes. Em materiais que possuem atenuação muito alta, isso pode introduzir perdas de amplitude do sinal que excedem a faixa dinâmica do sistema. Em alguns casos, métodos de transmissão (com apenas um trânsito pela amostra) podem ser preferíveis (THOMAS D. ROSSING, 2007).

- Métodos de reflexão para determinar a absorção acústica frequentemente dependem de valores teóricos do coeficiente de transmissão de amplitude. Esses valores são frequentemente derivados de cálculos das impedâncias acústicas características dos meios envolvidos, que por sua vez são baseadas em valores experimentalmente determinados para densidade e velocidade longitudinal da onda (THOMAS D. ROSSING, 2007). A extensa cadeia de medições pode levar ao acúmulo de incertezas em cada estágio, diminuindo a confiança no valor obtido.

- Métodos de transmissão podem ser menos eficaz em materiais muito finos (na ordem de grandeza do comprimento de onda) ou que atenuam fortemente as ondas ultrassônicas. Em materiais finos, podem ocorrer modos de vibração indesejados que podem levar a interferências e dificultar a interpretação dos resultados. Além disso, a aplicação de transdutores na face oposta pode ser impraticável em situações específicas, o que limita a aplicabilidade desse método (THOMAS D. ROSSING, 2007).

- Métodos que combinam sinais refletidos e transmitidos oferecem a possibilidade de medir a espessura da amostra por ultrassom. Isso elimina a necessidade de medir de maneira independente a espessura da amostra (o que pode ser difícil com amostras flexíveis de gel ou resinas). No entanto, a combinação de informações provenientes da transmissão e reflexão podem tornar a análise do sinal mais complexa (THOMAS D. ROSSING, 2007).

1.2.1. O método da reflexão ultrassônica

Um dos estudos relevantes no desenvolvimento das medição de propriedades acústicas por reflexão ultrassônica foi conduzido por Selfridge (1985). O diagrama utilizado em seu trabalho pode ser visto na Figura 1. O dispositivo consiste em um tanque de acrílico com fundo de vidro possuindo um posicionador para fazer o alinhamento da amostra e garantir o maior sinal possível. Este aparato garante que todas as medições são realizadas no centro das amostras e que a distância até o transdutor seja constante.

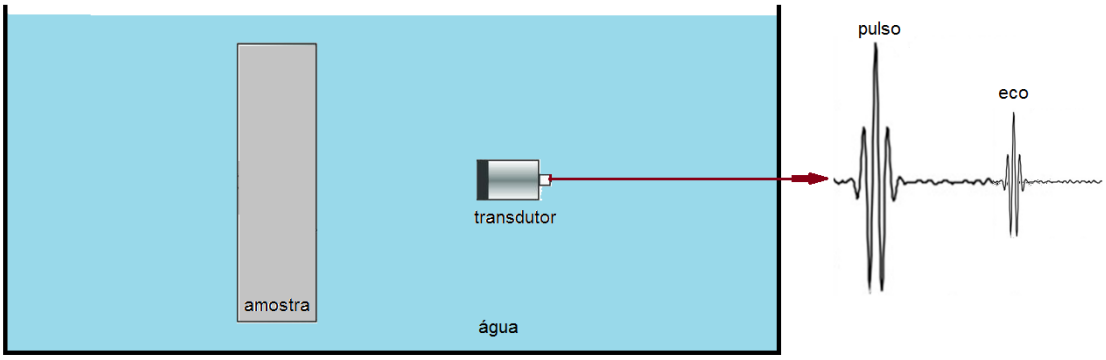


Figura 1 – Tanque de ensaios de reflexão acústica.
Fonte: elaboração própria.

Esta configuração permite também medições realizadas por múltiplas reflexões internas na amostra. Com base nos resultados obtidos, Selfridge (1985) desenvolveu um software em linguagem BASIC, disponibilizado em seu trabalho. Esse programa utiliza a densidade e espessura do material, medidas externamente, em conjunto com o tempo de propagação na amostra e as amplitudes refletidas para calcular tanto a impedância quanto a atenuação na amostra. Este trabalho também fornece uma extensa lista de materiais e suas propriedades aproximadas, conforme determinado usando a técnica descrita. No entanto, é importante destacar que o referido trabalho não contempla uma correção para a difração, optando por uma estimativa em função das variações de amplitude, fixada em cerca de 1 dB. É importante observar que 1 dB equivale a aproximadamente 12% em uma escala linear e os resultados são reportados sem suas respectivas incertezas. Embora o título do artigo destaque explicitamente que os valores são aproximados, é notável que esses resultados permanecem sendo utilizados como referência por diversos autores em trabalhos subsequentes até a atualidade.

1.2.2. O método da transmissão ultrassônica

Como trabalho relevante utilizando a análise do método da transmissão ultrassônica podemos citar o realizado por Ginzel e Turnbull (2016). O método utilizado em suas medições, um tanque com sistema de alinhamento, pose ser resumido na Figura 2. Essa abordagem é comumente conhecida como transmissão direta. O alinhamento preciso entre o transmissor e o receptor é necessário para alcançar o máximo do sinal transmitido através da água antes da introdução da amostra para análise.

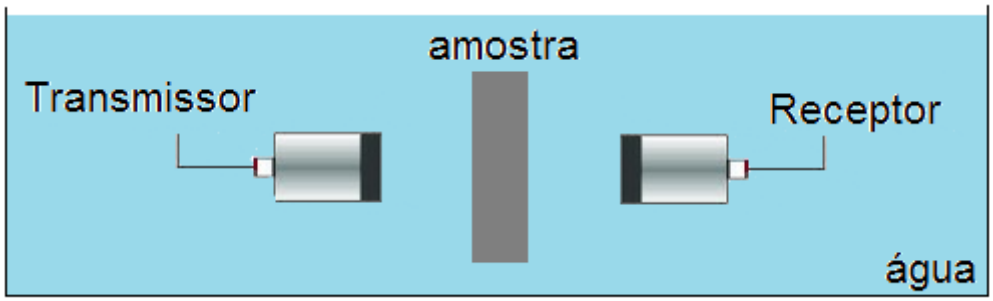


Figura 2 – Tanque de ensaios na configuração de transmissão acústica.
Fonte: elaboração própria.

Uma vez que a amostra é inserida, ocorre uma alteração tanto na amplitude quanto no tempo de atraso do sinal captado. Em casos em que a velocidade acústica do material é superior à da água, observa-se uma redução no tempo. Por outro lado, para materiais com velocidade inferior à da água, há um aumento na posição temporal do sinal.

Ginzel e Turnbull (2016) também disponibilizaram um software na forma de uma planilha Excel projetado para criar gráficos e calcular propriedades de materiais a partir de formas de onda capturadas, tanto seja por técnicas de transmissão direta ou pulso eco. Nesse trabalho foi incluída uma correção para a perda por atenuação que leva em consideração a espessura da amostra utilizada. No entanto, é importante notar que não foi abordada a redução da amplitude do sinal devido à divergência do feixe ultrassônico por refração. Como a distância entre a fonte e o receptor é ajustável, espera-se que, para o mesmo material, os resultados variem devido ao posicionamento da amostra, conforme ilustrado na Figura 3. Trata-se novamente de um método aproximado para determinação das propriedades acústicas dos materiais, sem análise completa de incertezas, sendo utilizado como referência em trabalhos subsequentes.

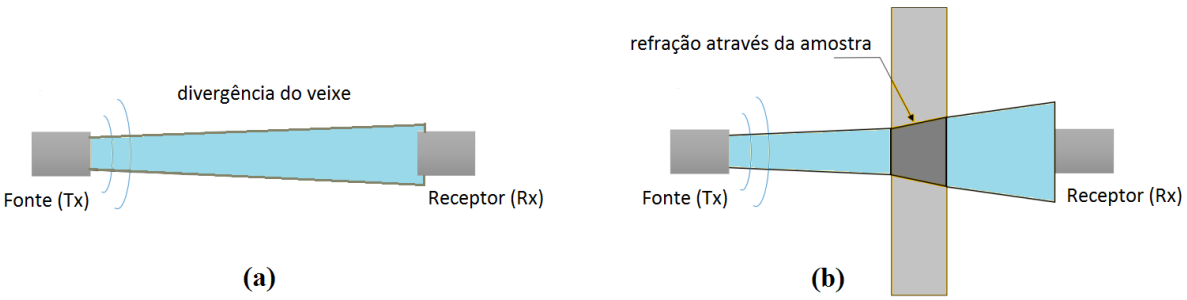


Figura 3 – Divergência do feixe: (a) na água, (b) divergência com amostra inserida.
Fonte: elaboração própria.

Na configuração de transmissão direta, ao se calcular a razão entre a amplitude do sinal com a amostra e a amplitude sem a amostra, o resultado não representa o coeficiente

de transmissão, mas sim a perda por inserção da amostra. O cálculo do coeficiente de transmissão depende da aplicação adequada de correções para atenuação e divergência.

1.2.3. O método do tubo de impedância

O método consiste na emissão de um sinal acústico dentro de um tubo com ar que se propaga incidindo e refletindo na amostra de material. Microfones distribuídos ao longo do tubo registram a variação na pressão sonora e estimam a velocidade das partículas do meio, proporcionando a obtenção de dados que são utilizados na obtenção da impedância acústica do material. No estudo conduzido por Pang *et al.* (2017) o método empregado na faixa audível foi adaptado para trabalhar com ultrassom. Nessa adaptação, o tubo foi preenchido com água pressurizada e hidrofones foram empregados em substituição aos microfones convencionais. A configuração específica adotada do sistema de medição pode ser visualizada na Figura 4.

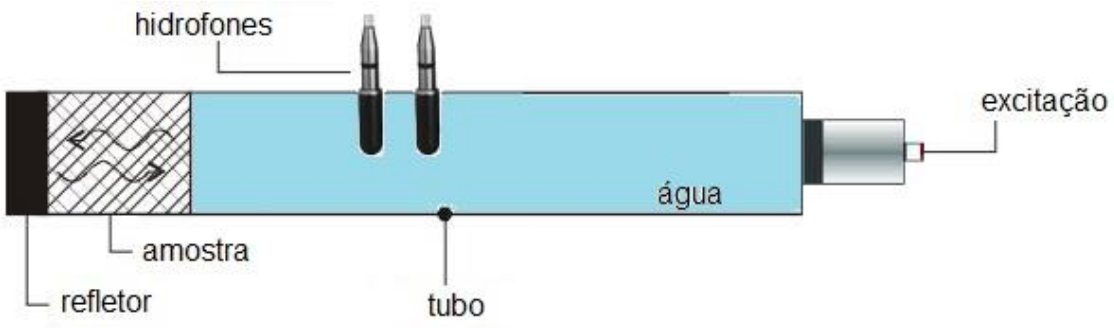


Figura 4 – Tubo de impedância ultrassônica.
Fonte: elaboração própria.

Apesar da relevância do estudo realizado por Pang *et al.* (2017), o método apresentado utiliza apenas a região de 100 Hz a 5000 Hz comparando os resultados com valores teóricos. O sistema não foi devidamente validado para frequências ultrassônicas, apesar dos sensores utilizados serem capazes de atingir este objetivo. Estudos subsequentes deveriam considerar a "sombra" que o hidrofone a1 sofre devido ao hidrofone a2, pois acusticamente eles não são transparentes para a água.

1.2.4. Transdutores esféricos e hemisféricos

Com o avanço das tecnologias inovadoras na fabricação de transdutores, a obtenção de transdutores piezoelétricos com formatos especiais, que outrora apresentava desafios significativos, embora já existissem, está se tornando mais acessível no mercado. Este avanço representa uma abertura significativa de possibilidades para o desenvolvimento de aplicações especiais, incorporando o uso de transdutores esféricos e hemisféricos,

conforme exemplificado na Figura 5. Esses transdutores miniaturizados estão sendo aplicados no desenvolvimento de novas técnicas de medição, como evidenciado nos estudos de CHEN, XIE, *et al.* (2022) sobre a medição de estruturas curvas utilizando transdutor hemisférico; SADEGHPOUR, MEYERS, *et al.* (2019) com o desenvolvimento de um transdutor esférico para comunicação acústica submarina e ZHANG, WANG, *et al.* (2021) com o desenvolvimento de transdutor esférico para hidroacústica de alta frequência.



Figura 5 – Transdutores piezoelétricos: esférico e hemisférico.
Fonte: catálogo PI (Physik Instrumente - Auburn - USA).

1.3. Lacunas no conhecimento existente

Nos trabalhos recentes sobre métodos ultrassônicos, pouco se trata da influência da difração nas medições. Exceções são encontradas por exemplo nos trabalhos de Alia (2020), Feng *et al.* (2018) e Hanane *et al.* (2016). No entanto, as correções propostas se mostram por vezes complexas e um modelo simplificado, mas realista e efetivo, seria útil na implementação prática dos métodos de medição. A correção de difração proposta neste trabalho será embasada na utilização da simetria do campo acústico gerado por transdutores omnidirecionais, que possuem a propriedade de divergir proporcionalmente ao inverso da distância até o centro da fonte emissora.

Os métodos de medição descritos até o momento dependem das distâncias envolvidas no sistema de medição e geralmente são calibrados através de materiais padrão e, após este procedimento, são substituídos pelas amostras que serão medidas, devendo ocupar a mesma posição do material de referência utilizado. No método que está sendo proposto neste trabalho, a utilização de dois transdutores e as condições de simetria pretendem simplificar o alinhamento do sistema e tornar o sistema menos dependente da fixação da geometria do sistema de medição.

No presente trabalho foi realizada uma análise de incertezas nos resultados, visando assegurar uma maior confiabilidade metrológica nas propriedades acústicas dos materiais

ensaiados. A análise de incertezas é uma ferramenta importante para delimitar a faixa de validade do método proposto, funcionando também como garantia da reprodutibilidade dos resultados. Além disso, essa abordagem possibilita a avaliação da precisão, sensibilidade e robustez do método desenvolvido, contribuindo assim para uma compreensão mais abrangente e confiável na determinação das propriedades acústicas dos materiais.

1.4. História da piezoeletricidade

Em 1880, os irmãos Pierre Curie e Jacques Curie trabalhando como assistentes de laboratório na Faculdade de Ciências de Paris descobriram que a aplicação de pressão a cristais de quartzo, turmalina ou sal de Rochelle criavam uma carga elétrica na superfície desses materiais. Esta conversão de energia mecânica em energia elétrica foi chamada de efeito piezoelétrico (KATZIR, 2006). O efeito inverso, de que a aplicação de um campo elétrico a estes materiais deveria provocar a geração interna de uma deformação mecânica, foi previsto por Gabriel Lippman em 1881, através de dedução matemática a partir de princípios termodinâmicos fundamentais. O efeito piezoelétrico inverso foi rapidamente demonstrado pelos irmão Curie por meio de experimentação (MOULD, 2007).

A primeira aplicação prática da descoberta foi a criação do eletrômetro de quartzo, que permitiu a medição da radioatividade (MOLINIÉ, BOUDIA, 2009). Porém, a grande difusão da utilização do efeito piezoelétrico se deu pela criação em um dispositivo piezoelétrico denominado Sonar (Sound Navigation and Ranging). Este detector ultrassônico de submarino foi desenvolvido em 1917, durante a Primeira Guerra Mundial, por Paul Langevin, que foi um dos alunos de Pierre Curie. O dispositivo consistia em um transdutor feito de finos cristais de quartzo cuidadosamente colados entre duas placas de aço e um transdutor similar para detectar o eco de retorno. O transdutor emite uma onda acústica de alta frequência. Medindo o tempo necessário para ouvir o eco das ondas acústicas retornando de um objeto, a distância até o objeto podia ser calculada.

1.5. Modelagem de um transdutor piezoelétrico

Como um dispositivo de medição, o transdutor piezelétrico desempenha um papel muito importante nos sistemas hidroacústicos e seu desempenho tem uma grande influência na precisão da medição. Os principais métodos de pesquisa para o estudo do funcionamento dos transdutores piezelétricos são baseados no modelo de elementos

finitos ou modelo de circuito elétrico equivalente (ETTER, 2003). *Softwares* de simulação de elementos finitos, dividem o transdutor em várias células pequenas que são chamadas de elementos finitos e, em seguida, um valor aproximado da solução que satisfaça todas as condições da equação de onda pode ser obtido por meio de aproximação matemática (TREEBY, BUDISKY, *et al.*, 2018). O modelo de elementos finitos possui alta precisão e ampla gama de aplicações, mas possui um custo computacional alto e exige desempenho do computador. Por outro lado, a velocidade de cálculo do modelo de circuito equivalente é precisa e rápida sendo a simulação mais fácil de ser aprimorada otimizando o modelo. No modelo de circuito equivalente, o transdutor é modelado por um circuito elétrico equivalente ao modelo de linha de transmissão. O modelo de Mason (MORRIS, HUTCHENS, 1986) e o KLM (CASTILLO, ACEVEDO, *et al.*, 2003) são os mais comumente utilizados. Ambos os modelos contêm uma seção elétrica e uma seção mecânica onde o acoplamento entre essas duas partes é realizado por um transformador. Uma desvantagem deste transformador é que ele não permite flexibilidade na escolha do tipo de circuitos equivalentes e pode levar a elementos de impedância irrealizáveis. O modelo de Leach, Figura 6, propõem usar uma fonte controlada em vez de transformador para alcançar o acoplamento (LEACH, 1994).

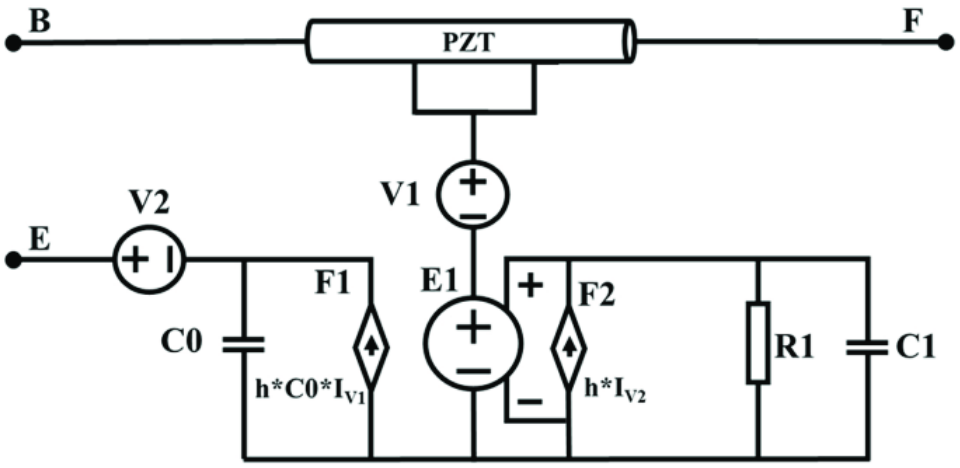


Figura 6 – Modelo de linha de transmissão de Leach para o transdutor piezelétrico
Fonte: (SHEN, XU, *et al.*, 2021) sob licença pública CC BY 4.0
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.pt-br

Este modelo de circuito equivalente do transdutor ultrassônico piezoelétrico é uma aproximação razoável. No entanto, a estrutura deste modelo não está completa, por não refletir a propagação de ondas acústicas nas camadas que compõem os eletrodos, suporte e outras estruturas. Um estudo mais aprofundado de todas as características elétricas e

mecânicas do material utilizado na cerâmica e dos materiais que compõem as diversas camadas do hidrofone permite uma simulação mais precisa da conversão eletromecânica (ZHENG, MAO, *et al.*, 2018). O foco deste trabalho não foi a modelagem do transdutor piezoelétrico e simulação do campo acústico por este gerado. Portanto, para fins de planejamento dos experimentos, foi utilizado o pacote gratuito k-Wave de simulação do MATLAB (MathWorks®, USA) (TREEBY, BUDISKY, *et al.*, 2018, TREEBY, COX, 2011).

1.6. Impedância acústica de uma onda plana

A impedância na área da acústica refere-se à medida da resistência que um meio apresenta a passagem das ondas sonoras quando sujeito à aplicação da pressão acústica. Algumas definições amplamente aceitas baseiam-se em aplicações específicas e são relacionadas abaixo (BERANEK, MELLOW, 2012):

- A impedância mecânica, $\boldsymbol{Z_M}$ (força/velocidade da partícula), usada no cálculo do acoplamento entre ondas acústicas e uma fonte acionadora ou carga acionada.
- A impedância acústica, $\boldsymbol{Z_A}$ (pressão/velocidade volumétrica), um termo útil na discussão da radiação acústica de superfícies vibrantes e a transmissão dessa radiação através de elementos acústicos ou através de tubos.
- A impedância acústica específica, $\boldsymbol{Zs}$ (pressão/velocidade da partícula), propriedade característica do meio e do tipo de onda que está sendo propagada.

A impedância acústica $\boldsymbol{Z_A}$ é uma propriedade representada na forma complexa porque o fluxo volumétrico e a pressão não estão necessariamente em fase. Esta definição de impedância tem forte dependência com a frequência (HIREMATH, KUMAR, *et al.*, 2021). A analogia com a impedância elétrica é limitada para fluídos incompressíveis. Por exemplo, o ar é compressível, então o fluxo não obedece à lei de Kirchhof para correntes (GHORBANIASL, SIOZOS-ROUSOULIS, *et al.*, 2016).

A definição de impedância utilizada neste trabalho será a de impedância acústica específica (BERANEK, MELLOW, 2012), que é a razão complexa entre a pressão acústica $\boldsymbol{p}$ [$N\ m^{-2}$] e velocidade da partícula $\boldsymbol{u}$ [$m\ s^{-1}$], Equação (1.1):

$$\boldsymbol{Z_S} = \frac{\boldsymbol{p}}{\boldsymbol{u}}\ [N\ s\ m^{-3}] \tag{1.1}$$

Para uma onda plana progressiva em um meio infinito e homogêneo, a pressão e a velocidade das partículas estão em fase (KINSLER, FREY, *et al.*, 2000). Neste caso, o módulo da velocidade da partícula é dado por:

$$|\boldsymbol{u}| = \frac{p}{\rho_0 c} \tag{1.2}$$

Observe que a Equação (1.2) é uma relação que envolve duas velocidades: a velocidade de movimento das partículas do meio *u* e a velocidade de deslocamento da onda acústica *c*, além da massa específica ρ_0.

Assim, a impedância acústica específica do meio, substituindo a Equação (1.2) na Equação (1.1), nas condições de contorno de onda plana, apresenta a forma simplificada conhecida como impedância acústica característica do meio z_0, sendo um número real:

$$z_0 = \rho_0 c \ \ [N\ s\ m^{-3}] \tag{1.3}$$

Esta definição adotada permanece independente da frequência (SKUDRZYK, 1971) e é obtida através da multiplicação da velocidade de grupo da onda acústica *c* [$m{\cdot}s^{-1}$] do meio pela sua massa específica ρ_0 [$kg{\cdot}m^{-3}$]. O múltiplo da impedância acústica característica [$10^6\ N\ s\ m^{-3}$], também é referido como [MRayl], sendo comumente utilizada para denotar esta quantidade física.

Embora a impedância acústica característica de um meio seja uma quantidade real para ondas planas, isto não se aplica as ondas planas estacionárias ou ondas divergentes. A impedância acústica característica tem uma grande significância para a caracterização do meio pois está conectada as suas propriedades elásticas (KHAIRI, IBRAHIM, *et al.*, 2019).

1.7. Impedância acústica de uma onda esférica

No caso de uma fonte acústica esférica pulsátil em meio homogêneo e isotrópico, diferentemente das ondas planas, a velocidade das partículas não está em fase com a pressão. Este tipo de fonte produz uma onda acústica simétrica em que a pressão e a velocidade são representadas abaixo (KINSLER, FREY, *et al.*, 2000):

$$\boldsymbol{p}(r,t) = \frac{A}{r} e^{j(\omega t - kr)} \tag{1.4}$$

$$\boldsymbol{u} = \frac{\boldsymbol{p}}{\rho_0 c}\left(1 - \frac{j}{kr}\right) \tag{1.5}$$

onde, $k = 2\pi/\lambda$ é o número de onda angular (radianos por metro)
r é o raio da esfera pulsátil
ω é a frequência angular

Para ondas esféricas, a impedância acústica específica do meio, conforme a definição da Equação (1.1), assume a forma:

$$\boldsymbol{Z_S} = \rho_0 c \frac{kr}{\sqrt{1 + (kr)^2}} e^{j\emptyset} \tag{1.6}$$

em que, $cot\ (\emptyset)\ = kr$

Como, $k = 2\pi/\lambda$, o ângulo $\emptyset$ é uma função da razão entre a distância da fonte e o comprimento de onda. A diferença de fase entre a pressão complexa e a velocidade da partícula é significativa para distâncias inferiores ao comprimento de onda na fonte. No caso de distâncias de vários comprimentos de onda a pressão e a velocidade estão quase em fase, e a onda esférica assume características de onda plana (KINSLER, FREY, *et al.*, 2000). Esse comportamento pode ser mais bem visualizado ao se reescrever a Equação (1.6) na forma:

$$Z_S = \rho_0 c \frac{(kr)^2}{1 + (kr)^2} + j\rho_0 c \frac{kr}{1 + (kr)^2} \tag{1.7}$$

Para valores elevados de kr, o termo da parte real aproxima-se de $z_0 = \rho_0 c$ e o termo imaginário aproxima-se de zero.

O valor da pressão em uma onda esférica representa 99% do termo resistivo na propagação de energia para o campo acústico quando $kr = 10$. Isto corresponde a uma distância de dez comprimentos de onda da fonte para uma dada frequência. Quando essa condição é alcançada, o termo imaginário pode ser desconsiderado e a impedância é quase puramente resistiva e aproximadamente igual à impedância acústica característica de uma onda plana (BERANEK, MELLOW, 2012).

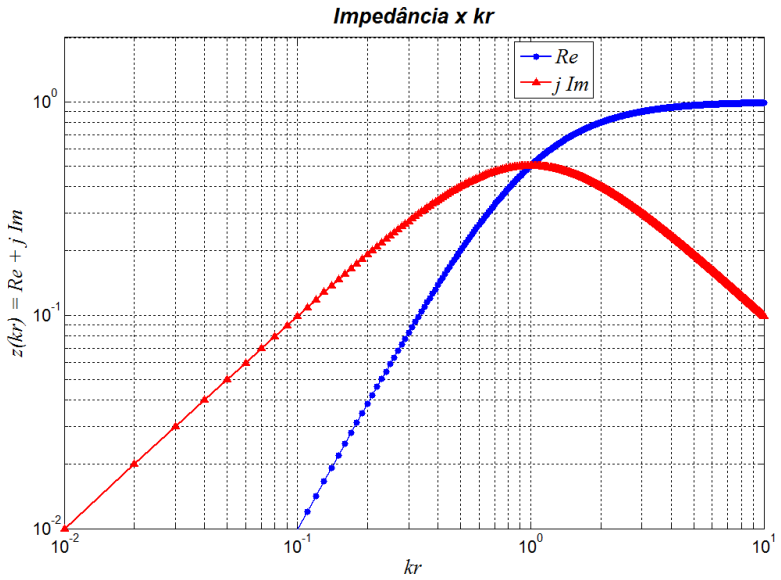


Figura 7 – Impedância acústica da onda esférica em função de kr.
Fonte: elaboração própria.

1.8. A transmissão e reflexão na incidência normal da onda acústica plana

As técnicas comumente utilizadas para medir as propriedades acústicas de materiais utilizam fontes de ondas planas ou suas aproximações. A pressão acústica gerada por uma onda plana é diretamente proporcional à impedância acústica característica do meio, permitindo sua determinação (ALLARD, 1993, HIREMATH, KUMAR, *et al.*, 2021).

Uma onda plana, ao atingir em incidência normal a fronteira de dois meios com impedâncias acústicas diferentes, tem parte da energia refletida e parte transmitida para o segundo meio. Como a onda plana é uniforme, sua energia é proporcional a intensidade (energia/área). A intensidade I está relacionada à amplitude de pressão acústica p e velocidade do som c pela Equação (1.8) (KINSLER, FREY, *et al.*, 2000):

$$I = \frac{p^2}{\rho c} \tag{1.8}$$

A razão entre a intensidade da onda refletida e a onda incidente é conhecida como coeficiente de reflexão, denotado por R_I. Enquanto a razão da intensidade da onda transmitida pela onda incidente é referida como coeficiente de transmissão T_I. Conforme o princípio da conservação da energia, $R_I + T_I = 1$. O coeficiente de reflexão em energia é definido pela Equação (1.9), enquanto o coeficiente de transmissão, pela Equação (1.10). Ambos são dependentes da impedância acústica característica de cada meio (KINSLER, FREY, *et al.*, 2000).

$$R_I = \left(\frac{z_2 - z_1}{z_2 + z_1}\right)^2 \tag{1.9}$$

$$T_I = \frac{4z_2 z_1}{(z_2 + z_1)^2} \tag{1.10}$$

em que, z_1 representa a impedância acústica característica do meio de origem
z_2 representa a impedância acústica característica do meio transmitido

Como a intensidade acústica é diretamente proporcional ao quadrado da pressão, a reflexão e a transmissão também podem ser definidas em termos da continuidade da amplitude da pressão acústica, em que $1 + R = T$. Assim, a reflexão em amplitude pode ser descrita pela Equação (1.11), enquanto a transmissão em amplitude pela Equação (1.12) (KINSLER, FREY, *et al.*, 2000).

$$R = \frac{z_2 - z_1}{z_2 + z_1} \tag{1.11}$$

$$T = \frac{2z_2}{z_2 + z_1} \tag{1.12}$$

É importante notar que, no caso de $z_1 > z_2$, o índice de reflexão é negativo, ocorrendo a inversão da fase em 180º do sinal de pressão refletido. Outra peculiaridade é que a amplitude da onda transmitida pode ser maior que a onda incidente, caso $z_2 > z_1$, sem violar o princípio da conservação da energia (KINSLER, FREY, *et al.*, 2000).

Como os transdutores piezoelétricos são sensores de pressão acústica, utilizaram-se as definições das Equações (1.11) e (1.12) neste trabalho. Um resumo comparativo destas definições pode ser visto na Figura 8.

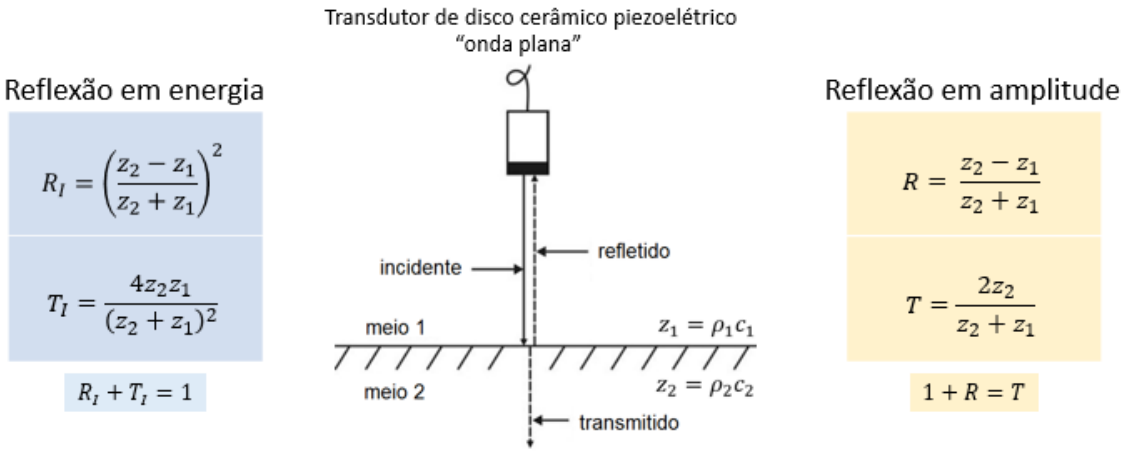


Figura 8 – Relações entre a impedância acústica e a incidência norma da onda plana.
Fonte: elaboração própria.

1.9. Impedância obtida por reflexão da onda plana com incidência oblíqua

A reflexão de uma onda plana com incidência oblíqua descreve o fenômeno que ocorre quando uma onda encontra uma interface entre dois meios com distintas propriedades e a incidência não se dá de forma perpendicular à superfície da interface. Ao se examinar o comportamento dessas ondas planas ao atingirem a interface sob um ângulo não perpendicular, podemos extrair informações sobre as propriedades acústicas do meio. Especificamente, ao considerar a análise como se a onda estivesse incidindo normalmente (perpendicularmente), é possível determinar a impedância acústica do meio. Um diagrama esquemático de como ocorre este tipo de interação pode ser visto na Figura 9. Se a velocidade acústica do meio 2 (c_2) for menor que a do meio 1 (c_1), a onda será refratada em direção à normal (linha perpendicular à superfície de interface) ao passar da interface. Se c_2 for maior que c_1, a onda será refratada para longe da normal (KINSLER, FREY, *et al.*, 2000).

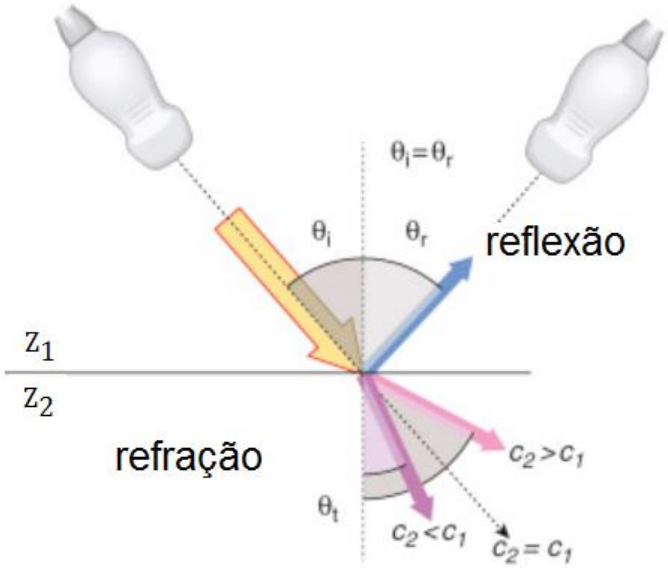


Figura 9 – Incidência obliqua da onda plana.
Fonte: elaboração própria.

A impedância acústica do meio 2 pode ser determinada por meio da projeção para a incidência normal, Equação (1.13), conforme descrito em (PIERCE, 2019).

$$z_2 = \frac{z_1}{cos(\theta_i)} \frac{(1+R)}{(1-R)} \tag{1.13}$$

O coeficiente de reflexão R pode ser obtido através da calibração do sistema utilizando um alvo altamente refletor. A utilização de um metal denso como o aço (7,8 g/cm^3) produz uma reflexão de aproximadamente 93,8 % na amplitude do sinal de

pressão acústica quando imerso em água (1,0 g/cm^3), para $\theta_i = 0$. A dificuldade técnica neste tipo de procedimento é garantir que o ângulo entre os transdutores será mantido na troca do material sob ensaio e que a distância até a amostra não se altere. Para a calibração do sistema com outro tipo de material, pode-se utilizar a seguinte relação:

$$R = \frac{z_2 - z1/cos\theta_i}{z_2 + z1/cos\theta_i} \tag{1.14}$$

Um arranjo experimental que pode ser utilizado neste tipo de medição foi desenvolvido por PIALUCHA e CAWLEY (1994), possibilitando o alinhamento simétrico dos transdutores através de dois braços articulados em um eixo de rotação. O dispositivo se assemelha a um "macaco sanfona" utilizado para o levantamento de veículos para troca de pneus. O dispositivo é construído com uma série de ajustes de precisão para garantir o alinhamento correto das amostras, conforme visto na Figura 10.

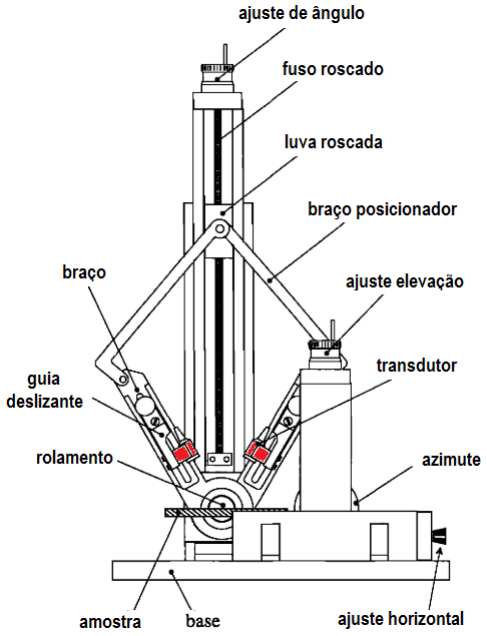


Figura 10 – Dispositivo para estudo da incidência oblíqua da onda plana.
Fonte: adaptado de (PIALUCHA, CAWLEY, 1994).

1.10. Transdutores de onda plana com polarização axial

Para simplificar as medições realizadas em acústica, a maioria dos métodos desenvolvidos utiliza a aproximação de ondas planas. A forma mais simples de se obter parcialmente este tipo de onda é a utilização de transdutores piezoelétricos em forma de disco com uma polarização na espessura (axial). O campo acústico gerado por este tipo de transdutor é direcional e requer alinhamento adequado do sistema de medição. O campo gerado por este tipo de transdutor pode ser visto na Figura 11.

A Figura 11a destaca a divergência do feixe e a Figura 11b a diretividade. Alinhar o sistema com precisão e gerenciar a divergência do feixe introduz incertezas na determinação da impedância acústica (FENG, JIAN-XIN, *et al.*, 2018).

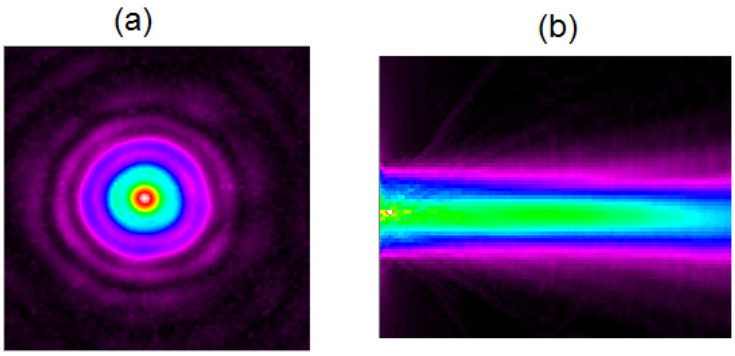


Figura 11 – Campo acústico de um transdutor de disco, (a) plano frontal, (b) plano lateral.
Fonte: elaboração própria.

A vantagem de se utilizar este tipo de transdutor é que o campo acústico pode ser considerado plano na região central, dentro de uma certa faixa de distâncias. A simplicidade desta abordagem justifica o uso preferido de transdutores de disco. Porém, para receber um sinal estável, é necessário garantir que a medição seja feita no campo distante da pressão sonora. O campo distante é a distância, a partir da face do transdutor, onde a amplitude da pressão acústica diminui exponencialmente, devido à divergência (FOOTE, 2014), como visto na Figura 12 . O campo distante d da fonte acústica pode ser estimado pela Equação (1.15), em que λ é o comprimento de onda gerado e a, o raio do disco piezoelétrico (FOOTE, 2014).

$$d = \frac{4a^2}{\lambda} \tag{1.15}$$

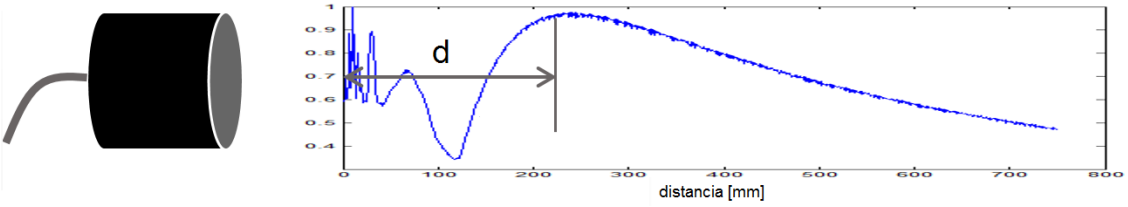


Figura 12 – Mapeamento axial central para localizar o início do campo distante (*d*).
Fonte: elaboração própria.

A divergência do feixe no transdutor de disco com polarização radial pode afetar as medições de velocidade e absorção da onda acústica (LÉVÊQUE, ROSENKRANTZ, *et al.*, 2007), assim como em medições de atenuação acústica (FENG, JIAN-XIN, *et al.*, 2018), sendo necessário a aplicação de correções.

1.11. Transdutores de onda esférica com polarização radial

Transdutores piezoelétricos de geometria cilíndrica podem ser polarizados radialmente para produzir campos acústicos quase omnidirecionais (LI, Haoran, HU, *et al.*, 2022, XU, LIN, *et al.*, 2019), caso suas dimensões sejam menores que o comprimento de onda por eles gerado. Idealmente a geometria esférica seria a mais adequada, porém a construção do transdutor possui grandes dificuldades técnicas (ZHANG, WANG, *et al.*, 2021). O cilindro piezoelétrico polarizado radialmente é uma boa aproximação para geração do campo esférico, assim como o disco com polarização axial é para a geração de uma onda plana. No campo esférico, muito próximo à superfície ao redor do transdutor, a diferença de fase entre a pressão e a velocidade das partículas é grande. Por outro lado, este efeito desaparece após alguns comprimentos de onda de distância da fonte emissora. Longe da fonte, $kr > 10$, a pressão e a velocidade já estão praticamente em fase (PIERCE, 2019). A pressão acústica diminui de acordo com a lei do inverso da distância a partir do centro do transdutor (BERANEK, MELLOW, 2012). Embora a modelagem matemática precise considerar a divergência do campo acústico (BURAK, ERDEN YILDIZDAG, *et al.*, 2022), a utilização desta propriedade simplifica o alinhamento do sistema de medição. A Figura 13 ilustra a simetria do campo acústico produzido por um transdutor cilíndrico.

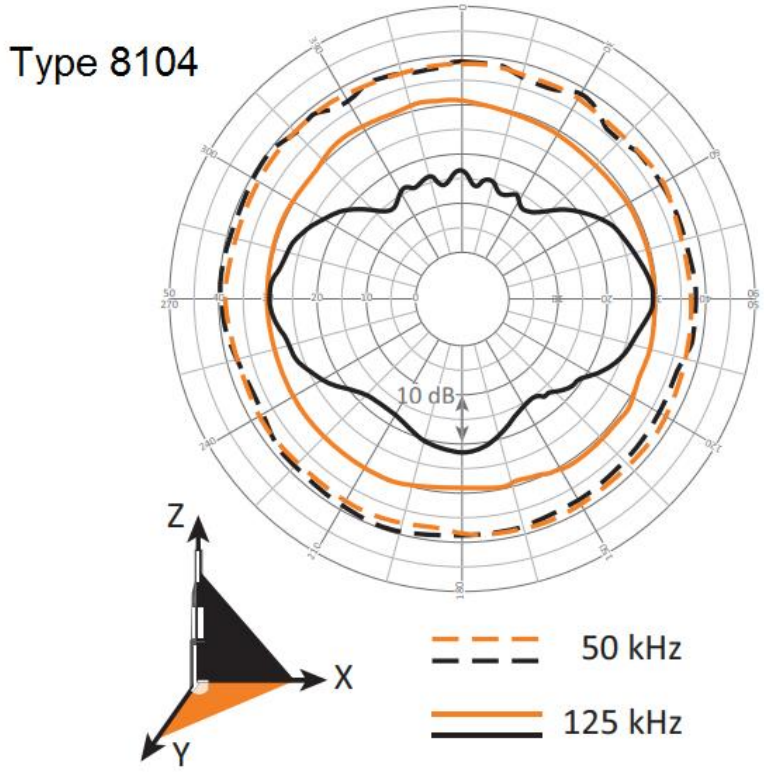


Figura 13 – Padrão de diretividade espacial de um transdutor piezoelétrico radial. Fonte: adaptado de (BRUEL & KJAER, 2023).

Na Figura 13 vemos que o campo acústico é omnidirecional no plano XY, linhas laranjas, na faixa de frequências de 50 kHz a 125 kHz. Porém seu uso é limitado no plano XZ, linhas pretas, para a frequência de 50 kHz. A utilização deste tipo de transdutor em medições acústicas com aplicações práticas é um dos objetivos deste trabalho.

1.12. Os módulos de elasticidade e correlação com a velocidade de propagação

O módulo de Young, também conhecido como módulo de elasticidade, é uma propriedade mecânica fundamental dos materiais que descreve sua capacidade de deformação elástica quando sujeitos a uma força externa. Ele normalmente é representado pela letra (E), sendo uma medida da resistência de um material à deformação elástica unidimensional, por exemplo, a alteração relativa ao comprimento.

A expressão para o módulo de Young, considerando "tensão" como força aplicada sobre uma área, é dada por:

$$E = \frac{tensão}{deformação} \tag{1.16}$$

O Módulo de Young é expresso em unidades de pressão, por exemplo Pascal [Pa] no Sistema Internacional de Unidades (SI). Quanto maior o valor do módulo de Young, mais rígido é o material. É importante notar que o módulo de Young é aplicável apenas à região elástica do comportamento do material. Se a deformação ultrapassar o limite de elasticidade, o material pode sofrer deformação plástica ou até mesmo falhar. O módulo de Young é uma propriedade importante para projetar estruturas e componentes, pois influencia diretamente a resposta elástica dos materiais sob carga (MALHOTRA, CARINO, 2003).

O módulo de cisalhamento, representado pela letra (G), é uma propriedade mecânica de um material que descreve sua capacidade de deformação transversal sob tensão de cisalhamento. Enquanto o módulo de Young está associado à deformação elástica em resposta à tensão de tração ou compressão, o módulo de cisalhamento está relacionado à deformação elástica em resposta à tensão cisalhante.

Em um estado de cisalhamento, as camadas de um material deslizam umas sobre as outras. O módulo de cisalhamento é a razão entre a tensão de cisalhamento (força

tangencial por unidade de área) e a deformação por cisalhamento (alteração angular relativa). A expressão matemática para o módulo de cisalhamento é dada por:

$$G = \frac{tensão\ cisalhante}{deformação\ cisalhante} \tag{1.17}$$

Assim como o módulo de Young, o módulo de cisalhamento é expresso em unidades de pressão, Pascal [Pa] no Sistema Internacional de Unidades (SI).

O módulo de cisalhamento é uma propriedade importante em aplicações em que ocorre deformação angular, como em elementos estruturais sujeitos a torção. Por exemplo, é relevante em projetos de eixos, vigas torcidas e outros componentes que experimentam tensões de cisalhamento. O valor do módulo de cisalhamento é influenciado pela estrutura molecular do material e sua resistência ao deslizamento das camadas atômicas ou moleculares (MALHOTRA, CARINO, 2003).

O módulo de Bulk, também conhecido como módulo de compressibilidade, é uma propriedade mecânica que descreve a resposta de um material à compressão volumétrica. Ele é denotado pela letra (K) e é utilizado para caracterizar a rigidez de um material em relação a mudanças em seu volume quando sujeito a uma pressão externa (MALHOTRA, CARINO, 2003).

Quando um material é submetido a uma pressão uniforme de compressão, ele sofre uma redução no volume. O módulo de Bulk é a razão entre a pressão aplicada e a diminuição relativa no volume do material. A expressão matemática para o módulo de Bulk é dada pela Equação (1.18). O módulo de Bulk também é expresso em unidades de pressão [Pa] (MALHOTRA, CARINO, 2003).

$$K = \frac{p}{\Delta V / V} \tag{1.18}$$

O módulo de Bulk é particularmente importante em estudos de elasticidade de materiais, especialmente na análise de comportamento sob pressão. Ele é frequentemente utilizado em contextos relacionados à geologia, mecânica dos solos e engenharia de materiais, em que as propriedades de compressibilidade volumétrica são cruciais para compreender o comportamento de materiais sujeitos a cargas compressivas.

Na Figura 14 é apresentado um quadro resumo com as expressões dos módulos de elasticidade associados a um material.

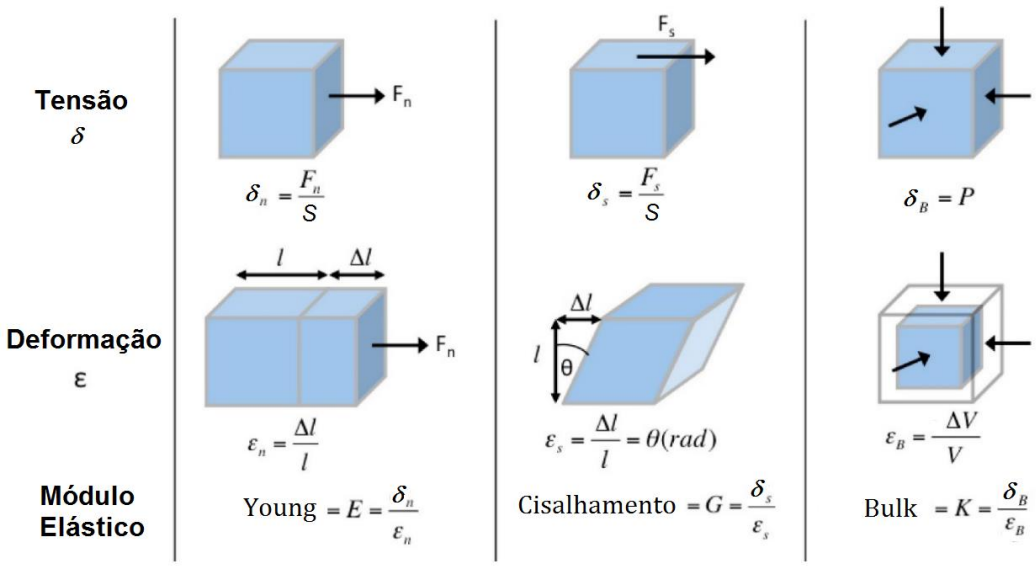


Figura 14 – Quadro resumo dos módulos de elasticidade
Fonte: adaptado de (SIGRIST, LIAU, *et al.*, 2017).

Existem dois tipos de propagação de ondas em ultrassom: ondas longitudinais e ondas de cisalhamento ou transversais. As ondas longitudinais têm movimento de partículas paralelo à direção de propagação da onda e são relacionados ao módulo de Bulk (SIGRIST, LIAU, *et al.*, 2017), como:

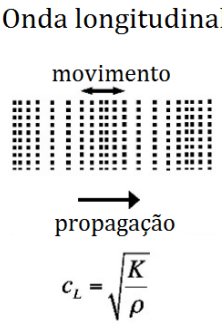


Figura 15 – Velocidade de propagação longitudinal (c_L).
Fonte: elaboração própria

Ondas de cisalhamento têm movimento de partículas perpendicular à direção de propagação da onda e são definidos usando o módulo de cisalhamento por:

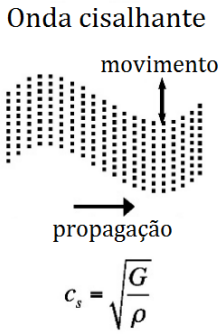


Figura 16 – Velocidade de propagação transversal (c_s).

Fonte: elaboração própria

Os três tipos de deformações e módulos elásticos não são independentes, mas mantêm relações à medida em que o sólido tenta reter seu volume original, cujo processo é descrito pelo coeficiente de Poisson. O coeficiente de Poisson é um parâmetro que descreve a relação entre a deformação lateral (contração ou expansão) e a deformação axial (compressão ou extensão) de um material quando submetido a uma carga. Ele é frequentemente utilizado na teoria da elasticidade e na mecânica dos materiais para caracterizar o comportamento de materiais sob tensão (SIGRIST, LIAU, *et al.*, 2017). O coeficiente de Poisson é adimensional e simbolizado pela letra grega *v* (nu). É definido pela seguinte relação:

$$\upsilon = \frac{\varepsilon_{transversal}}{\varepsilon_{axial}} \tag{1.19}$$

onde, υ é o coeficiente de Poisson
$\varepsilon_{transversal}$ é a deformação lateral (ou transversal)
ε_{axial} é a deformação axial

Para a maioria dos materiais, o coeficiente de Poisson está na faixa de 0 a 0,5. Materiais como borracha e esponjas podem ter coeficientes de Poisson próximos a 0,5, indicando que o material se contrai 50 % lateralmente enquanto é esticado axialmente ou se expande lateralmente enquanto é comprimido axialmente. A maioria dos metais e materiais cerâmicos têm coeficientes de Poisson menores (SIGRIST, LIAU, *et al.*, 2017).

1.13. Correlação entre elasticidade e impedância acústica

Uma das aplicações da acústica na área da engenharia civil é a determinação das propriedades elásticas de amostras de concreto a partir de medições ultrassônicas. O parâmetro utilizado para avaliação da rigidez do concreto é a velocidade de propagação do pulso ultrassônico da amostra (MALHOTRA, CARINO, 2003).

A velocidade do pulso ultrassônico, transversal ou longitudinal, é dependente da densidade e da constante elástica do concreto. A velocidade pode ser utilizada para fornecer um indício da qualidade do concreto, pois a redução da velocidade está relacionada a diminuição da sua rigidez.

O módulo de Young do concreto, na área de engenharia civil, é denotado como "módulo dinâmico de elasticidade" E_d. Se considerarmos o concreto como um meio elástico e isotrópico, o módulo elástico pode ser determinado pela Equação (1.20) (KRAUTKRÄMER, KRAUTKRÄMER, 1983). Nesta equação, a velocidade

longitudinal da onda acústica é denotada por (V_L), a massa específica por (ρ) e o coeficiente de Poisson (v).

$$E_d = \frac{V_L^2 \rho (1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} \tag{1.20}$$

Como a impedância acústica é relacionada à velocidade e densidade, pela Equação (1.3), ela pode ser substituída na Equação (1.20) e reescrita nas formas:

$$E_d = z\, V_L \cdot \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} \tag{1.21}$$

$$E_d = \frac{z^2}{\rho} \cdot \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} \tag{1.22}$$

A vantagem da Equação (1.21) na determinação da elasticidade do concreto é que a densidade está implícita na informação de impedância acústica. Isto é útil em aplicações de medição in situ; porém, a espessura do concreto é uma informação necessária para se obter a velocidade.

Em casos em que a medição da velocidade no concreto seja difícil, por exemplo, devido à alta atenuação, a Equação (1.22) pode ser utilizada. Em contrapartida, é necessário colher uma amostra do concreto para determinar sua densidade ou adotar um valor típico a partir de experiências anteriores.

A realização dos testes de módulo de elasticidade apresenta desafios devido à necessidade de utilização de uma quantidade considerável de corpos de prova e equipamentos especializados, conforme a norma ABNT NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2023). A determinação do módulo de elasticidade, sem a necessidade de rompimento de amostras, possibilita a avaliação da capacidade de carga de uma estrutura construída, o que contribui para o monitoramento das condições de segurança da estrutura (HAACH, RAMIREZ, 2016).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Descrição do método proposto de medição de impedância acústica

O método proposto utiliza dois transdutores piezoelétricos com polarização radial dispostos em uma configuração transmissor/receptor (Tx/Rx). O objetivo foi a determinação da impedância acústica característica dos materiais sob ensaio. O passo inicial foi estabelecer experimentalmente o tempo de atraso da instrumentação, medindo-se a amplitude da pressão no receptor em função da distância da fonte ultrassônica. Esta medição também foi utilizada para gerar uma curva de calibração do sistema de medição. Em seguida, medições acústicas de pulsos gaussianos foram realizadas nas amostras selecionadas. O coeficiente de reflexão foi calculado registrando-se simultaneamente os pulsos de pressão incidentes e refletidos. Esses dados adquiridos são então ajustados a um modelo de equação de propagação. Os parâmetros obtidos no processo de ajuste de uma função não-linear aos dados avaliaram: o coeficiente de reflexão, a distância à amostra e o ângulo de incidência do sinal no arranjo experimental. Esses resultados foram utilizados para avaliar a impedância acústica característica do material.

2.2. Descrição dos componentes do sistema de medição

Dois transdutores piezoelétricos modelos 8104 (Brüel & Kjær, Dinamarca) atuam como uma sonda acústica (Figura 17a) em um tanque de teste de água doce (50 × 60 × 70) cm (Figura 17b). O tanque é equipado com um sistema de posicionamento cartesiano automatizado (Figura 17c) modelo XPS Series Motion Controllers (Newport Corporation, USA). A digitalização do sinal é feita utilizando um osciloscópio digital (Figura 17d) modelo DSO7012B (Agilent Technologies, USA). O sinal do transdutor receptor piezoelétrico é condicionado por um amplificador de carga NEXUS (Figura 17e) modelo Type 2692-OS4 (Brüel & Kjær, Dinamarca). O sinal do transdutor transmissor é criado por um gerador de funções arbitrárias (Figura 17f) modelo 33500B (Agilent Technologies, USA).

A temperatura da água foi monitorada durante o experimento. Variações inferiores a 1,0 ˚C não requerem correção e afetam a velocidade de propagação do som na água em apenas 0,2 % (LUBBERS, GRAAFF, 1998). O termômetro utilizado foi o modelo

Hygroclip TH100-B5 (Rotronic, USA) com sensor PT100 classe A, calibrado com incerteza expandida de U (95%) = 0,2 ˚C.

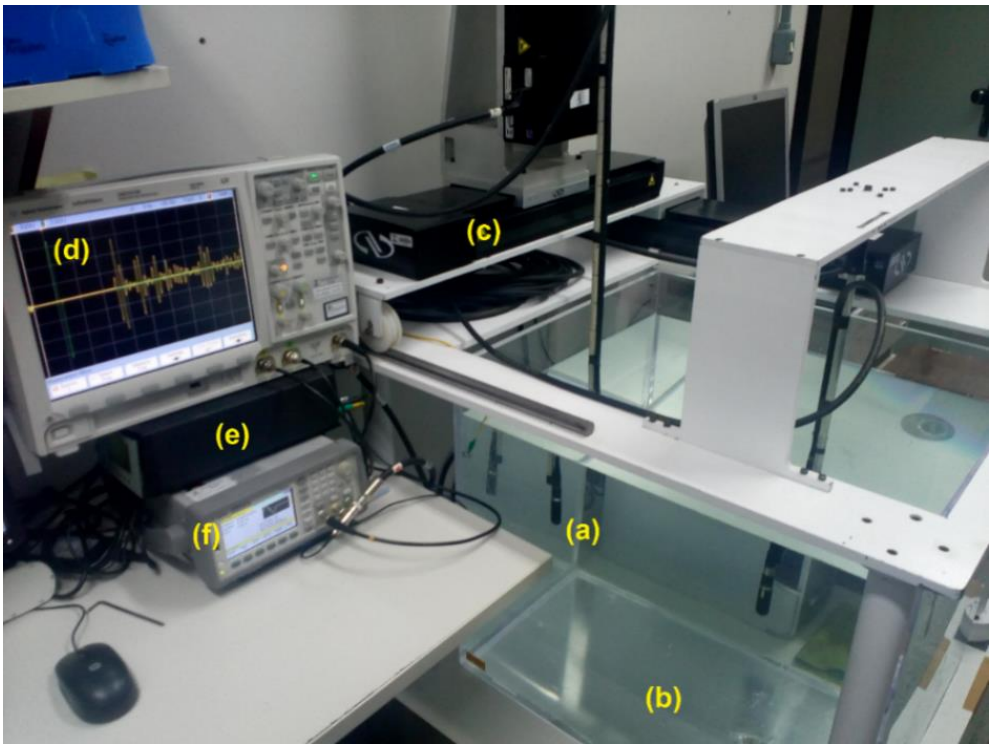


Figura 17 – Sistema de medição; (a) hidrofone; (b) tanque de acrílico; (c) sistema cartesiano de posicionamento; (d) osciloscópio; (e) amplificador de carga; (f) gerador.
Fonte: elaboração própria

O transdutor cilíndrico modelo 8104 possui padrão omnidirecional com as seguintes características relevantes, conforme o catálogo do fabricante (BRUEL & KJAER, 2023):

- Faixa de operação de 0,1 Hz a 125 kHz;
- Omnidirecional até a frequência de 80 kHz com estabilidade de (+/- 2 dB);
- Sensibilidade de tensão nominal: 56 µV/Pa ou (-205 dB re 1 V/µPa);
- Máxima transmissão de 136 dB (re 1 µPa/V @ 1 m) próximo a 65 kHz.

O amplificador de carga NEXUS filtra a resposta do sinal com uma banda de passagem de 10 Hz a 100 kHz e amplifica o sinal elétrico proporcional à pressão com um ganho de 40 dB (× 100). Este amplificador é específico para sensores piezoelétricos e possui alta impedância de entrada.

2.3. Diagrama esquemático do método de medição de impedância acústica

A Figura 18a apresenta as variáveis geométricas envolvidas no modelo de propagação. Um pulso acústico de excitação é produzido pelo transdutor transmissor Tx e se propaga radialmente. O caminho mais curto d_1 é chamado de caminho direto, sendo

a distância igual ao tempo de propagação t_1 entre Tx e Rx multiplicado pela velocidade do som na água (c). Esta fração da frente de onda é a primeira detectada pelo receptor Rx. Uma outra fração do sinal é refletida na superfície da amostra por um ângulo θ, estando a amostra afastada a uma distância H do transmissor Tx. O caminho mais longo d_2 é chamado de caminho refletido e, subsequentemente, é detectado pelo receptor Rx. A distância d_2 pode ser obtida pelo tempo de propagação t_2 multiplicado pela velocidade do som na água (c).

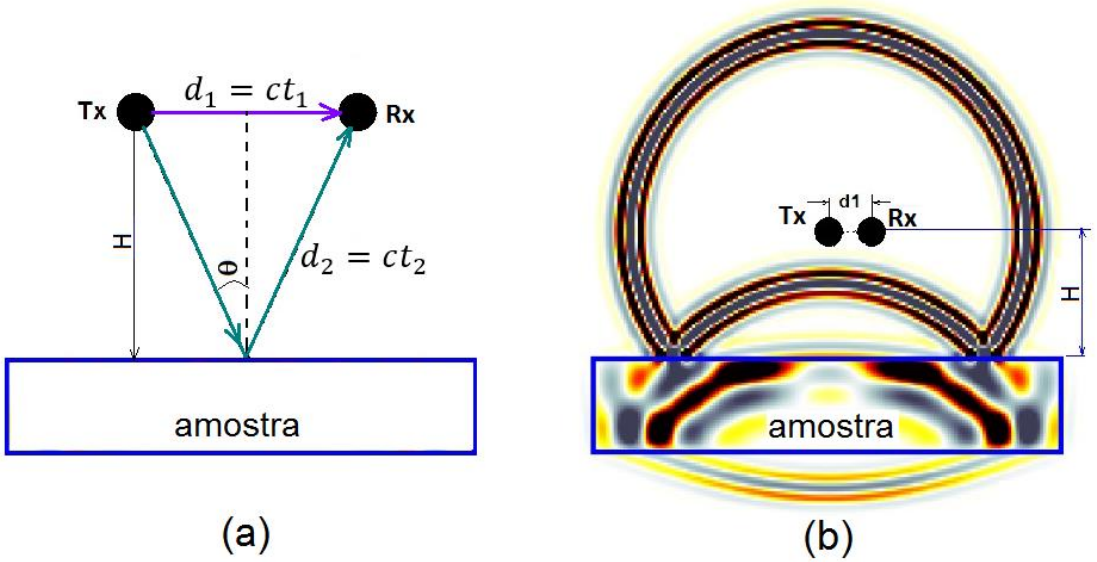


Figura 18 – Modelo de propagação acústica. (a) caminho acústico direto d_1 e caminho refletido d_2; (b) Ilustração da reflexão da frente de onda radial.
Fonte: elaboração própria.

A visualização da reflexão da frente de onda do ultrassom está presente na Figura 18b, deixando clara a diferença do método apresentado em relação ao método de reflexão de onda plana. Esta visualização do campo acústico foi criada utilizando-se a caixa de ferramentas do MATLAB, de código aberto, k-Wave (MathWorks®, USA) (TREEBY, BUDISKY, *et al.*, 2018, TREEBY, COX, 2011), sendo utilizada para analisar o desempenho esperado do sistema. O código fonte deste aplicativo encontra-se disponível no APÊNDICE A. O sinal de resposta simulado para o transdutor Rx pode ser visto na Figura 19, sendo o primeiro pulso o sinal direto, o segundo pulso o sinal refletido e o terceiro pulso a reflexão interna na espessura da amostra. Os pares (A,t) denotam a amplitude do sinal e o seu tempo de ocorrência. O sistema foi projetado para que não houvesse sobreposição entre estes sinais captados, sendo a distância H maior do que d_1.

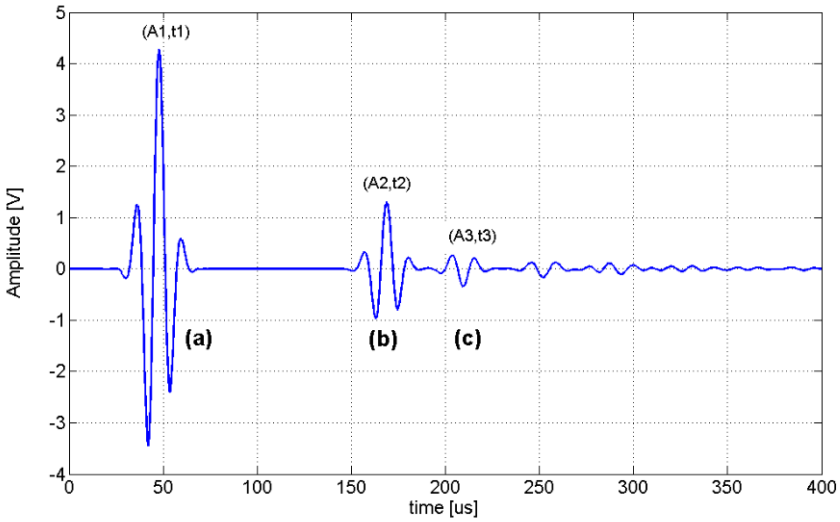


Figura 19 – Propagação acústica simulada (a) sinal direto; (b) sinal refletido e (c) reflexão interna.
Fonte: elaboração própria.

2.4. Geração do pulso de excitação gaussiano utilizado no método de medição

Com parâmetros ajustáveis, o gerador de função modelo 33500B (Agilent Technologies, USA) foi programado para criar um pulso de excitação ultrassônica senoidal, modulado por uma gaussiana conforme a Equação (2.1).

$$P(t) = A\ sin\ (2\pi f t + \varphi)\ e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-t_0}{\sigma}\right)^2} \tag{2.1}$$

em que $P(t)$ é o sinal elétrico proporcional à pressão em função do tempo, A é a amplitude da tensão de excitação, f é a frequência de pulso, φ é uma fase arbitrária, t_0 é o tempo de atraso de pico relativo ao sinal de sincronismo do sistema e σ controla a largura do pulso gaussiano.

Nos experimentos, o gerador de função foi configurado com amplitude de sinal $A = 20$ V (pico a pico). A frequência senoidal foi ajustada para $f = 65$ kHz, que está próxima da ressonância do transdutor. Esta condição melhora o ganho na relação sinal-ruído. O envelope gaussiano foi definido em $t_0 = 46\times10^{-6}$ s. O tempo t_0 é a localização desejada do sinal de pico de excitação. O desvio padrão $\sigma = 15\times10^{-6}$ s define a largura do pulso. Esta configuração gera um pulso com duração de aproximadamente 100×10^{-6} s. A fase φ foi zerada. Este pulso com envelope gaussiano é suave e evita efeitos transitórios.

2.5. Curva de calibração da sonda de medição de impedância acústica

O decaimento da amplitude do sinal é inversamente proporcional à distância da fonte (PIERCE, 2019). O modelo utilizado para verificar esta divergência foi a Equação (2.2). Como a velocidade do som na água é constante se a temperatura permanecer estável, a amplitude pode ser plotada em função do tempo de propagação. A calibração foi obtida afastando-se a deslocamentos constantes os transdutores e medindo-se a amplitude elétrica do sinal proporcional à pressão como função do tempo de atraso.

$$A(t) = \frac{A_0}{(t - t_0)} \tag{2.2}$$

O valor da constante A_0, encontrado no ajuste da Equação (2.2), corresponde à pressão na origem do campo acústico. A curva de calibração é importante para medir o tempo de atraso do sistema t_0, correspondente ao deslocamento do sinal de pico de excitação em relação ao sincronismo de aquisição. Consequentemente, qualquer medição relativa ao tempo deve ser ajustada subtraindo-se o valor do atraso do sistema.

2.6. Processamento de sinal utilizado no método de medição de impedância

Os dados foram coletados com osciloscópio digital a uma taxa de aquisição de 25 mega amostras/segundo, sendo transmitidos ao software desenvolvido em LabVIEW (National Instruments Corp., USA) para análise e processamento. O sinal adquirido corresponde à frente de onda que passa duas vezes pelo transdutor receptor Rx em uma única medição, conforme a Figura 19. Como a distância até a amostra *H* foi maior que d_1 e a duração do pulso curta, não houve sobreposição de sinal em Rx. Devido à simetria, a onda refletida tem a mesma curvatura da onda incidente. O pulso refletido é a imagem da reflexão especular em relação à superfície da amostra e obedece à lei da reflexão (ZHANG, WANG, *et al.*, 2021).

O ângulo de incidência do sinal acústico pode ser obtido pela Equação (2.3) utilizando-se do tempo de propagação do sinal direto e refletido.

$$\theta = asin\left(\frac{t_1 - t_0}{t_2 - t_0}\right) \tag{2.3}$$

Para o processamento do sinal de resposta do sistema, foi utilizado um método de ajuste de curva não linear. Especificamente, o método Levenberg-Marquardt (CHANGFENG, JIANG, 2007, HAO WEN, JING MA, *et al.*, 2012), que foi

implementado utilizando o software LabVIEW (National Instruments Corp., USA). Esta técnica de otimização é amplamente reconhecida como uma opção superior para otimização não linear, superando métodos de gradiente descendente e gradiente conjugado, especialmente para problemas de tamanho moderado.

O algoritmo não linear foi aplicado simultaneamente ao sinal direto e refletido no modelo matemático de propagação do experimento, representado na Equação (2.4). Os valores iniciais utilizados para convergir o ajuste são os parâmetros definidos no pulso de excitação.

$$P(t) = A_1\, sin\,(2\pi f_1 t + \varphi_1)\, e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-t_1}{\sigma_1}\right)^2} + A_2\, sin\,(2\pi f_2 t + \varphi_2)\, e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-t_2}{\sigma_2}\right)^2} \quad (2.4)$$

Os parâmetros obtidos no ajuste da Equação (2.4) possuem a interpretação física:

- A_1 Amplitude elétrica do pulso direto;
- A_2 Amplitude elétrica do pulso refletido;
- f_1 Frequência central do pulso direto;
- f_2 Frequência central do pulso refletido;
- φ_1 Fase do pulso direto;
- φ_2 Fase do pulso refletido;
- t_1 Tempo de propagação do pulso direto (de Tx para Rx);
- t_2 Tempo de propagação do pulso refletido (de Tx para a interface até Rx);
- σ_1 Desvio padrão da envoltória gaussiana do pulso direto; e
- σ_2 Desvio padrão da envoltória gaussiana do pulso refletido.

2.7. Determinação da impedância utilizando os parâmetros do ajuste

A impedância acústica característica de um material pode ser determinada a partir do seu coeficiente de reflexão. O coeficiente de reflexão da onda esférica, denotado por *R*, pode ser deduzido a partir da Equação (2.2), por meio da relação de amplitudes:

$$R = \frac{A_2(t_2 - t_0)}{A_1(t_1 - t_0)} \quad (2.5)$$

As medições de tempos precisam ser corrigidas em relação ao atraso do sistema. Os valores dos tempos t_1 e t_2 encontrados no ajuste do modelo de propagação devem ser subtraídos do tempo de atraso t_0 obtido na curva de calibração, Equação (2.2). As demais variáveis são o resultado do ajuste da resposta do sinal utilizando a Equação (2.4).

A impedância acústica característica para ondas esféricas dos materiais sob teste pode ser obtida pela Equação (2.6):

$$z = \frac{z_1}{\cos(\theta)} \cdot \frac{(1+R)}{(1-R)} \quad (2.6)$$

em que, $z_1 = 1.48\ MRayl$, é a impedância acústica característica da água;
R é o coeficiente de reflexão calculado pela Equação (2.5);
θ é o ângulo de incidência na amostra calculado pela Equação (2.3);

2.8. Materiais utilizados para avaliação do método de medição de impedância

A Tabela 1 apresenta as dimensões das amostras de sólidos avaliadas. O valor de referência da impedância acústica característica destes materiais *z* é apresentado no trabalho de Selfridge (1985), porém não é indicada a incerteza associada. Esses materiais foram selecionados porque cobriam uma ampla gama de impedâncias e estavam prontamente disponíveis.

A preparação de amostras é essencial para medir as propriedades acústicas dos materiais. A superfície do material precisa ser tão plana e homogênea quanto possível. A presença de microbolhas superficiais pode interferir e comprometer a medição, sendo removidas com o uso de uma escova. Cada amostra foi imersa em água por uma hora para condicionamento adequado antes do início das medições.

Tabela 1 – Dimensões dos materiais e impedância acústica característica

Material	Comprimento [mm]	Largura [mm]	Espessura [mm]	Impedância acústica *z* [MRayl]
Borracha	300	130	10	2.0
Carvalho	340	55	55	2.9
Acrílico	200	100	25	3.1
Concreto	280	75	68	8.0
Alumínio	250	75	75	17.0
Chumbo	200	100	20	24.6
Aço	245	100	62	46.0

Fonte: (SELFRIDGE, 1985).

2.9. Determinação da impedância acústica de referência das amostras

As impedâncias acústicas características dos materiais, reportadas na Tabela 1, foram utilizadas para seleção inicial. Para se obter os valores individuais, com incertezas, cada amostra foi caracterizada individualmente em relação à densidade e velocidade de propagação acústica. A determinação da impedância acústica característica é feita através da Equação (1.3). A densidade ρ foi avaliada como a massa por unidade de volume; enquanto *c* é a velocidade de propagação acústica na amostra. A massa das amostras foi medida com uma balança digital CP4202S (Sartorius, Alemanha) com incerteza expandida de ($U_{95\%} = 0.01\ g$). O volume das amostras foi avaliado utilizando um paquímetro digital modelo CD8 AX-B (Mitutoyo, Brasil), com incerteza expandida de

($U_{95\%} = 0.02$ mm). A medição da velocidade acústica nos materiais foi obtida utilizando dois transdutores de 54 kHz (transmissor e receptor) do equipamento modelo 58-E4800 (Controls, Itália) e medições do tempo de propagação com osciloscópio digital modelo DSO7012B (Agilent Technologies, USA) para maior precisão.

2.10. Aplicação do método proposto para determinar a elasticidade em concreto

Como exemplo de aplicação do método desenvolvido, a medição da impedância acústica foi utilizada para determinar o módulo de elasticidade em amostras de concreto. A elasticidade considerada como referência foi determinada pelo método da velocidade do pulso ultrassônico, Equação (1.20), sendo os resultados posteriormente comparados com os valores obtidos pela aplicação do método de onda esférica, utilizando-se a Equação (1.21).

2.10.1. Planejamento das amostras de concreto

Foram elaboradas quatro misturas distintas de concreto classificadas como C20, C30, C40 e C50. O índice "C" denota concreto, seguido de um número que representa o grau de resistência específico f_{ck}, medido em [MPa] ou [N/mm^2], que corresponde à sua resistência à compressão esperada após 28 dias de idade durante o ensaio de rompimento.

Os corpos de prova foram moldados utilizando moldes metálicos que mediam 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura. Adicionalmente, foram formados blocos de concreto utilizando uma fôrma de madeira com medidas internas de (40×8×15) cm. Foram construídos 4 (quatro) conjuntos, cada um composto por: 22 (vinte e dois) corpos de prova cilíndricos e 1 (um) bloco de concreto moldados com a mistura desejada, conforme mostrado na Figura 20. Após a desmoldarem, todos os corpos de prova foram armazenados saturados com água.



Figura 20 – Um conjunto de amostras utilizados para determinação de elasticidade
Fonte: elaboração própria

2.10.2. Composição das amostras de concreto

As misturas de concreto foram preparadas conforme as proporções da Tabela 2. Para atingir as classes de resistência do concreto, as amostras foram preparadas com cimento Portland (CP III 40 RS). A inclusão de escória de alto forno na composição do cimento CP III aumenta a resistência do concreto (SOARES, BENEDETTI, *et al.*, 2020). As escórias são formadas na fusão das impurezas do minério de ferro, juntamente com a adição de fundentes (calcário e dolomita) e as cinzas do coque.

Tabela 2 – Composição das misturas de concreto utilizadas nas medições ultrassônicas

Classe desejada	Cimento [kg]	Areia [kg]	Agregado [kg]	Água [kg]
C20	14.1	36.5	44.6	8.1
C30	17.9	35.0	42.8	8.1
C40	21.8	33.5	40.9	8.2
C50	25.8	31.9	39.0	8.2

Fonte: elaboração própria

A composição agregada empregada neste estudo compreende uma mistura balanceada de brita quartzítica fina (4 mm - 8 mm) e brita média (8 mm - 16 mm) na proporção de 1:1. Para otimizar a fluidez da mistura de concreto foi acrescentado o aditivo superplastificante Tec-Flow 9030 (GCP Applied Technologies, USA) na dosagem de 0,6% em peso de cimento. O aditivo superplastificante reduz a quantidade de água necessária para manter a plasticidade do concreto molhado (GODINHO, DE SOUZA JÚNIOR, *et al.*, 2020, VILARDELL, AGUADO, *et al.*, 1998). Essa redução na

quantidade de água contribui para a minimização da formação de bolhas de ar indesejadas presentes na estrutura do concreto.

2.10.3. Determinação das propriedades elásticas do concreto

A velocidade de propagação do ultrassom no concreto, designada por UPV, foi determinada seguindo as recomendações da Norma BS EN 12504-4 (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2004) utilizando o procedimento descrito no item 2.9.

No ensaio de resistência à compressão, seis corpos de prova de cada classe foram rompidos nas idades de 7 (sete), 14 (quatorze) e 28 (vinte e oito) dias, totalizando 18 (dezoito) corpos de prova por conjunto, para determinação do grau de resistência f_{ck}. Estas medições foram realizadas pelo Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Católica de Petrópolis, através do convênio existente com o INMETRO.

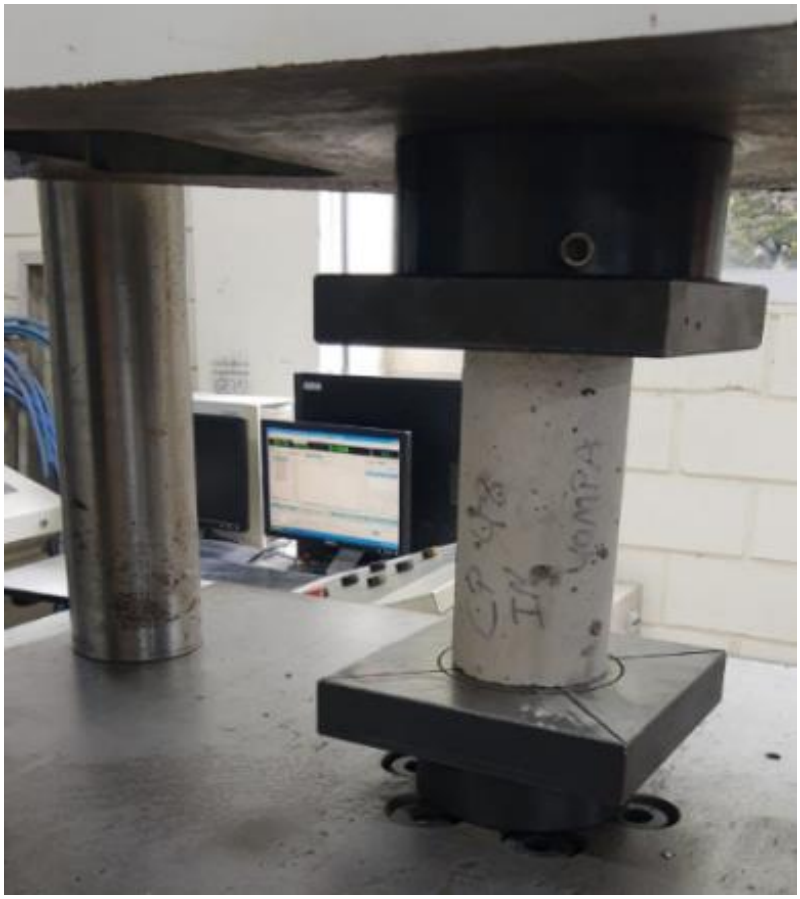


Figura 21 – Ensaio de rompimento das amostras de concreto.
Fonte: Universidade Católica de Petrópolis.

Diferentes expressões matemáticas são reportadas em normas técnicas para estimar o módulo de elasticidade do concreto a partir do ensaio de resistência a ruptura. Algumas

delas estão especificadas da Tabela 3 e foram empregadas para avaliar os resultados obtidos pelo método proposto neste trabalho.

Tabela 3 – Equações para estimativa da elasticidade em concreto reportadas na literatura

Norma	Estimativa do modulo de elasticidade [MPa]	
Fib MODEL CODE (2013)	$E_{ci} = 21{,}5 \times \alpha_E \times \left(\frac{f_{ck} + 8}{10}\right)^{1/3}$	(2.7)
ABNT NBR 6118 (2023)	$E_{ci} = 21{,}5 \times \alpha_E \times \left(\frac{f_{ck}}{10} + 1.25\right)^{1/3}$	(2.8)
EUROCODE 2 (2015)	$E_{ci} = 1{,}05 \times 22 \times \left(\frac{f_{ck}}{10}\right)^{0.3}$	(2.9)

$\alpha_E = 1.0$ (FEDERATION INTERNATIONALE DU BETON, 2013)

Fonte: elaboração própria.

2.11. Avaliação das incertezas de medição

As estimativas de incerteza de medição foram realizadas utilizando-se do Guia para Expressão de Incerteza em Medição (GUM) (JOINT COMMITTEE FOR GUIDES IN METROLOGY, 2008). Os principais fatores que contribuem para a incerteza característica da impedância acústica incluem:

- A incerteza do tipo A proveniente das repetições das medições de reflexão;
- A incerteza do tipo B provenientes da calibração dos instrumentos de medição;
- A incertezas no algoritmo de ajuste, Equação (2.4), de 0,1% para amplitudes;
- A incerteza de localização temporal do algoritmo de ajuste de 0,01%;
- A incerteza na determinação do ângulo de incidência θ da Equação (2.3); e
- A variação de amplitude de 0,33% no sinal refletido devido à diretividade dos transdutores.

Foi aplicado um teste de equivalência estatística para comparar se as medições realizadas com os dois métodos estão próximas o suficiente para serem consideradas equivalentes com um nível de confiança de 95%. A expressão utilizada para cálculo é o erro normalizado dado pela Equação (2.10) (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC), 2023).

$$E_n = \left| \frac{\left(z_{ref} - z_{method}\right)}{\sqrt{\left(U_{ref}^2 + U_{method}^2\right)}} \right| \tag{2.10}$$

A Equação (2.10) avalia a correlação estatística do método proposto em relação ao método de transmissão direta, ponderado pela incerteza das medições. Um erro

normalizado menor que a unidade indica que os valores obtidos pelos métodos diferentes são próximos o suficiente para concluir que os resultados são equivalentes.

3. RESULTADOS

3.1. Calibração da sonda de medição de impedância acústica

Na calibração da sonda, um transdutor é fixo e o outro se distancia na água em passos de 5 mm. No experimento, foi adquirida a amplitude do sinal direto. As amplitudes e tempos correspondem aos valores encontrados no ajuste do primeiro termo da Equação (2.4). O resultado da curva de calibração pode ser visto na Figura 22, onde se verifica o comportamento inversamente proporcional ao afastamento. Este resultado demonstra que o campo acústico gerado pelo transdutor pode ser considerado esférico.

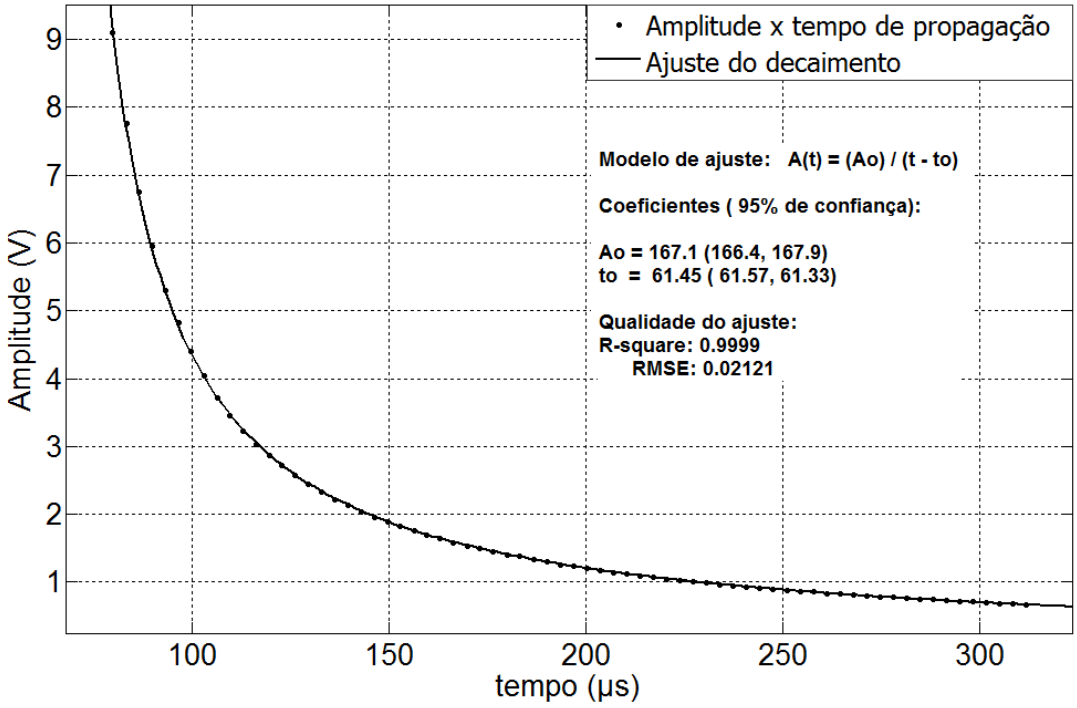


Figura 22 – Amplitude da frente de onda acústica em relação ao tempo de propagação.
Fonte: elaboração própria.

O pulso gaussiano programado no gerador de forma de onda, Equação (2.1), foi definido com atraso de $t_0 = 46\ \mu s$. O sinal de excitação elétrica obtido pelo osciloscópio, salvo junto com o arquivo de dados como controle, ocorre no instante $46{,}10\ \mu s$. Porém, o ajuste realizado pela Equação (2.2) indica que a resposta acústica aparece no instante $t_0 = 61{,}45\ \mu s$. Este aumento de $15{,}35\ \mu s$, em relação ao esperado, corresponde ao atraso introduzido pelo sistema. Este atraso pode ser atribuído a dois fatores: o tempo de conversão eletroacústico e o atraso gerado pela camada de revestimento do transdutor. A

borracha de revestimento possui uma velocidade de propagação diferente do material piezoelétrico e diferente do da água. O tempo de atraso total encontrado é de, aproximadamente, o tempo de propagação de um comprimento de onda (λ) do pulso ultrassônico na água. Como os dois transdutores utilizados na sonda acústica são do mesmo tipo, é razoável esperar que o atraso seja de (λ/2) em cada transdutor. Mais investigações seriam necessárias para determinar a causa do tempo de resposta do transdutor e não fizeram parte deste estudo. O valor de $t_0 = 61{,}45\ \mu s$ foi utilizado como tempo de atraso em todos os cálculos com o sistema de medição.

3.2. Mapeamento acústico das amostras selecionadas

Para analisar de forma abrangente as amostras, a sonda foi posicionada no centro de sua largura e deslocada ao longo do comprimento em incrementos de 2 mm. Manteve-se um afastamento de aproximadamente $H = 135\ mm$ da amostra e uma separação entre os transdutores fixo em $d_1 = 50\ mm$, conforme o arranjo experimental mostrado na Figura 23. O isopor foi utilizado para verificar a inversão de fase do sinal acústico.

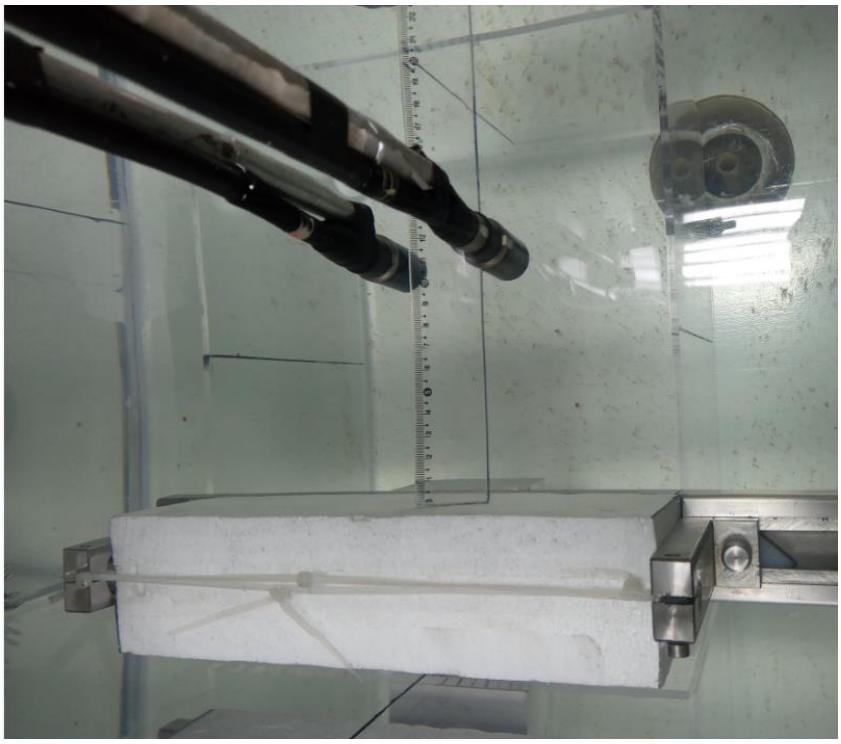


Figura 23 – Posicionamento típico da amostra no suporte para mapeamento ultrassônico. A régua indica o afastamento aproximado, as distâncias são calculadas através do processamento do sinal acústico.

Fonte: elaboração própria.

A Figura 24 mostra um mapeamento típico, ao longo da largura de 250 mm, na amostra de alumínio com os sinais sobrepostos. O sinal direto, percurso entre os

transdutores (Figura 24a) mostra que a separação entre eles permaneceu constante. A Figura 24b mostra as reflexões vindas da amostra ao longo da extensão do comprimento. As pequenas variações podem ser associadas a homogeneidade da amostra ou pequenas interferências. Na Figura 24c, a reflexão interna na amostra é bastante afetada por reflexões espúrias, podendo ser associadas as dimensões reduzidas do tanque de ensaio que geram reflexões internas.

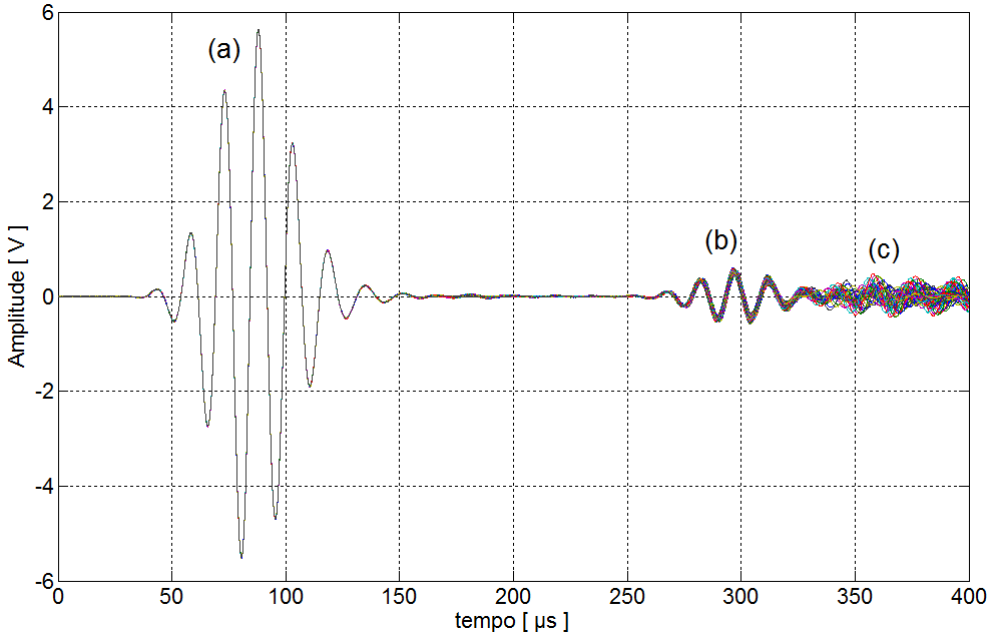


Figura 24 – Resposta ultrassônica típica na varredura de uma amostra. (a) o sinal direto, (b) o sinal refletido e (c) as múltiplas reflexões internas no tanque ultrassônico.
Fonte: elaboração própria.

A fim de se identificar um padrão de interferência no trecho a partir do instante 200 µs na Figura 24b, foi projetado um mapa de cores em 3D para realçar o comportamento do sinal captado. O resultado obtido pode ser visto na Figura 25. O padrão entre 0-50 mm e 200-250 mm são devidos as bordas da amostra, pois a varredura se deu ao longo de todo o comprimento. O restante do sinal será analisado mais à frente, após o processamento do modelo de propagação acústica.

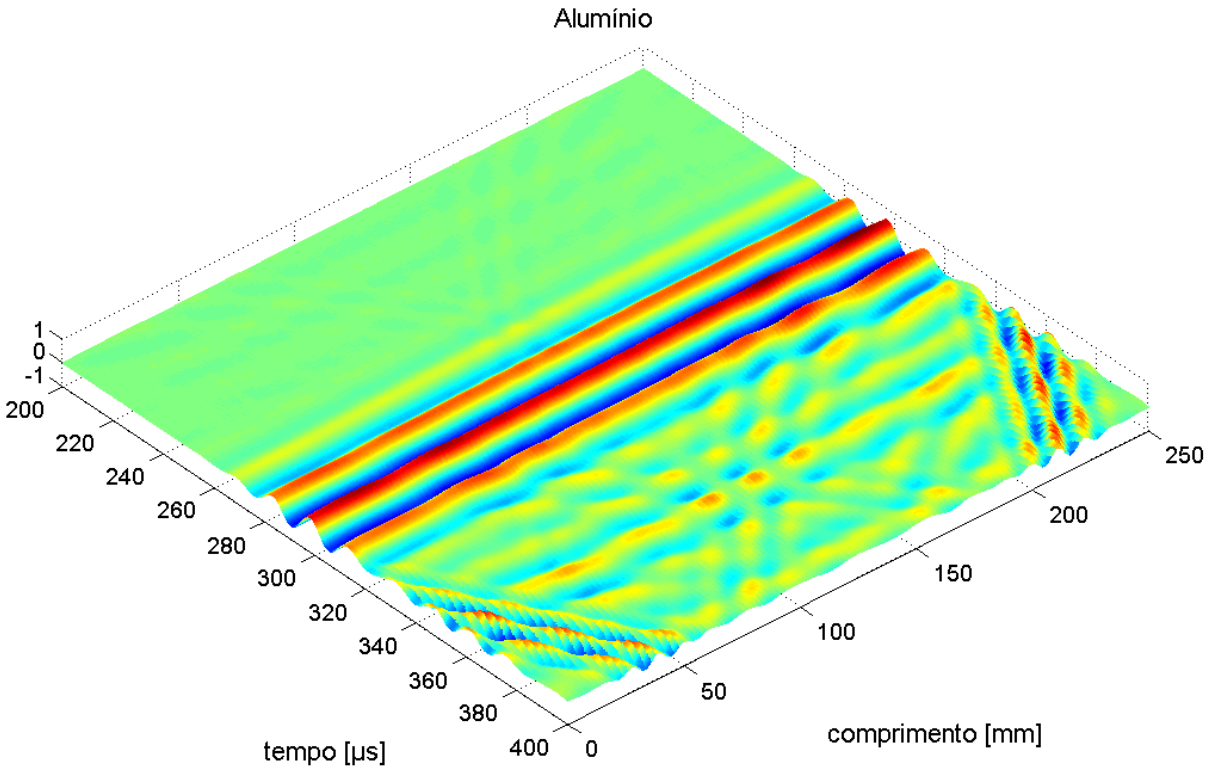


Figura 25 – Projeção das formas de onda obtidas ao longo da amostra.
Fonte: elaboração própria.

3.3. Processamento de sinal para medição dos parâmetros acústicos

Um exemplo do sinal ajustado é mostrado na Figura 26. A resposta do sistema é a curva em vermelho. A função matemática definida na Equação (2.4) foi ajustada utilizando o algoritmo de Levenberg-Marquardt disponível no toolbox do programa LabVIEW (National Instruments Corp., USA). Como o interesse neste ajuste foi a relação entre as amplitudes, utilizaram-se como vínculo as condições: $f_1 = f_2$ e $\sigma_1 = \sigma_2$. Os valores atribuídos às outras variáveis são os que melhor se ajustaram ao algoritmo. Estes valores foram utilizados para criar a curva do sinal em verde. O mesmo procedimento foi aplicado a todos os dados das amostras listadas na Tabela 1.

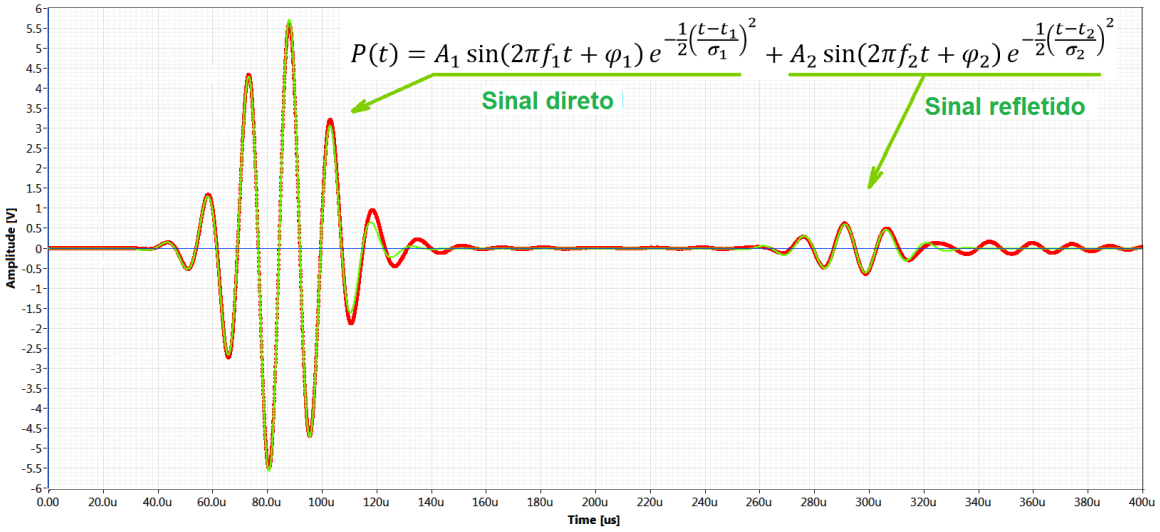


Figura 26 – Exemplo de processo de ajuste: a linha vermelha representa o sinal adquirido; a linha verde é a curva ajustada.
Fonte: elaboração própria.

3.4. Interferência sofrida nas reflexões em amplitude

A Figura 27 apresenta o resultado do ajuste não-linear para a amplitude de reflexão A_2 na amostra de alumínio, ao longo do seu comprimento. A variação considerável nos trechos inicial e final foram atribuídas as bordas da amostra. Portanto, a impedância acústica característica foi avaliada para o alumínio, e demais materiais, apenas na região central (faixa de 80-170 mm na cor vermelha). Apesar da estabilidade, a variabilidade do sinal parece seguir algum tipo de padrão, pois foi encontrado nas demais amostras.

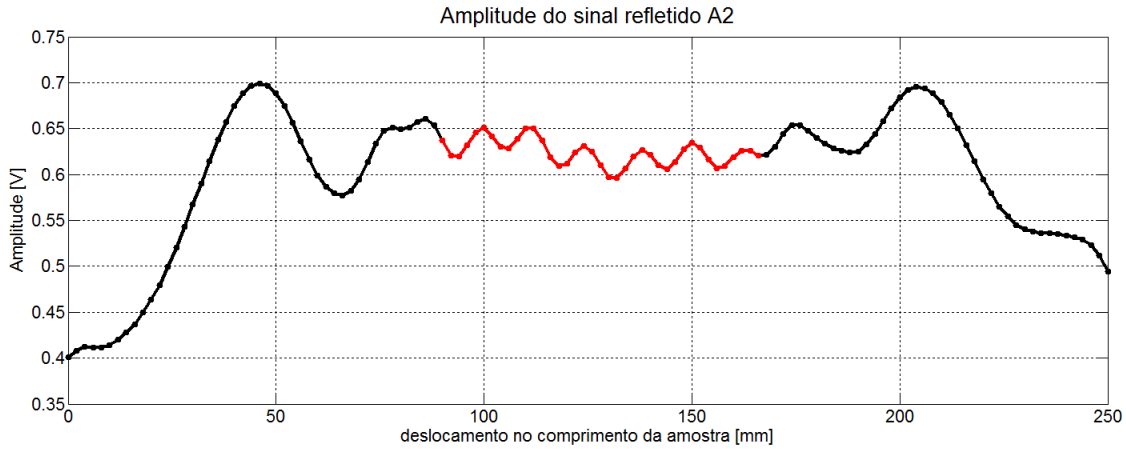


Figura 27 – Amplitude do sinal refletido na amostra de alumínio; em vermelho o trecho considerado para o cálculo de impedância.
Fonte: elaboração própria.

Uma possível explicação para esse comportamento seria a interferência causada pela dimensão do comprimento da amostra. Algumas premissas serão assumidas a partir de agora, para explicar o resultado encontrado.

A forma desta oscilação será considerada senoidal. Existem quatro ciclos completos entre 100 mm e 150 mm (linha vermelha). Portanto, a distância entre os máximos de interferência desta oscilação ocorre a cada deslocamento de 12,5 mm. A distância da amostra à sonda de medição utilizada no experimento foi de 135 mm. Estes resultados foram comparados com o modelo de difração de fenda dupla (PIERCE, 2019) para associar um comprimento de onda λ ao padrão de interferência. O valor estimado foi calculado utilizando a Equação (3.1):

$$\lambda \approx \frac{y\,d}{L} \quad \lambda \approx \frac{12.5 \times 250}{135} \approx 23.1 \text{ mm} \tag{3.1}$$

onde, d = 250 mm é o comprimento da amostra;
L = 135 mm é a distância da sonda até a amostra; e
y =12,5 mm é a distância entre os máximos de interferência.

O comprimento de onda associado ao pulso acústico gaussiano dentro da água pode ser calculado pela Equação (3.2) (KINSLER, FREY, *et al.*, 2000). A frequência utilizada no experimento foi de 65 kHz. A velocidade estimada do som na água, para a temperatura de 22,3 °C, foi obtida como sendo 1.489,0 m/s (BILANIUK, WONG, 1993).

$$c = \lambda f \quad => \quad c = \frac{1489.0 \text{ m/s}}{65000 \text{ Hz}} = 22.9 \text{ mm} \tag{3.2}$$

Os valores de comprimento de onda semelhantes encontrados na Equação (3.1) e Equação (3.2) podem indicar efeitos de difração na borda das amostras. Medições mais precisas do padrão de interferência serão conduzidas em uma continuidade deste trabalho para comprovar esta hipótese. Embora este efeito tenha contribuído para o aumento da incerteza final da impedância acústica característica pelo método proposto, a precisão das medições não foi afetada consideravelmente, pois o valor relatado foi relatado pela média das medições.

3.5. Determinação da impedância acústica caracteristica das amostras

Dois métodos foram utilizados para avaliar a impedância acústica característica de cada amostra. O método de transmissão direta apresentado na literatura, Equação (1.3), e o método proposto neste trabalho, Equação (2.4).

O primeiro método necessita da medição da densidade e da velocidade do som na amostra para calcular sua impedância acústica. O osciloscópio foi utilizado para avaliar a velocidade de propagação do pulso ultrassônico, enquanto a densidade foi determinada por meio de medições de massa e volume. As medições foram repetidas quatro vezes para determinar com maior precisão a impedância acústica de cada material e para se ter uma avaliação da incerteza obtida por este método. Os resultados estão dispostos na Tabela 4.

Tabela 4 – Impedância acústica característica das amostras pelo método direto

MATERIAL	Densidade (ρ) [g/cm^3]	Velocidade (c) [mm/s]	Impedância $z_0 = \rho_0 \cdot c$ [MRayl]	Incerteza $U_{95\%}$ [MRayl]
Borracha	1,06	1,92	2,03	0,04
Carvalho	1,11	2,32	2,58	0,03
Acrílico	1,27	2,47	3,14	0,08
Concreto	2,30	3,93	9,02	0,16
Alumínio	2,79	6,33	17,65	0,43
Chumbo	11,24	2,14	24,02	0,60
Aço	7,76	5,91	45,87	2,29

Fonte: elaboração própria.

O segundo método utilizado foi a reflexão de onda esférica, conforme apresentado neste trabalho. O coeficiente de reflexão foi avaliado pela Equação (2.5) e o ângulo de incidência foi determinado pela Equação (2.3). Apenas a região central foi considerada, conforme mostrado na Figura (2.10). As variações na amplitude de reflexão obtidas em torno do centro da amostra foram as principais contribuintes para a incerteza. Os resultados são relatados na Tabela 5.

Tabela 5 – Impedância acústica característica das amostras pelo método proposto

MATERIAL	Reflexão (R) [%]	Impedância Equação (2.6) [MRayl]	Incerteza $U_{95\%}$ [MRayl]	Erro normalizado Equação (2.10)
Borracha	15,70	2,03	0,02	0,06
Carvalho	27,52	2,60	0,06	0,38
Acrílico	35,84	3,13	0,12	0,10
Concreto	71,37	8,86	1,26	0,13
Alumínio	84,74	17,92	1,40	0,18
Chumbo	88,84	25,10	5,10	0,21
Aço	93,50	44,00	12,00	0,15

Fonte: elaboração própria.

O teste do erro normalizado aplicado aos resultados da Tabela 5, em relação ao método direto da Tabela 4, resulta em todos em valores menores que a unidade. Isto indica

que os resultados obtidos pelos dois métodos podem ser considerados estatisticamente equivalentes.

Considerando que o método proposto e o método de transmissão são equivalentes, a curva de calibração entre os métodos deveria ser representada por uma reta com coeficiente angular unitário. Para avaliar de forma quantitativa o desvio entre os métodos, procedeu-se o ajuste linear, conforme visto na Figura 28.

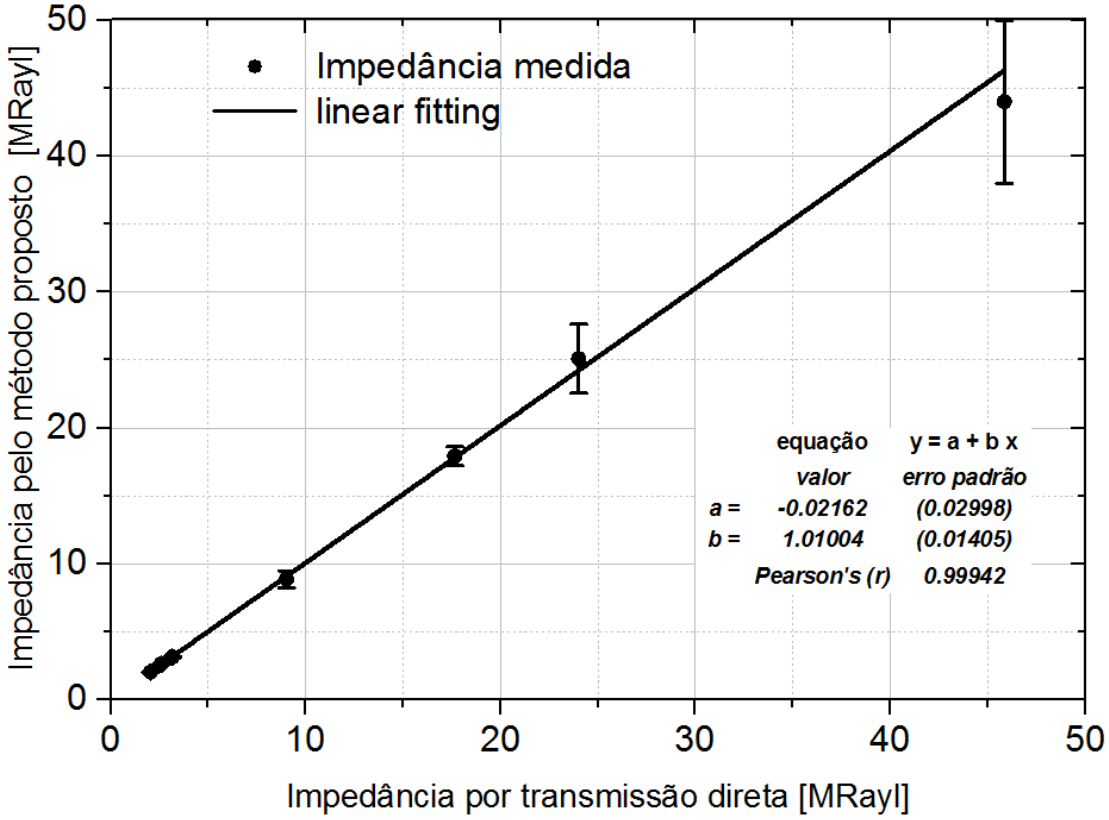


Figura 28 – Precisão do método de onda esférica em relação ao método de transmissão.
Fonte: elaboração própria.

A curva de calibração obtida apresenta um coeficiente angular de 1,01004, com correlação de Pearson de 99,942 %. O coeficiente de correlação de Pearson é um teste estatístico que mede a relação, ou associação, entre os dois métodos, indicando uma forte correlação entre os resultados. A regressão linear indica para o método proposto um valor sobrestimado em 1,004 % com um erro padrão de 1,405 %.

As impedâncias acústicas obtidas pelos dois métodos foram comparadas com outros valores relatados na literatura e apresentados na Tabela 6. As diferenças encontradas são pequenas e as variações se devem às características específicas de cada método. Além disso, não se pode garantir que os materiais sejam precisamente os mesmos, pois os polímeros, a madeira e o concreto, por exemplo, não são homogêneos.

Tabela 6 – Impedância acústica característica das amostras em outros trabalhos

Material	Impedância Acústica [MRayl]			
	Transmissão	*Método proposto*	*Literatura*	*Referência*
Borracha	2,03	2,03	2,0	(Selfridge, 1985)
Carvalho	2,58	2,60	2,9	(Selfridge, 1985)
Acrílico	3,14	3,13	3,22	(Beamish *et al*., 2022)
Concreto	9,02	8,86	9 - 10	(Dvořák; Chobola; Kusák, 2018)
Alumínio	17,65	17,92	17,06	(Ginzel; Turnbull, 2016)
Chumbo	24,02	25,10	24,6	(Selfridge, 1985)
Aço	45,87	44,00	45,63	(Beamish *et al.*, 2022)

Fonte: elaboração própria.

3.6. Elasticidade das amostras de concreto

Os resultados a seguir relatam a resistência mecânica de amostras de concreto obtidas através de dois métodos de medição. O método da velocidade de pulso ultrassônica (UPV), Figura 29, considerado como referência e o método de reflexão de onda esférica proposto neste trabalho.

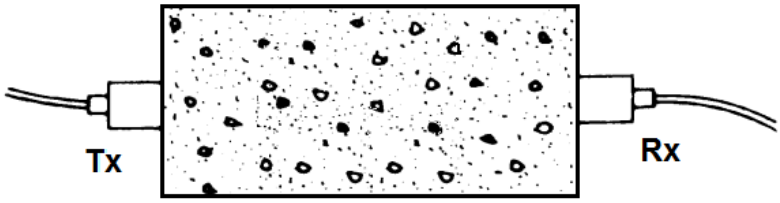


Figura 29 – Método UPV de medição da velocidade ultrassônico no concreto
Fonte: elaboração própria.

O UPV do concreto reportado na literatura encontra-se na faixa de 3.700 m/s a 4.200 m/s (LOOTENS, SCHUMACHER, *et al.*, 2020). Os resultados obtidos pelos dois métodos são apresentados na Tabela 7. A diferença entre os valores deve ser avaliada considerando as incertezas encontradas. A diferença entre os métodos é menor após a cura do concreto que ocorre em 28 dias.

Tabela 7 – Velocidade ultrassônica obtida pelos dois métodos de medição [*m/s*]

Classe	**7 dias**		**14 dias**		**28 dias**	
	UPV	Reflexão	UPV	Reflexão	UPV	Reflexão
C20	3306(68)	3381(85)	3755(57)	4002(61)	3928(63)	3885(98)
C30	3670(92)	3838(61)	3891(60)	4155(61)	4024(64)	3934(78)
C40	3851(79)	4202(97)	3995(66)	4141(79)	4093(66)	4176(63)
C50	4008(149)	4403(63)	4043(62)	4247(92)	4200(70)	4207(63)

O número entre parênteses corresponde à incerteza padrão combinada
Fonte: elaboração própria.

O Módulo de Young para cada classe de concreto foi determinado pelo método UPV em conjunto com a Equação (1.20) e utilizando o método de reflexão da onda

esférica pela Equação (1.21). Em ambos os casos foi considerado o coeficiente de Poisson de 0,2, sendo este o valor característico para o concreto segundo a norma ABNT NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2023). Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Módulo de Young obtido pelos dois métodos de medição [*GPa*]

Classe	**7 dias**		**14 dias**		**28 dias**	
	UPV	Reflexão	UPV	Reflexão	UPV	Reflexão
C20	22,6(0,7)	23,2(0,7)	29,0(0,5)	28,8(0,6)	31,9(0,5)	31,3(1,0)
C30	28,2(1,1)	28,0(1,0)	31,7(0,6)	31,8(1,1)	34,0(0,6)	33,3(0,9)
C40	31,7(1,0)	32,9(0,9)	34,1(0,8)	32,8(0,8)	35,9(0,8)	36,8(1,3)
C50	34,4(1,9)	35,3(0,8)	34,9(0,8)	35,3(0,3)	37,8(0,8)	39,0(1,2)

O número entre parênteses corresponde à incerteza padrão combinada
Fonte: elaboração própria

A impedância acústica encontrada pelo método de reflexão proposto, necessária para aplicação da Equação (1.21) é apresentada na Tabela 9.

Tabela 9 – Impedância acústica [MRayl] no concreto

Classe	7 dias	14 dias	28 dias
C20	7,6(0,2)	8,0 (0,2)	9,0 (0,2)
C30	8,1(0,3)	8,5 (0,3)	9,4 (0,3)
C40	8,7(0,2)	8,8 (0,3)	9,8 (0,2)
C50	8,9(0,2)	9,2 (0,2)	10,3 (0,2)

O número entre parênteses corresponde à incerteza padrão combinada
Fonte: elaboração própria.

A resistência à compressão do concreto foi avaliada por meio do ensaio de ruptura nos corpos de prova cilíndricos, sendo os resultados obtidos relatados na Tabela 10.

Tabela 10 – Tensão de ruptura f_{ck} [MPa] no concreto

Classe	7 dias	14 dias	28 dias
C20	12,7(0,7)	17,2(0,9)	23,0(1,0)
C30	19,6(2,0)	25,8(1,7)	30,1(0,8)
C40	37,0(3,2)	41,9(1,2)	43,8(0,3)
C50	43,6(0,5)	45,6(1,4)	52,3(1,1)

O número entre parênteses corresponde à incerteza padrão combinada
Fonte: elaboração própria.

Os resultados experimentais para a elasticidade na idade de 28 dias foram comparados com os modelos de previsão descritos na Tabela 3. O método desenvolvido neste trabalho gerou resultados muito próximos ao previsto pelo modelo fib MODEL CODE (FEDERATION INTERNATIONALE DU BETON, 2013)

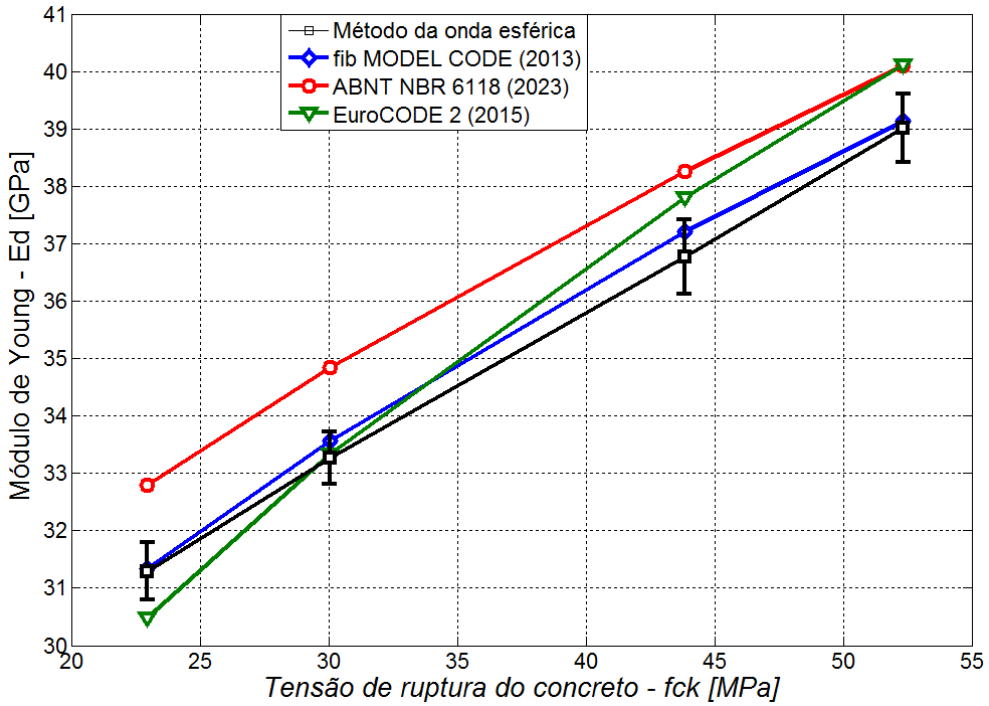


Figura 30 – Elasticidade do concreto medida pelo método da onda esférica comparada com a previsão de modelos em normas técnica.
Fonte: elaboração própria.

Com base neste resultado, as constantes utilizadas no modelo fib Equação (2.7) foram recalculadas utilizando a ferramenta Curve Fitting Tool no Matlab (MathWorks®, USA). O modelo resultante considerando as incertezas obtidas, Equação (3.3), gera uma equação muito próxima ao modelo fib, curva em azul na Figura 30.

$$E_{ci} = 21.3 \times \alpha_E \times \left(\frac{f_{ck} + 8.6}{10}\right)^{1/3} \tag{3.3}$$

Uma relação adicional que pode ser estabelecida consiste na previsão da resistência do concreto utilizando os resultados derivados das medições de impedância acústica e velocidade de propagação ultrassônica, conforme obtidos pelo método de onda esférica apresentado neste trabalho. Utilizando as quatro classes de resistência e os parâmetros acústicos medidos, foi obtida uma relação linear com estes parâmetros que pode ser vista na Figura 31:

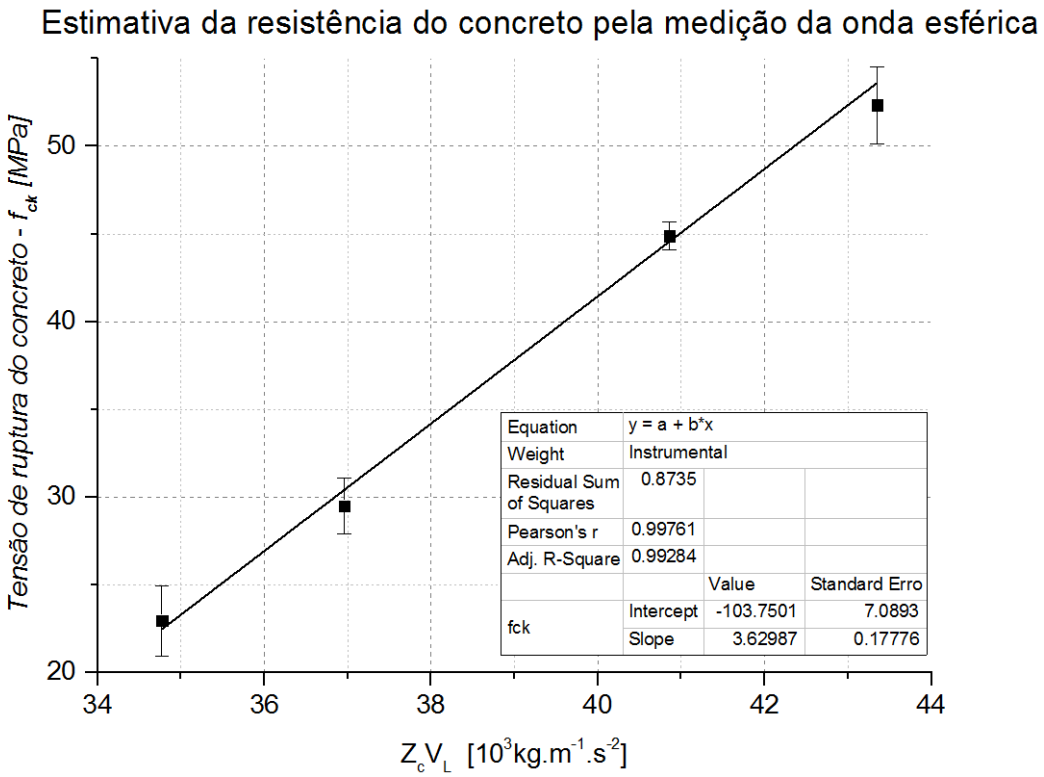


Figura 31 – Resistência do concreto prevista pelo método da onda esférica
Fonte: elaboração própria

Utilizando esta regressão linear e os modelos propostos pelas Equação (1.21) e Equação (1.22), a resistência do concreto para os materiais utilizados, pode ser estimada pelas expressões abaixo:

$$f_{ck} = 3.63\, Z_c V_L - 103.8 \tag{3.4}$$

$$f_{ck} = 3.63\, \frac{Z_c^2}{\rho} - 103.8 \tag{3.5}$$

em que, Z_c é a impedância acústica característica do concreto;
V_L é a velocidade de propagação do pulso ultrassônico no concreto; e
ρ é a densidade do concreto.

4. DISCUSSÃO

O conceito de ângulo crítico de reflexão está associado principalmente a ondas planas, não a ondas esféricas. O ângulo crítico é o ângulo de incidência no qual a onda acústica incidente em um meio de maior impedância acústica se refrata ao longo da interface e passa a se propagar no meio de menor impedância, sem ocorrer refração. Isso geralmente ocorre quando o ângulo de incidência é igual ou maior que o ângulo crítico específico para a combinação de materiais em questão. Em relação a ondas esféricas refletindo em uma superfície plana, o comportamento é diferente. As ondas esféricas se espalham em todas as direções a partir da fonte, e a reflexão em uma superfície plana resulta em reflexões em diferentes direções, sem a presença de um ângulo crítico de reflexão específico. Logo, para ondas esféricas, o conceito de ângulo crítico não se aplica da mesma forma que se aplica a ondas planas (LI, Jingnan, WANG, *et al.*, 2017). Portanto, o ângulo θ presente na Equação (2.6) tem por finalidade a correção da amplitude do sinal refletido para o valor correspondente à incidência normal na amostra, não existindo um valor de θ crítico.

As amostras utilizadas foram selecionadas para abranger uma ampla gama de impedâncias acústicas características: entre 2 MRayl e 46 MRayl. Conforme os resultados obtidos nas medições utilizando o método proposto com ondas esféricas, alguns efeitos foram identificados. Quanto maior a diferença entre a impedância acústica do material e a impedância acústica da água (1,48 MRayl), maior foi a incerteza no valor experimental, como pode ser observado na Figura 28. Este desempenho obtido na utilização do método proposto deve-se ao termo divisor presente na Equação (2.6). O fator divisor tende a zero para grandes valores de reflexão. Assim, a incerteza na impedância acústica calculada torna-se altamente sensível a mínimas flutuações na amplitude de reflexão. Portanto, o método proposto revela-se mais apropriado para materiais cujos valores de impedância acústica guardam maior proximidade com os do meio de referência.

As ondas esféricas tendem a atenuar-se de forma relativamente rápida à medida que a onda ultrassônica se afasta da fonte geradora, conforme pode ser verificado pela curva de calibração da sonda de medição na Figura 22. Este comportamento torna o método menos adequado para medir as propriedades acústicas de materiais a longas distâncias da fonte geradora. Por outro lado, com a sonda de medição mais próxima à superfície de

medição, existe um melhor controle do alinhamento do sistema. O eixo de simetria dos transdutores que formam a sonda de medição precisa ficar num plano paralelo à superfície da amostra, visto que a diretividade do transdutor tem a sua melhor simetria no plano XY. Pequenas discrepâncias de alinhamento são corrigidas automaticamente graças à simetria esférica presente no campo acústico gerado no plano XZ. Isto acontece porque a porção refletida detectada pelo transdutor receptor origina-se da reflexão normal proveniente da amostra. O transdutor ideal seria o de geometria esférica, porém estes ainda são difíceis de serem obtidos.

A curva de calibração pôde ser ajustada a uma relação que obedece a lei do inverso da distância. Este resultado valida a hipótese de que as medições estão sendo realizadas em um campo acústico esférico, onde a pressão e a velocidade das partículas do meio já se encontram em fase. Dentro da faixa de medição da curva de calibração, a frente de onda esférica gerada pelo transdutor radial utilizado já pode ser aproximada por uma onda plana, permitindo se desprezar o termo complexo na Equação (1.7). O transdutor cilíndrico, quando possui dimensões menores do que o comprimento de onda gerado, pode ser considerado uma fonte pontual e por esse motivo gera ondas esféricas (PIERCE, 2019).

Ao se aplicar os vínculos, $f_1 = f_2$ e $\sigma_1 = \sigma_2$, no ajuste da função definida na Equação (2.4) para determinar os parâmetros da forma de onda, ocorre perda de informações acerca das características superficiais da amostra. Essa suposição de vínculo implica a consideração da água e da amostra como meios não reativos. Dado que o objetivo era obter a impedância acústica característica da amostra, a qual é independente da frequência em meios homogêneos e isotrópicos e com intensidades acústicas na faixa linear, optou-se por empregar uma única frequência acompanhada por uma envoltória gaussiana. Uma vez que foi estabelecida a validade do método de medição, a etapa subsequente envolverá a utilização de uma forma de onda abrangendo um espectro mais amplo de frequências, eliminando, assim, os vínculos de simetria entre as ondas incidente e refletida. Outros tipos de pulsos e equações correspondentes poderão ser aplicados utilizando o método desenvolvido e, assim, realizar uma análise mais profunda de reflexão acústica em função da frequência.

Os efeitos de difração encontrados nos dados coletados, vistos na Figura 27, não interferiram de forma significativa no aumento da incerteza obtida, pois foi analisada apenas a parte central das amostras. Através do teste de erro normalizado, pôde ser

verificado que o método apresentado fornece resultados equivalentes ao método de transmissão direta. A utilização de amostras de dimensões maiores deve contribuir para a redução da incerteza do método proposto e, futuramente, pretende-se demonstrar que a incerteza obtida pode ser menor do que a obtida pelo método direto. Esta solução ainda não foi implementada devido ao tamanho reduzido do tanque de ensaios e ao aumento considerável das dimensões e peso das amostras.

O método apresentado neste estudo fornece evidências da eficácia das medições de reflexão utilizando campos esféricos na determinação da impedância acústica característica de materiais submersos. A robustez do método de onda esférica é corroborada pelas medições experimentais dentro da faixa de impedâncias acústicas que resultaram em valores fortemente correlacionados com o método de transmissão direta, conforme visto na Figura 28.

A avaliação da elasticidade das amostras de concreto apresenta uma maior concordância com o método estabelecido (medição de velocidade ultrassônica UPV) para a idade de 28 dias de formação da amostra. Isto se deve ao tempo de cura do concreto ter sido alcançado (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2023). Durante o endurecimento, cada método pode ter apresentado uma sensibilidade diferente.

Quando se avalia a condição de estruturas de concreto existentes ou se planeja reparos, o módulo de elasticidade de Young pode fornecer informações sobre a integridade estrutural e a extensão dos danos ou deterioração. A medição realizada em quatro tipos de concretos de rigidez diferentes, por dois métodos distintos, gerou resultados equivalentes. Esta equivalência pode ser facilmente confirmada por um teste estatístico de similaridade de dados. O método proposto oferece o mesmo nível de confiabilidade do método UPV, ao mesmo tempo em que oferece a vantagem de não necessitar de contato direto do ultrassom com a amostra de concreto em análise, tornando assim possível a avaliação de estruturas ao longo do tempo.

O método proposto oferece uma configuração experimental mais adaptável para determinar a impedância acústica característica de amostras de concreto em situações em que medir a velocidade da onda longitudinal ou densidade é um desafio. Tem aplicações potenciais em vários campos, incluindo acústica subaquática, geofísica e ciência dos materiais. Este método poderá ser testado para avaliar a qualidade e durabilidade de materiais subaquáticos, como dutos, cabos e outras infraestruturas submersas.

5. CONCLUSÕES

A técnica de medição de impedância acústica característica desenvolvida neste estudo, que emprega ondas esféricas, destaca-se pela sua robustez em relação ao alinhamento do sistema de medição. Devido à simetria esférica, apenas o sinal proveniente do plano tangente à superfície da amostra retorna para o transdutor de recepção, conforme pode ser visto na Figura 18.

A onda esférica após percorrer uma distância de dez comprimentos de onda da fonte já pode ser considerada como uma aproximação de onda plana, tornando-a compatível com outras técnicas acústicas já estabelecidas.

A correção da divergência do feixe devido ao decaimento da amplitude da pressão acústica, lei do inverso da distância, foi implementada matematicamente, Equação (2.2) e o seu efeito foi compensado de forma satisfatória.

Mesmo diante das dimensões reduzidas das amostras, o efeito de difração nas bordas não comprometeu a determinação da impedância do material, especialmente quando se considera a região central da amostra.

Esse estudo demonstrou com sucesso a aplicabilidade do método de ondas esféricas no contexto da determinação da elasticidade do concreto submerso por meio da medição da impedância acústica. Este resultado não apenas contribui para a compreensão do comportamento acústico do concreto, mas também destaca o potencial dessa abordagem no campo da caracterização de sua integridade estrutural.

Produção Científica

O artigo intitulado *"Acoustic impedance measurement method using spherical waves"* foi disponibilizado na sua versão on-line na revista *Measurement* em 24 de novembro de 2023 e estará disponível na versão impressa em 15 de fevereiro de 2024. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.113921

O artigo intitulado "*A new approach to estimate submerged concrete strength by acoustic impedance"* foi submetido para publicação e encontra-se em revisão na revista Applied Acoustics sob o código APAC-S-23-02411.

Trabalhos Futuros

Como parte da evolução do método proposto, pode-se propor modificar a forma de onda do pulso de excitação acústica, substituindo-a por uma que abranja um espectro de frequências mais amplo. Ao eliminar as restrições de igualdade de fase e largura de pulso, será viável realizar a medição das propriedades reativas das amostras durante o ensaio. Até o momento, o método desenvolvido nos possibilitou medir a impedância acústica característica do material. Com essa melhoria, o método poderá ser aplicado em medições de impedância complexa e análise de superfícies reativas.

A aplicação demonstrada para medir a elasticidade do concreto foi realizada de forma pontual na amostra, obtendo resultados satisfatórios. No futuro, planeja-se estender a utilização desse método para avaliar sua aplicabilidade na elastografia do concreto. Serão mapeados corpos de prova com falhas intencionais para determinar a viabilidade do método desenvolvido detectar tais situações e assim poder ser utilizado no monitoramento de estruturas submersas.

Referências

ADAMOWSKI, J. C., BUIOCHI, F., HIGUTI, R. T. "Ultrasonic material characterization using large-aperture PVDF receivers", **Ultrasonics**, v. 50, n. 2, p. 110–115, 1 fev. 2010. DOI: 10.1016/J.ULTRAS.2009.09.018.

ALIA, A. "Ultrasonic diffraction by a circular transducer: Isogeometric analysis sensitivity to full Gauss quadrature points", **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 147, n. 2, p. EL74–EL79, 2020. DOI: 10.1121/10.0000591.

ALLARD, J. F., "Propagation of Sound in Porous Media". **Methods of Measuring the Acoustic Impedance**, Dordrecht, Springer, 1993. p. 207–219. DOI: 10.1007/978-94-011-1866-8_9.

ALTUN, B., DEMIRKAN, I., OZTURK ISIK, E., *et al.* "Acoustic impedance measurement of tissue mimicking materials by using scanning acoustic microscopy", **Ultrasonics**, v. 110, 2021. DOI: 10.1016/j.ultras.2020.106274.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6118:2023 - Projeto de Estruturas de Concreto - Procedimento**. 4th. ed. Rio de Janeiro, [s.n.], 2023.

BEAMISH, S., REDDYHOFF, T., HUNTER, A., *et al.* "A method to determine acoustic properties of solids and its application to measuring oil film thickness in bearing shells of unknown composition", **Measurement**, v. 195, p. 111176, 2022. DOI: 10.1016/j.measurement.2022.111176.

BERANEK, L. L., MELLOW, T. J., "The wave equation and solutions". **Acoustics: Sound Fields and Transducers**, 2nd. ed. London, Elsevier, 2012. p. 21–63. DOI: 10.1016/B978-0-12-391421-7.00002-6.

BILANIUK, N., WONG, G. S. K. "Speed of sound in pure water as a function of temperature", **Journal of the Acoustical Society of America**, v. 93, n. 3, p. 1609–1612, 1993. DOI: 10.1121/1.406819.

BLOOMFIELD, P. E., LO, W.-J., LEWIN, P. A. "Experimental study of the acoustical properties of polymers utilized to construct PVDF ultrasonic transducers and the acousto-

electric properties of PVDF and P(VDF/TrFE) films", **IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control**, v. 47, n. 6, p. 1397–1405, 2000. DOI: 10.1109/58.883528.

BRUEL & KJAER. "Calibration standard hydrophone", p. 12, 2023. Disponível em: https://www.bksv.com/en/products/transducers/acoustic/microphones/hydrophones/8104. Acesso em: 8 nov. 2023.

BURAK, Ü., ERDEN YILDIZDAG, M., BURADIR, U., *et al.* "Acoustic radiation from a sphere pulsating near an impedance plane using a boundary integral equation method", **Mathematics and Mechanics of Solids**, v. 27, n. 10, p. 1913–1929, 2022. DOI: 10.1177/10812865221085196.

CALDAS, R., PINTO, A., FERNANDA, H., *et al.* "Ultrasound monitoring of setting behavior of concrete mixtures", **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 16, n. 6, p. e16608, 2023. DOI: 10.1590/S1983-41952023000600008.

CASTILLO, M., ACEVEDO, P., MORENO, E. "KLM model for lossy piezoelectric transducers", **Ultrasonics**, v. 41, n. 8, p. 671–679, 2003. DOI: 10.1016/S0041-624X(03)00101-X.

CHANGFENG, M., JIANG, L. "Some research on Levenberg-Marquardt method for the nonlinear equations q", **Applied Mathematics and Computation**, n. 184, p. 1032–1040, 2007. DOI: 10.1016/j.amc.2006.07.004.

CHEN, Q., XIE, Y., CAO, H., *et al.* "Ultrasonic inspection of curved structures with a hemispherical-omnidirectional ultrasonic probe via linear scan SAFT imaging", **NDT&E International**, v. 129, p. 102650, 2022. DOI: 10.1016/j.ndteint.2022.102650.

DVOŘÁK, R., CHOBOLA, Z., KUSÁK, I. "Acoustic non-destructive testing of high temperature degraded concrete with comparison of acoustic impedance", **MATEC Web of Conferences**, v. 219, p. 03003, 2018. DOI: 10.1051/MATECCONF/ 201821903003.

ETTER, P. C. **Underwater Acoustic Modeling and Simulation**. 5th. ed. Florida, CRC Press, 2003.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 12504-4:2004(E) Testing concrete - Part 4: Determination of ultrasonic pulse velocity**. Brussels, [s.n.], 2004.

FEDERATION INTERNATIONALE DU BETON. **fib Model Code for Concrete**

Structures 2010. 1st. ed. [S.l.], Ernst & Sohn, 2013.

FENG, G., JIAN-XIN, W., BANG-RANG, D., *et al.* "Influence of diffraction effects on attenuation measurement using pulse transmission method", **Journal of Geophysics and Engineering**, v. 15, n. 4, p. 1610–1623, 2018. DOI: 10.1088/1742-2140/AAB8A4.

FOOTE, K. G. "Discriminating between the nearfield and the farfield of acoustic transducers", **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 136, n. 4, p. 1511–1517, 2014. DOI: 10.1121/1.4895701.

GAO, W., LIU, W., HU, Y., *et al.* "Study of Ultrasonic Near-Field Region in Ultrasonic Liquid-Level Monitoring System", **Micromachines**, v. 11, n. 8, p. 763, 2020. DOI: 10.3390/MI11080763.

GARCIA, C., FACUNDO, L., BALTAZAR, A., *et al.* "Ultrasonic Thickness Measurements Using Machine Learning", **Journal of Nondestructive Evaluation, Diagnostics and Prognostics of Engineering Systems**, v. 3, n. 3, 2020. DOI: 10.1115/1.4046721/1081964.

GHORBANIASL, G., SIOZOS-ROUSOULIS, L., LACOR, C. "A time-domain Kirchhoff formula for the convective acoustic wave equation", **Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, v. 472, n. 2187, 2016. DOI: 10.1098/rspa.2015.0689.

GINZEL, E., TURNBULL, B. "Determining Approximate Acoustic Properties of Materials", **e-Journal of Nondestructive Testing**, v. 21, n. 12, p. 10, 2016.

GODINHO, J. P., DE SOUZA JÚNIOR, T. F., MEDEIROS, M. H. F., *et al.* "Factors influencing ultrasonic pulse velocity in concrete", **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 13, n. 2, p. 222–247, 2020. DOI: 10.1590/S1983-41952020000200004.

HAACH, V. G., RAMIREZ, F. C. "Qualitative assessment of concrete by ultrasound tomography", 2016. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.05.056.

HANANE, S., AHMED, C., NOUREDDINE, A., *et al.* "P-Spice Modeling Three-Dimensional Propagation of Ultrasound Diffraction Considering a Gaussian Beam Approach", **Journal of Vibration and Acoustics**, v. 138, n. 1, 2016. DOI: 10.1115/1.4031824.

HAO WEN, JING MA, MEIJU ZHANG, *et al.*, "The comparison research of nonlinear curve fitting in Matlab and LabVIEW". **2012 IEEE Symposium on Electrical &**

Electronics Engineering (EEESYM), Kuala Lumur, IEEE, 2012. p. 74–77. DOI: 10.1109/EEESym.2012.6258591.

HE, P. "Direct measurement of ultrasonic dispersion using a broadband transmission technique", **Ultrasonics**, v. 37, n. 1, p. 67–70, 1999. DOI: 10.1016/S0041-624X(98)00040-7.

HIREMATH, N., KUMAR, V., MOTAHARI, N., *et al.* "An Overview of Acoustic Impedance Measurement Techniques and Future Prospects", **Metrology**, v. 1, n. 1, p. 17–38, 2021. DOI: 10.3390/metrology1010002.

HSU, D. K., HUGHES, M. S. "Simultaneous ultrasonic velocity and sample thickness measurement and application in composites", **J. Acoust. Soc. Am**, v. 92, n. 2, p. 669–675, 1992. DOI: 10.1121/1.405279.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC). **ISO/IEC17043:2023 - Conformity assessment - General requirements for the competence of proficiency testing providers**. Geneva, IEC, 2023. Disponível em: https://www.iso.org/standard/80864.html. Acesso em: 31 jan. 2024.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC). **TS 63081:2019 Ultrasonics - Methods for the characterization of the ultrasonic properties of materials**. 1st. ed. Geneva, IEC, 2019. Disponível em: https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/91be19e2-f9c1-4617-b7e9-d5c269b7e254/iec-ts-63081-2019. Acesso em: 31 jan. 2024.

JOINT COMMITTEE FOR GUIDES IN METROLOGY, (BIPM/JCGM). "JCGM 100:2008 Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement", **International Organization for Standardization**, n. September, p. 134, 2008. Disponível em: http://www.bipm.org/en/publications/guides/gum.html.

KATZIR, S., "THE DISCOVERY OF THE PIEZOELECTRIC EFFECT". **THE BEGINNINGS OF PIEZOELECTRICITY**, Dordrecht, Springer Netherlands, 2006. p. 15–64. DOI: 10.1007/978-1-4020-4670-4_2. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4020-4670-4_2. Acesso em: 16 out. 2023.

KAUSHIK, A., GUPTA, A. "Reflection of oblique incident acoustic waves at various fluid–solid interface for varying material properties", **Applied Acoustics**, v. 174, p. 107611, 2021. DOI: 10.1016/j.apacoust.2020.107611.

KHAIRI, M. T. M., IBRAHIM, S., YUNUS, M. A. M., *et al.* "Ultrasound computed tomography for material inspection: Principles, design and applications", **Measurement: Journal of the International Measurement Confederation**, v. 146, p. 490–523, 1 nov. 2019. DOI: 10.1016/J.MEASUREMENT.2019.06.053.

KINSLER, L. E., FREY, A. R., COPPENS, A. B., *et al.* **Fundamentals of Acoustics**. 4th. ed. New York, John Wiley & Sons, 2000.

KRAUTKRÄMER, J., KRAUTKRÄMER, H. **Ultrasonic Testing of Materials**. 3 rd ed. Heidelberg, Springer Verlag, 1983.

KUSHIBIKI, J.-I., ARAKAWA, M. "Diffraction effects on bulk-wave ultrasonic velocity and attenuation measurements", **J. Acoust. Soc. Am**, v. 108, p. 44, 2000. DOI: 10.1121/1.429587.

LEACH, W. M. "Controlled-Source Analogous Circuits and SPICE Models for Piezoelectric Transducers", **IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control**, v. 41, n. 1, p. 60–66, 1994. DOI: 10.1109/58.265821.

LÉVÊQUE, G., ROSENKRANTZ, E., LAUX, D. "Correction of diffraction effects in sound velocity and absorption measurements", **Measurement Science and Technology**, v. 18, n. 11, p. 3458–3462, 2007. DOI: 10.1088/0957-0233/18/11/028.

LI, H., HU, Y., LI, L., *et al.* "Acoustic Matching Characteristics of Annular Piezoelectric Ultrasonic Sensor", **Archives of Acoustics**, v. 47, n. 2, p. 275–284, 2022. DOI: 10.24425/aoa.2022.141656.

LI, J., WANG, S., TAO, Y., *et al.* "A novel expression of the spherical-wave reflection coefficient at a plane interface", **Geophysical Journal International**, v. 211, n. 2, p. 700–717, 2017. DOI: 10.1093/GJI/GGX308.

LOOTENS, D., SCHUMACHER, M., LIARD, M., *et al.* "Continuous strength measurements of cement pastes and concretes by the ultrasonic wave reflection method", **Construction and Building Materials**, v. 242, p. 117902, 10 maio 2020. DOI: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2019.117902.

LUBBERS, J., GRAAFF, R. "A simple and accurate formula for the sound velocity in water", **Ultrasound in Medicine & Biology**, v. 24, n. 7, p. 1065–1068, 1998. DOI: 10.1016/S0301-5629(98)00091-X.

MALHOTRA, V. M., CARINO, N. J. **Handbook on Nondestructive Testing of**

Concrete. 2nd. ed. Boca Raton, CRC Press, 2003.

MARCANTONIO, V., MONARCA, D., COLANTONI, A., *et al.* "Ultrasonic waves for materials evaluation in fatigue, thermal and corrosion damage: A review", **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 120, p. 32–42, 1 abr. 2019. DOI: 10.1016/J.YMSSP.2018.10.012.

METWALLY, K., LEFEVRE, E., BARON, C., *et al.* "Measuring mass density and ultrasonic wave velocity: A wavelet-based method applied in ultrasonic reflection mode", **Ultrasonics**, v. 65, p. 10–17, fev. 2016. DOI: 10.1016/j.ultras.2015.09.006.

MOLINIÉ, P., BOUDIA, S. "Mastering picocoulombs in the 1890s: The Curies' quartz-electrometer instrumentation, and how it shaped early radioactivity history", **Journal of Electrostatics**, v. 67, p. 524–530, 2009. DOI: 10.1016/j.elstat.2009.01.031.

MORRIS, S. A., HUTCHENS, C. G. "Implementation of Mason's Model on Circuit Analysis Programs", **IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control**, v. 33, n. 3, p. 295–298, 1986. DOI: 10.1109/T-UFFC.1986.26832.

MORTADA, H., MOUSHARRAFIE, S. El, MAHFOUD, E., *et al.* "Noncontact nondestructive ultrasonic techniques for manufacturing defects monitoring in composites: a review", **Structural Health Monitoring**, p. 1–29, 2023. DOI: 10.1177/14759217231184589.

MOULD, R. F. "Pierre Curie, 1859–1906", **Current Oncology**, v. 14, n. 2, p. 74–82, 2007. DOI: 10.3747/co.2007.110.

PANG, Y. Z., YU, X. L., ZHANG, X. W., *et al.* "Measuring the Acoustic Properties of Underwater Coating Material under Pressure-Acoustic Impedance Method", **Chuan Bo Li Xue/Journal of Ship Mechanics**, v. 21, n. 3, p. 372–381, 1 mar. 2017. DOI: 10.3969/J.ISSN.1007-7294.2017.03.012.

PETERS, F., PETIT, L. "A broad band spectroscopy method for ultrasound wave velocity and attenuation measurement in dispersive media", **J. Appl. Phys**, v. 49, n. 8, p. 4320–4327, 1978. DOI: 10.1016/S0041-624X(03)00109-4.

PIALUCHA, T., CAWLEY, P. "An investigation of the accuracy of oblique incidence ultrasonic reflection coefficient measurements", **Journal of the Acoustical Society of America**, v. 96, n. 3, p. 1651–1660, 1994. DOI: 10.1121/1.410244.

PIERCE, A. D. **Acoustics: An Introduction to Its Physical Principles and**

Applications. 3. ed. Switzerland, Springer International Publishing, 2019.

SACHSE, W., PAO, Y. H. "On the determination of phase and group velocities of dispersive waves in solids", **Journal of Applied Physics**, v. 49, n. 8, p. 4320–4327, 1 ago. 1978. DOI: 10.1063/1.325484.

SADEGHPOUR, S., MEYERS, S., KRUTH, J. P., *et al.* "Resonating Shell: A Spherical-Omnidirectional Ultrasound Transducer for Underwater Sensor Networks", **Sensors (Basel, Switzerland)**, v. 19, n. 4, 2019. DOI: 10.3390/S19040757.

SANCEVERO, S. S., REMACRE, A. Z., PORTUGAL, R. D. S. "O papel da inversão para a impedância acústica no processo de caracterização sísmica de reservatórios", **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 24, n. 4, p. 495–512, 2006. DOI: 10.1590/S0102-261X2006000400004.

SELFRIDGE, A. R. "Approximate Material Properties in Isotropic Materials", **IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics**, v. 32, n. 3, p. 381–394, 1985. DOI: 10.1109/T-SU.1985.31608.

SHEN, Z., XU, J., LI, Z., *et al.* "An Improved Equivalent Circuit Simulation of High Frequency Ultrasound Transducer", **Frontiers in Materials**, v. 8, p. 663109, 2021. DOI: 10.3389/FMATS.2021.663109/BIBTEX.

SIGRIST, R. M. S., LIAU, J., KAFFAS, A. El, *et al.* "Ultrasound Elastography: Review of Techniques and Clinical Applications", **Theranostics**, v. 7, n. 5, p. 1303–1329, 2017. DOI: 10.7150/THNO.18650.

SKUDRZYK, E. J. **The Foundations of Acoustics: Basic Mathematics and Basic Acoustics**. 1st. ed. Vienna, Springer-Verlag, 1971.

SOARES, P. A., BENEDETTI, A. Z., SOUZA, T. C., *et al.* "Early-age behavior of blast-furnace slag cement pastes produced with carbon nanotubes grown directly on clinker", **IBRACON Structures and Materials Journal**, v. 13, n. 3, p. 603–612, 2020. DOI: 10.1590/S1983-41952020000300010.

THOMAS D. ROSSING (Org.). **Springer Handbook of Acoustics**. 1st. ed. New York, Springer, 2007.

TOHMYOH, H., TERASHIMA, S. "Trial for Monitoring the Water Temperature Utilizing the Frequency Dependence of Reflection Coefficient of Ultrasound Passing Through Thin Layer", **Journal of Nondestructive Evaluation, Diagnostics and**

Prognostics of Engineering Systems, v. 2, n. 2, 2019. DOI: 10.1115/1.4042871/727548.

TREEBY, B. E., BUDISKY, J., WISE, E. S., *et al.* "Rapid calculation of acoustic fields from arbitrary continuous-wave sources", **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 143, n. 1, p. 529–537, 2018. DOI: 10.1121/1.5021245.

TREEBY, B. E., COX, B. T. "A k-space Green's function solution for acoustic initial value problems in homogeneous media with power law absorption", **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 129, n. 6, p. 3652, 2011. DOI: 10.1121/1.3583537.

VILARDELL, J., AGUADO, A., AGULLO, L., *et al.* "Estimation of the modulus of elasticity for dam concrete", **Cement and Concrete Research**, v. 28, n. 1, p. 93–101, 1998. DOI: 10.1016/S0008-8846(97)00214-7.

WANG, G., YANG, L., GENG, H., *et al.* "Research on deflection and focusing technology of pipeline annular ultrasonic phased array", **Measurement**, v. 223, p. 113573, 1 dez. 2023. DOI: 10.1016/J.MEASUREMENT.2023.113573.

XU, J., LIN, S., HU, J. "Electromechanical equivalent circuit and coupled vibration of the radially composite cylindrical piezoelectric transducer", **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 286, p. 133–145, 2019. DOI: 10.1016/j.sna.2018.12.023.

ZEQIRI, B., SCHOLL, W., ROBINSON, S. P. "Measurement and testing of the acoustic properties of materials: a review", **Metrologia**, v. 47, n. 2, p. S156--S171, mar. 2010. DOI: 10.1088/0026-1394/47/2/s13.

ZHANG, Y., WANG, L., QIN, L., *et al.* "Spherical-Omnidirectional Piezoelectric Composite Transducer for High- Frequency Underwater Acoustics", **IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control**, v. 68, n. 5, p. 1791–1796, 2021. DOI: 10.1109/TUFFC.2020.3042736.

ZHENG, D.-D., MAO, Y., CUI, Z., *et al.* "Optimization of equivalent circuit model for piezoelectric ultrasonic transducer", **International Instrumentation and Measurement Technology Conference - I2MTC 2018**, p. 1–5, 2018. DOI: 10.1109/I2MTC.2018.8409525.

APÊNDICE A – Programa de simulação de campo acústico

O código a seguir foi desenvolvido para uso com o toolbox **K-Wave/Matlab®:**

```
close all
clear all
clc

%#####################################################################
%#                                GRADE                              #
%#####################################################################
% compute dx and Nx based on a desired x_size and f_max
x_size = 0.7;                % distância em x [m]
y_size = 0.6;                % distância em y [m]
f_max = 200000 ;             % frequência máxima
points_per_wavelength = 3;  % Teorema de Nyquist (mínimo=3)
c0_min = 1500;              % [m/s]
dx = c0_min/(points_per_wavelength*f_max);
dy = dx;
Nx = round(x_size/dx);
Ny = round(y_size/dx);
kgrid = kWaveGrid(Nx, dx, Ny, dy);
%---------------------------------------------------------------
% Nx = 600; % number of grid points in the x (row) direction
% Ny = 700; % number of grid points in the y (column) direction
% dx = 0.2e-3; % grid point spacing in the x direction [m]
% dy = 0.2e-3; % grid point spacing in the y direction [m]
%---------------------------------------------------------------
%#####################################################################
%#                              MEIO                                 #
%#####################################################################
%---------------------------------------------------------------
%                      ÁGUA
medium.sound_speed = 1500*ones(Nx, Ny); % [m/s]
medium.density = 1040 * ones(Nx,Ny);    % [kg/m^3]
medium.alpha_coeff = 0.75;              % [dB/(MHz^y cm)]
medium.alpha_power = 1.5;
%---------------------------------------------------------------
%                      ACRÍLICO
Eacr = 1e-2;             % espessura da parede do tanque acrílico [m]
Nacr = round(Eacr/dx);    % espessura em grids do tanque de acrílico;

medium.sound_speed(1:Nacr,:) = 2750;        %velocidade do acrílico
medium.sound_speed(Nx-Nacr:Nx,:) = 2750;    %velocidade do acrílico
medium.sound_speed(:,1:Nacr) = 2750;        %velocidade do acrílico
medium.sound_speed(:,Ny-Nacr:Ny) = 2750;    %velocidade do acrílico
medium.density(1:Nacr,:) = 1190;            %densidade do acrílico
medium.density(Nx-Nacr:Nx,:) = 1190;        %densidade do acrílico
```

```
medium.density(:,1:Nacr) = 1190;          %densidade do acrílico
medium.density(:,Ny-Nacr:Ny) = 1190;      %densidade do acrílico
%-------------------------------------------------------------
%                    CONCRETO
Econc = 8e-2;                    % espessura do concreto [m] 8e-2
Lconc = 40e-2;                   % Largura concreto 40e-2
NEconc = round(Econc/dx);            % espessura em grids
NLconc = round(Lconc/dx);            % largura em grids
Awall = 7e-2;                    % afastamento da parede 6e-2
Awgrid = round(Awall/dx);            % afastamento em grids

medium.sound_speed((Nx/2)-
(NLconc/2):(Nx/2)+(NLconc/2),Awgrid+Nacr:Awgrid+Nacr+NEconc)= 3900;
medium.density((Nx/2)-
(NLconc/2):(Nx/2)+(NLconc/2),Awgrid+Nacr:Awgrid+Nacr+NEconc)= 2290;
% create the time array using makeTime setting the end time
kgrid.t_array = makeTime(kgrid, medium.sound_speed, [], 400e-6);
%-------------------------------------------------------------
%medium.alpha_power = 1.5;
%medium.alpha_coeff = 0.75; % [dB/(MHz^y cm)]

%#################################################################
%#                                FONTE TX                       #
%#################################################################
Ctro = -2e-2;                                % deslocamento do centro [m]
Ctro = round(Ctro/dx);

source.p_mask=zeros(Nx,Ny);                  % posição do transdutor
Dhydr = 11e-2;                               % distância do transdutor [m]
Sep = 4e-2;                                  %separação entre transdutores
Sep = round(Sep/dx);
Dhydr = round(Dhydr/dx)+NEconc+Awgrid+Nacr;          % D hydrofone da amostra
source.p_mask(Ctro+(Nx/2)+(Sep/2),Dhydr)= 1;         % transdutor pontual

% define properties of the input signal
source_strength = 50;         % [Pa]
tone_burst_freq = 76e3;       % [Hz]
tone_burst_cycles = 3;
% create the input signal using toneBurst
source.p = source_strength .* toneBurst(1/kgrid.dt, tone_burst_freq, tone_burst_cycles);

%#################################################################
%#                            RECEPTOR RX                        #
%#################################################################
% sensor.record = {'p', 'p_final'};
% Define receptor pontual
sensor.mask = zeros(Nx, Ny);
sensor.mask(Ctro+(Nx/2)-(Sep/2),Dhydr) = 1;

% sensor_radius = 2e-2; % [m]
```

```
% num_sensor_points = 1;
% sensor.mask = makeCartCircle(sensor_radius, num_sensor_points);

%#########################################################################
%#                                SIMULAÇÃO                              #
%#########################################################################
% run the simulation
sensor_data = kspaceFirstOrder2D(kgrid, medium, source, sensor,'PlotLayout', true);

%#########################################################################
%#                          RESULTS                                      #
%#########################################################################
figure
dt = kgrid.dt;
t=1e6*[0:length(sensor_data)-1]*dt;
plot(t,sensor_data)
grid on
xlabel('tempo [us]')
```

Abaixo o resultado da simulação: Figura 18 e Figura 19 descritas neste trabalho.

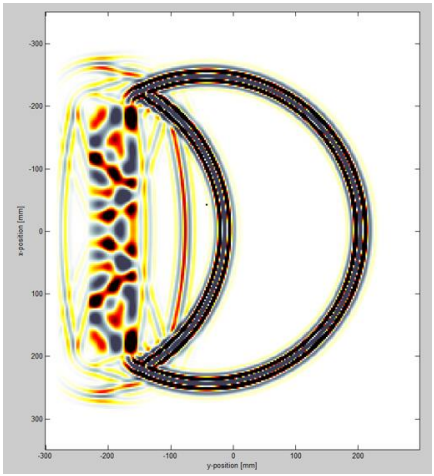


Figura 18

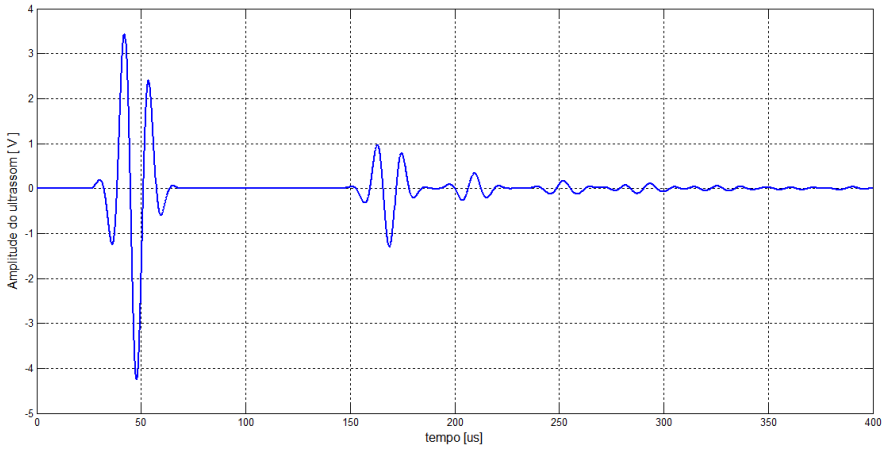


Figura 19