



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E
DE COMPUTAÇÃO



Sistema ultrassônico aplicado à detecção de interfaces geológicas em caixa de areia

Gabriel Araújo Almeida Figueiredo

Orientador: Prof. Dr. Andres Ortiz Salazar

Coorientador: Prof. Dr. Carlos César Nascimento da Silva

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação da UFRN (área de concentração: Automação e Sistemas) como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Natal, RN, agosto de 2025

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN
Sistema de Bibliotecas - SISBI
Catalogação de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Central Zila Mamede

Figueiredo, Gabriel Araujo Almeida.

Sistema ultrassônico aplicado à detecção de interfaces
geológicas em caixa de areia / Gabriel Araujo Almeida
Figueiredo. - 2025.

73 f.: il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande
do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica e de Computação, Natal, 2025.

Orientação: Prof. Dr. Andres Ortiz Salazar.

Coorientação: Prof. Dr. Carlos César Nascimento da Silva.

1. Caixa de areia - Dissertação. 2. Reflexão sísmica
Ultrassônica - Dissertação. 3. Processador digital de sinais -
Dissertação. I. Salazar, Andres Ortiz. II. Silva, Carlos César
Nascimento da. III. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 550

Elaborado por Jackeline dos Santos Pinheiro da Silva Maia
Cavalcanti - CRB-15/317

Sistema ultrassônico aplicado à detecção de interfaces geológicas em caixa de areia

Gabriel Araújo Almeida Figueiredo

Dissertação de Mestrado aprovada em 11 de agosto de 2025 pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Dr. Andres Ortiz Salazar (orientador) DCA/UFRN

Prof. Dr. Carlos César Nascimento da Silva (coorientador) ... GEOFÍS/UFRN

Prof. Dr. Diego Antônio De Moura Fonseca DCA/UFRN

Profª Dr. Ricardo Ferreira Pinheiro Filho IFRN

*À minha esposa, Milena, pelo apoio
incondicional ao longo desta
jornada.*

*Ao meu filho, Nicolas, por ser o
início de tudo que sou.*

*Ao meu amigo, Cid, que acompanha
dos céus esta conquista.*

Agradecimentos

A Deus, por me conceder forças, saúde e sabedoria durante toda a jornada do mestrado.

Aos meus pais, Adriano Figueiredo e Socorro Araújo, por sempre me apoiarem com amor e incentivo incondicional em minhas decisões.

Aos meus irmãos, Talisson e Felipe, por sempre torcerem pelo meu progresso.

À minha esposa, Milena, pelo amor, pela compreensão, pela paciência e pelo apoio nos momentos mais desafiadores dessa caminhada.

Ao meu filho, Nicolas, que, mesmo involuntariamente, é responsável por recarregar minhas energias e nunca me deixar acomodar.

Ao meu orientador, Dr. Andres Ortiz, pelas valiosas contribuições ao longo deste trabalho e pela extrema empatia na conciliação da minha jornada profissional e acadêmica. O senhor fez a diferença na minha vida.

Ao meu coorientador, Dr. Carlos César, pelas sugestões técnicas, pelos ensinamentos sobre a fascinante área da geofísica e por sua disponibilidade durante todo o desenvolvimento da pesquisa.

Ao professor Dr. Fernando César, por viabilizar a execução financeira deste trabalho por meio do Projeto de Pesquisa assinado com a Petrobras, além do suporte técnico na especificação e fornecimento dos materiais granulares utilizados.

Aos professores membros da banca, Dr. Diego Moura e Dr. Ricardo Pinheiro, pelas valiosas contribuições na consolidação deste trabalho.

Aos amigos Anderson Costa e Klyfton Stanley, que integraram a equipe de desenvolvimento deste projeto de pesquisa e contribuíram diretamente para a execução desta etapa.

Aos colegas do LAMP, com quem tive pouco contato simultâneo ao longo da trajetória, mas cuja energia positiva sempre foi contagiante quando presente.

À CAPES, pelo apoio financeiro concedido.

Resumo

A modelagem geológica em caixas de areia é uma ferramenta eficaz para replicar e investigar a propagação de reflexões sísmicas em ambiente controlado, proporcionando resultados mais representativos em relação às simulações puramente computacionais. Essa técnica permite estudar de forma detalhada fenômenos como reflexão, refração e dispersão de ondas em interfaces, consequência da sobreposição de diferentes materiais.

Entretanto, a implementação desses experimentos enfrenta desafios, especialmente quanto ao alto custo de transdutores ultrassônicos adequados, que devem apresentar ampla abertura de feixe e banda larga de frequências, a fim de detectar uma variedade de sinais refletidos por materiais distintos. Além disso, os sistemas descritos na literatura são, em sua maioria, compostos por dispositivos descentralizados e específicos para cada função, exigindo computadores para controle e processamento, conversores digital-analógico para emissão dos sinais e conversores analógico-digital de alta resolução para aquisição dos dados, elevando significativamente a complexidade e o custo do conjunto.

Neste contexto, o presente trabalho propõe o uso de transdutores ultrassônicos comerciais de menor custo, com características mais limitadas, aliados a um processador digital de sinais (DSP) responsável por integrar a geração do pulso, a aquisição e a transmissão dos dados. Complementarmente, serão empregadas técnicas de seleção e disposição de materiais na caixa de areia, visando maximizar a detecção das interfaces. Essa abordagem busca equilibrar custo e desempenho, viabilizando a realização de experimentos com resultados consistentes mesmo em cenários de recursos restritos.

Palavras-chaves: Caixa de Areia, Reflexão Sísmica Ultrassônica, Interfaces Geológicas, Processador Digital de Sinais

Abstract

Geological modeling in sandboxes is an effective tool for replicating and investigating the propagation of seismic reflections in a controlled environment, providing results that are more representative compared to purely computational simulations. This technique enables a detailed study of phenomena such as reflection, refraction, and wave dispersion at interfaces composed of different materials.

However, the implementation of these experiments faces challenges, especially regarding the high cost of suitable ultrasonic sensors, which must have a wide beam angle and broad frequency bandwidth to detect a variety of signals reflected by different materials. Furthermore, most systems described in the literature are composed of decentralized, dedicated devices for each function — requiring computers for control and processing, digital-to-analog converters for signal emission, and high-resolution analog-to-digital converters for data acquisition, which significantly increases the complexity and cost of the system.

In this context, the present work proposes the use of more affordable commercial ultrasonic sensors, even with more limited characteristics, combined with a digital signal processor (DSP) responsible for integrating pulse generation, data acquisition, and transmission. Additionally, techniques for selecting and arranging materials within the sandbox will be employed to maximize interface detection. This approach seeks to balance cost and performance, making it possible to conduct experiments with consistent results even in resource-constrained scenarios.

Keywords: Seismic Modeling, Sandbox, Data Acquisition, Signal Processing, Ultrasonic Transducers.

Sumário

Sumário	i
Lista de Figuras	iii
Lista de Tabelas	v
Lista de Símbolos e Abreviaturas	vii
1 Introdução	1
1.1 Primeira etapa do projeto	2
1.2 Segunda etapa do projeto	3
2 Referencial Teórico	5
2.1 O ensaio sísmico de reflexão	5
2.1.1 Conceitos fundamentais da sísmica de reflexão	6
2.2 Aplicação da sísmica de reflexão em caixas de areia	8
2.2.1 Topologias experimentais em ensaios sísmicos laboratoriais	10
2.3 Elementos piezoelétricos	13
2.3.1 Diretividade e largura de banda de um transdutor ultrassônico	14
2.4 Sinais Analógicos e o Processador Digital de Sinais (PDS)	15
2.4.1 Os amplificadores de sinais analógicos	17
3 Desenvolvimento do sistema ultrassônico	21
3.1 Geração e aquisição de sinais ultrassônicos	22
3.1.1 Configuração dos periféricos do DSP	23
3.1.2 Os transdutores ultrassônicos comerciais de baixo custo	23
3.1.3 O módulo amplificador de transmissão do sinal ultrassônico	25
3.1.4 O módulo amplificador de recepção do sinal ultrassônico	26
3.1.5 Montagem dos transdutores ultrassônicos	28
3.1.6 Preparação das camadas granulométricas	30
3.2 Registro e processamento dos dados	32
3.3 Comissionamento do sistema ultrassônico	33
3.4 Custo financeiro do sistema ultrassônico proposto	37
4 Experimentos e Resultados	39
4.1 Ajuste de foco do transdutor ultrassônico	39
4.2 Seção sísmica no reservatório acrílico	45

5 Conclusão	49
5.1 Trabalhos futuros	50
Referências bibliográficas	51

Lista de Figuras

1.1	Sistema de posicionamento da primeira fase do projeto.	2
1.2	Sistema de aquisição da primeira fase do projeto.	3
2.1	Representação do ensaio sísmico de reflexão com cabos flutuantes.	5
2.2	Ilustração simplificada das propagações das ondas de volume em um plano 2D.	6
2.3	Composição de um sismograma sintético de acordo com o coeficiente de reflexão.	7
2.4	Seção sísmica interpretada por um geofísico	8
2.5	Sistema experimental para estudo da sísmica por reflexão em laboratório.	9
2.6	Seção sísmica em diferentes configurações de granulometrias.	10
2.7	Sistema de aquisição de dados sísmicos descentralizados.	12
2.8	Efeito piezoelétrico em um cristal	13
2.9	Exemplo da diferença de abertura de um feixe para os sensores de 40 kHz e 200 kHz	14
2.10	Resposta em frequência de um sensor ultrassônico de banda larga	15
2.11	Procedimento para amostragem do sinal	16
2.12	Modelo ideal de um amplificador operacional	17
2.13	Modelos de configurações de um amplificador operacional	18
3.1	Sistema ultrassônico proposto para ensaio sísmico em caixa de areia.	21
3.2	LAUNCHXL-F28379D da Texas Instruments ®	22
3.3	Fluxograma de utilização dos periféricos do DSP.	24
3.4	Módulo amplificador com CI LT1210 e THS4001.	25
3.5	Circuito soldado em placa ilhada	27
3.6	Módulo amplificador em cascata com ganho máximo de 100 vezes	27
3.7	Representação 3D do suporte desenvolvido para os transdutores ultrassônicos	29
3.8	Cotas em milímetros do suporte para fixação dos transdutores ultrassônicos	29
3.9	Montagem e vedação do suporte para fixação dos transdutores ultrassônicos	30
3.10	Classificação granulométrica das microesferas de vidro (600 μm , 425 μm , 250 μm e 150 μm)	31
3.11	Montagem e distribuição das microesferas no recipiente acrílico	32
3.12	Fluxograma de aquisição do sinal ultrassônico no computador	33
3.13	Montagem para verificação do funcionamento do botão.	34
3.14	Observação via osciloscópio do sinal emitido pelo DAC para uma frequência de 200 kHz e 5 pulsos	35

3.15	Observação via osciloscópio dos sinais de emissão (DAC) e recepção amplificado	35
3.16	Resultado da amostragem do ADC no Code Composer Studio ®	36
4.1	Sistema ultrassônico completo	39
4.2	Variação da distância entre os transdutores: 25 mm até 45 mm	40
4.3	Diretividade dos transdutores ultrassônicos e suas respectivas áreas de detecção	40
4.4	Ensaio sísmico com 25 mm de distância	41
4.5	Ensaio sísmico com 30mm de distância	42
4.6	Ensaio sísmico com 35mm de distância	43
4.7	Ensaio sísmico com 40mm de distância	44
4.8	Ensaio sísmico com 45mm de distância	45
4.9	Procedimento para realização do ensaio sísmico de reflexão no reservatório	46
4.10	Traços sísmicos do ensaio	47
4.11	Seção sísmica 2D da área ensaiada	47

Lista de Tabelas

2.1	Componentes e especificações técnicas do sistema sísmico em tanque . .	11
3.1	Especificações Técnicas do LAUNCHXL-F28379D	23
3.2	Resumo dos transdutores ultrassônicos disponíveis para utilização nos en- saio sísmicos em caixa de areia.	25
3.3	Especificações do módulo amplificador para excitação dos transdutores .	26
3.4	Características técnicas principais do CI CA3140.	28
3.5	Estimativa de custos dos principais componentes utilizados no sistema . .	37
4.1	Cálculo de velocidade com base no tempo de eco - 25 mm	41
4.2	Cálculo de velocidade com base no tempo de eco - 30 mm	43
4.3	Cálculo de velocidade com base no tempo de reflexão - 35 mm	44
4.4	Cálculo de velocidade com base no tempo de reflexão - 40 mm	44

Lista de Símbolos e Abreviaturas

®	Marca Registrada
ADC	<i>Analog to Digital Converter</i>
AmpOp	Amplificador operacional
CAN	<i>Controller Area Network</i>
DAC	<i>Digital to Analog Converter</i>
DSP	<i>Digital Signal Processor</i>
eCAP	<i>Enhanced Capture</i>
ePWM	<i>Enhanced Pulse Width Modulation</i>
G	Ganho de um amplificador operacional
I2C	<i>Inter-Integrated Circuit</i>
McBSP	<i>Multichannel Buffered Serial Port</i>
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i>
UART	<i>Universal Asynchronous Receiver-Transmitter</i>

Capítulo 1

Introdução

O experimento de sísmica por reflexão em caixa de areia tem como objetivo reproduzir, em escala reduzida, os ensaios sísmicos que buscam localizar e caracterizar as propriedades dos materiais nas camadas da subsuperfície terrestre (Buddensiek 2009). Esse método combina a complexidade de criar perfis geológicos do substrato com o controle das variáveis que um sistema de escala laboratorial permite (Sherlock & Evans 1999).

Por sua vez, em grande escala, o ensaio sísmico possui aplicabilidade em áreas como a prospecção de águas subterrâneas e mineralizações, bem como na investigação de diversos problemas geotécnicos, tais como o mapeamento de falhas e fraturas em rochas, a detecção de carstes subterrâneos e de tubulações enterradas. Além disso, ganha destaque na prospecção de reservatórios para exploração de petróleo (Vilas Boas & Botelho 2014). Esses ensaios podem ser reproduzidos em escala reduzida, simulando, com várias simplificações, algumas das condições reais observadas em campos de pesquisa, proporcionando uma compreensão mais detalhada e controlada dos processos geofísicos que ocorrem na crosta terrestre. Essa abordagem pode ser aplicada tanto para validação de modelos teóricos quanto para a análise e otimização de técnicas de exploração e monitoramento em ambientes naturais e industriais (Krawczyk et al. 2013).

A grande dificuldade nas técnicas tradicionais de monitoramento sísmico em laboratório é a limitação na visualização em 3D das estruturas dentro de corpos opacos (Krawczyk et al. 2013). Entre as técnicas alternativas à sísmica de reflexão está a tomografia computadorizada para observar a evolução dos ensaios em caixa de areia, que, embora seja eficaz para fornecer imagens do interior dos modelos, esse método exige a análise de cenas distintas de modelos em evolução, o que limita sua aplicabilidade em modelos dinâmicos (Schreurs et al. 2003). Para superar essas limitações, introduziu-se a vibrometria a *laser-Doppler* para caracterizar sistematicamente o material granular em modelos análogos, embora seus resultados fossem restritos à estimativa das propriedades elásticas e não fornecessem imagens estruturais (Michlmayr et al. 2013). Esses desafios foram superados quando combinaram a interferometria a laser com modelagem viscoelástica para confirmar os tempos de chegada e as amplitudes de ondas sísmicas em modelos termoplásticos e baseados em resina (Pratt et al. 1999).

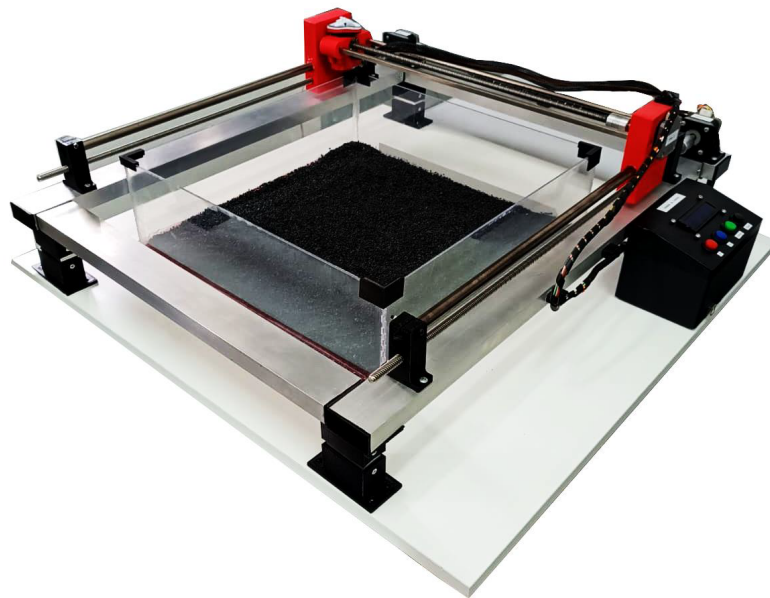
Dessa forma, é possível constatar que a construção dos outros métodos implica em uma necessidade de alto custo de implementação, com dispositivos descentralizados e dedicados para cada uma das etapas da aquisição sísmica (Buddensiek 2009). Assim,

foi visto como oportunidade de melhoria no custo benefício do projeto a implementação de um sistema sísmico por reflexão em caixa de areia com simplificações dos sistemas construídos por outras instituições de pesquisa. Com isso, para este trabalho, optou-se por simplificar os transdutores utilizados para transmissão e recepção do sinal, que agora passa a ser um sensor ultrassônico comercial de banda estreita e baixo custo. Além disso, foi centralizado o dispositivo de geração e aquisição dos dados, sendo utilizado um processador digital de sinais que possui um conjunto de conversores analógico-digital e digital-analógico que serão analisados ao longo deste trabalho.

1.1 Primeira etapa do projeto

Este trabalho integra a segunda fase de um projeto de pesquisa iniciado no contexto do Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Computação (PPGEEC) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), cuja primeira etapa concentrou-se no desenvolvimento de um sistema de movimentação em dois eixos e na implementação de um *software* dedicado à aquisição dos dados ultrassônicos, com frequência de 40 kHz, para imageamento da superfície da caixa de areia. O controle de posicionamento foi desenvolvido por Costa (2024) e sua construção pode ser observada na Figura 1.1.

Figura 1.1: Sistema de posicionamento da primeira fase do projeto.

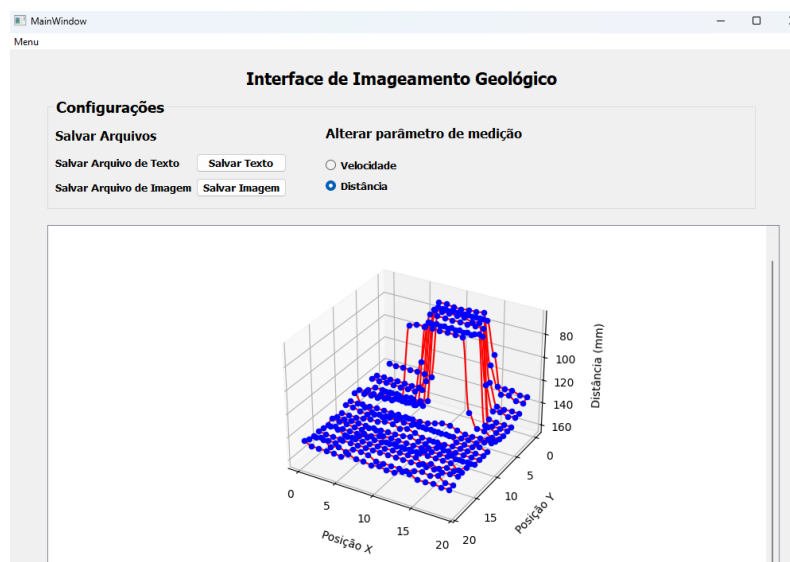


Fonte: Costa (2024).

O *software* inicial do protótipo foi desenvolvido para compor a visualização em duas, ou três, dimensões da camada superficial da caixa de areia, utilizando o módulo ultrassônico HC-SR04 e um microcontrolador, estabelecendo comunicação serial com o compu-

tador para aquisição dos dados (Queiroz 2025). Na Figura 1.2, é apresentada a interface gráfica do *software* com o imageamento em três dimensões de um cubo, de acordo com a informação de tempo entre a emissão e recepção do sinal emitido.

Figura 1.2: Sistema de aquisição da primeira fase do projeto.



Fonte: Queiroz (2025).

1.2 Segunda etapa do projeto

Para a segunda fase do projeto, o objetivo do protótipo será a obtenção dos dados entre camadas dos materiais depositados na caixa de areia, e não somente os dados de superfície, utilizando uma frequência de 200 kHz no meio aquoso. Desta forma, neste trabalho será apresentada a proposta de implementação física de um sistema de obtenção de dados sísmicos por reflexão em caixas de areia, além da fundamentação teórica para a construção de um protótipo para a geração e aquisição de sinais ultrassônicos.

O Capítulo 1 apresenta a contextualização da problemática envolvendo estas tecnologias e o objetivo do trabalho. O Capítulo 2 apresenta a base bibliográfica e os conceitos importantes para entendimento dos recursos necessários para realização do ensaio de forma adequada. O Capítulo 3 trata dos passos necessários para implementação de cada uma das etapas do processo de funcionamento do sistema proposto. O Capítulo 4 traz os primeiros resultados práticos do sistema de geração de ondas ultrassônicas e os ensaios propostos para a conclusão do trabalho. Por fim, o Capítulo 5 apresenta um resumo do trabalho desenvolvido, conclusões dos resultados obtidos e uma lista de itens possíveis para melhoria do projeto.

Capítulo 2

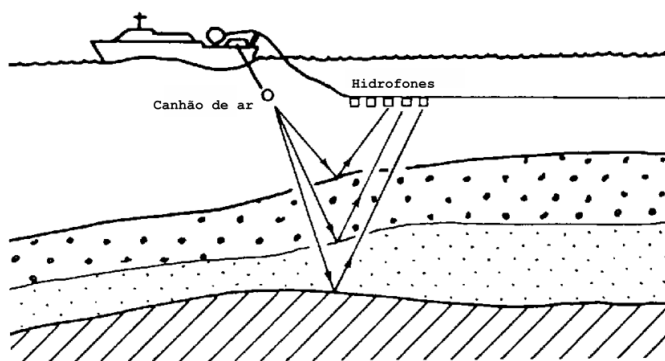
Referencial Teórico

Nessa seção do trabalho serão apresentados alguns conceitos e técnicas pertinentes para a compreensão do assunto, incluindo a metodologia de ensaio sísmico e sua aplicação em caixas de areia, processamento do sinal para obtenção de imagens subterrâneas e a aplicação dos elementos piezoelétricos e suas propriedades.

2.1 O ensaio sísmico de reflexão

O ensaio sísmico de reflexão é uma técnica da geofísica de fundamental importância para a exploração de recursos naturais e a compreensão da estrutura interna da Terra (Yilmaz 2001), seja no meio terrestre ou aquático. Essa técnica se baseia no princípio da reflexão das ondas sísmicas em interfaces com diferentes impedâncias acústicas, como ilustrado na Figura 2.1, ou seja, à medida que as ondas sísmicas se propagam e encontram interfaces entre materiais com diferentes propriedades, parte da energia é refletida e parte é refratada.

Figura 2.1: Representação do ensaio sísmico de reflexão com cabos flutuantes.



Fonte: Adaptado de Yilmaz (2001).

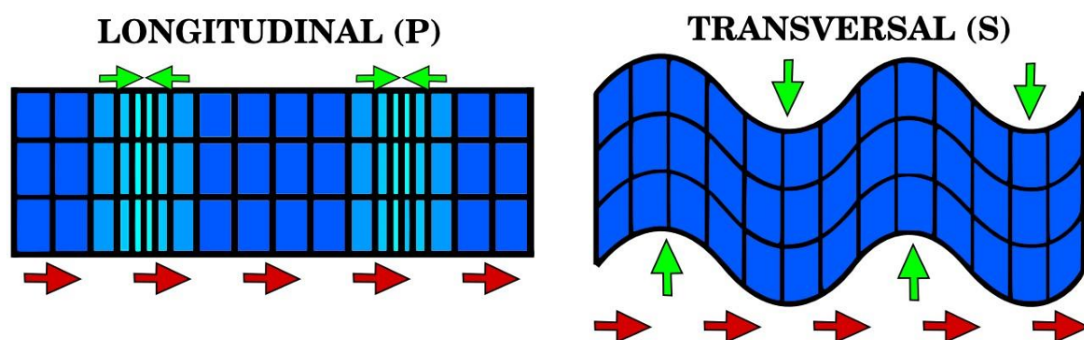
As ondas refletidas retornam à superfície e são captadas por sensores específicos, que convertem as variações de pressão ou deslocamento do meio em sinais elétricos. No contexto da sísmica convencional, esses sensores são conhecidos como geofones, quando

utilizados no meio terrestre, ou hidrofones, no ambiente submerso. O resultado deste método são imagens, em duas ou três dimensões, interpretáveis por um geofísico, que fornecem as feições geológicas do local estudado.

2.1.1 Conceitos fundamentais da sísmica de reflexão

As ondas sísmicas emitidas são perturbações mecânicas que se propagam nos materiais a partir de uma fonte geradora, transportando energia através do meio. Dentre as ondas, as primárias (P) são as mais rápidas e se propagam por compressão e rarefação na direção do movimento, sendo capazes de atravessar sólidos, líquidos e gases. As ondas secundárias (S) são mais lentas e propagam-se apenas em meios sólidos, com movimento de cisalhamento perpendicular à direção de propagação. As ondas de volume podem ser observadas na Figura 2.2, em que as setas vermelhas indicam a direção da propagação. (Sheriff & Geldart 1995).

Figura 2.2: Ilustração simplificada das propagações das ondas de volume em um plano 2D.



Fonte: Adaptado de Kearey et al. (2002).

Quando essas ondas encontram uma interface entre materiais com propriedades físicas diferentes, ocorre a divisão da energia incidente em uma parte refletida e outra refratada. Esse comportamento depende do contraste de impedância acústica entre os dois meios, sendo que a impedância acústica (Z) é definida pelo produto da densidade (ρ) do meio e a velocidade da onda (v):

$$Z = \rho v \quad (2.1)$$

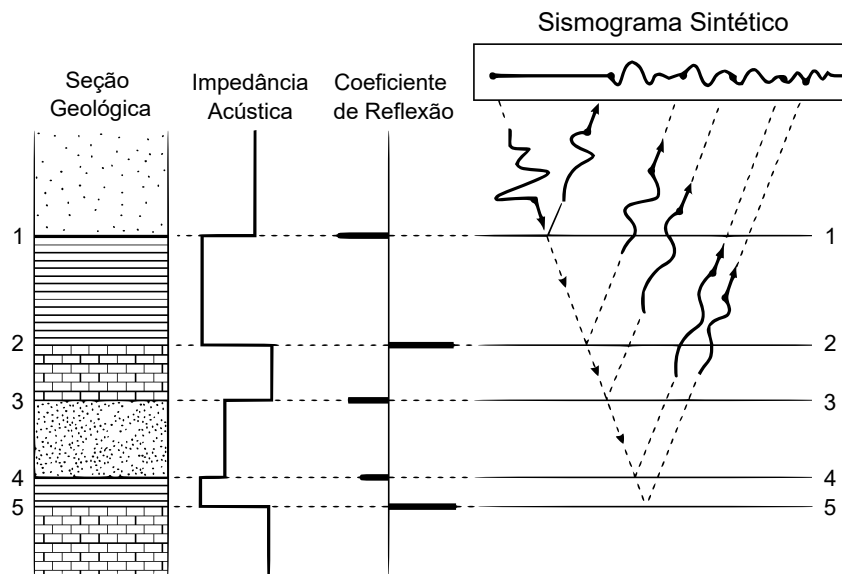
Além do conceito de impedância acústica, é importante salientar o coeficiente de reflexão, ou refletividade, que pode ser compreendido como o indicador da quantidade de energia que é refletida ao passar por uma diferença de impedância acústica (Aki & Richards 1980). Em um material elástico, isotrópico, espesso e homogêneo, separados por uma superfície plana, o coeficiente de reflexão entre camadas, R_k , pode ser expresso por:

$$R_k = \frac{Z_{k+1} - Z_k}{Z_{k+1} + Z_k} \quad (2.2)$$

Em que Z_k é a impedância acústica da camada k e Z_{k+1} é a impedância da camada $k + 1$, que está logo em seguida.

Dessa forma, ao gerar ondas sísmicas de forma artificial e registrar suas reflexões em uma determinada seção geológica composta por materiais de diferentes impedâncias acústicas, observa-se a variação do coeficiente de reflexão do meio investigado. Essa variação possibilita que a onda emitida seja refletida e posteriormente detectada pelos transdutores receptores, conforme ilustrado na Figura 2.3.

Figura 2.3: Composição de um sismograma sintético de acordo com o coeficiente de reflexão.



Fonte: Adaptado de Kearey et al. (2002).

A reflexão da onda obedecerá o mesmo ângulo da incidência do sinal com relação à normal da superfície. Porém, a refração do sinal tem sua relação à normal da interface determinada pela Lei de Snell, expressa por:

$$\frac{\sin(\theta_1)}{v_1} = \frac{\sin(\theta_2)}{v_2} \quad (2.3)$$

Onde θ_1 e θ_2 são os ângulos de incidência e refração, enquanto v_1 e v_2 são as velocidades de propagação dos meios. Essa relação permite prever a trajetória das ondas sísmicas refratadas e determinar fenômenos como o ângulo crítico, a partir do qual a onda refratada passa a se propagar paralelamente à interface. Para ângulos de incidência superiores a esse valor, ocorre a reflexão total interna, e toda a energia da onda retorna ao meio de origem, sem transmissão para o meio adjacente.

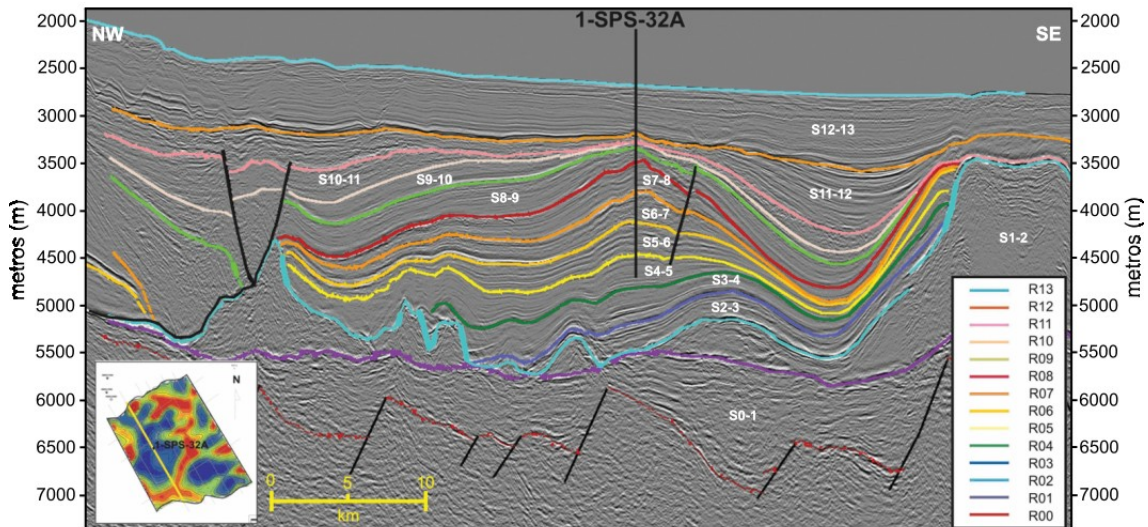
O tempo de percurso das ondas é o intervalo entre a emissão do pulso sísmico e a recepção do sinal refletido, sendo diretamente proporcional à profundidade da interface e inversamente proporcional à velocidade de propagação no meio. Assim, conhecendo a velocidade e medindo o tempo, é possível estimar a profundidade da descontinuidade ou camada pela relação:

$$d = \frac{v \cdot t}{2} \quad (2.4)$$

onde d é a profundidade da interface, v é a velocidade de propagação e t é o tempo total de ida e volta do sinal de interesse. Vale destacar que esta relação só é válida para *offset* zero, isto é, quando os transdutores de transmissão e recepção deveriam estar sobrepostos.

A identificação das ondas refletidas, seus tempos de percurso e amplitudes permite inferir a profundidade e as propriedades físicas das interfaces geológicas. Para isso, os sinais captados devem ser devidamente organizados e processados, de forma a construir imagens representativas da subsuperfície que, posteriormente, serão interpretadas por geofísicos, como ilustrado na figura 2.4.

Figura 2.4: Seção sísmica interpretada por um geofísico



Fonte: Caldas & Zalán (2009).

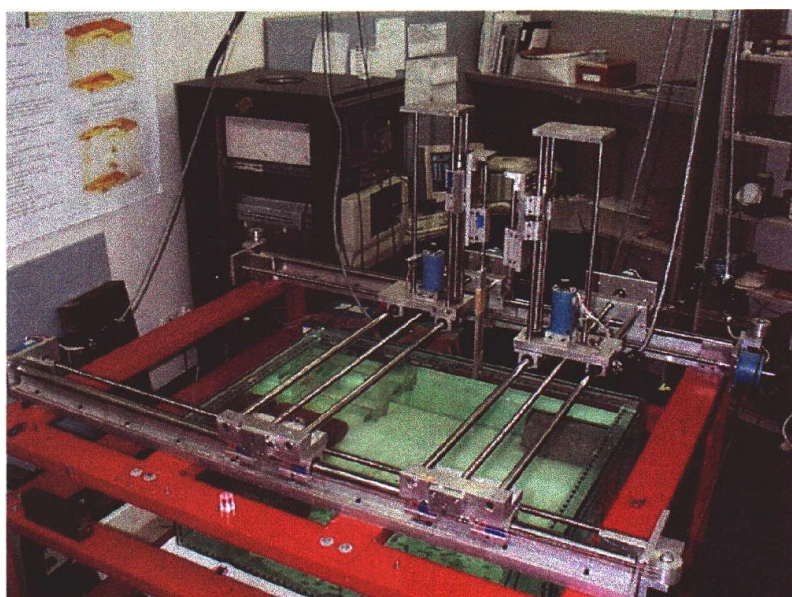
2.2 Aplicação da sísmica de reflexão em caixas de areia

Pioneiramente, French (1974) demonstrou a viabilidade de imageamento sísmico em modelos físicos, inclusive em três dimensões, inaugurando o campo da modelagem física em sísmica. Desde então, diversos trabalhos empregaram ultrassom em escalas reduzidas para estudar fenômenos sísmicos. Para que a realização destes ensaios fosse possível, foram introduzidos os transdutores piezoelétricos de alta frequência e banda ultralarga, pois

o comprimento das ondas sísmicas deve ser compatível com as dimensões das camadas modeladas e com o espaçamento entre as partículas de areia.

Esta tecnologia teve seu desenvolvimento continuado com a investigação e aprimoramento dos métodos de aquisição e processamento de dados sísmicos em modelos granulados, com a finalidade de propor análises laboratoriais dos ensaios da sísmica por reflexão, por ser um ambiente controlado e de fácil acesso (Sherlock & Evans 1999). Um exemplo de uma bancada experimental para consolidação dos dados ultrassônicos pode ser visualizado na Figura 2.5.

Figura 2.5: Sistema experimental para estudo da sísmica por reflexão em laboratório.



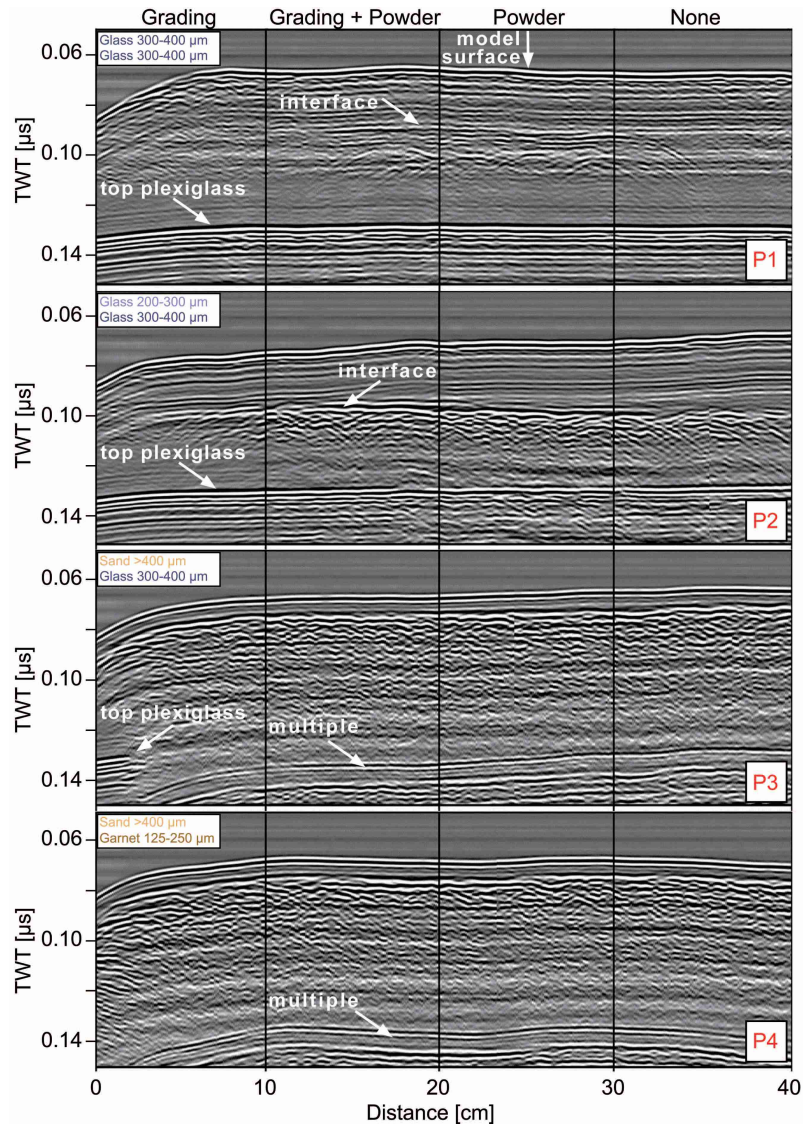
Fonte: Sherlock & Evans (1999).

Dessa forma, é necessário criar uma relação de equilíbrio entre a dimensão dos grãos e a frequência das ondas utilizadas, pois materiais com diâmetro médio semelhante ao comprimento de onda podem interagir diretamente com o sinal emitido, gerando uma dispersão significativa das ondas devido à interação com os limites entre os grãos (Buddensiek 2009). Para isso, estudou-se a criação de modelos sísmicos baseados em camadas de materiais com diferentes graus de compactação e características geométricas. Estes fatores são controlados para investigar como diferentes tipos de interfaces afetam a propagação das ondas sísmicas, incluindo fenômenos como a dispersão e a difração das ondas (Krawczyk et al. 2013).

Para a caracterização do caso da literatura, foi utilizado um sinal com frequência de 450 kHz, como ilustrado na seção sísmica da Figura 2.6, que percorreu por todas as configurações de disposição das camadas sendo elas: microesferas $200\mu\text{m}$ e $300\mu\text{m}$, microesferas $300\mu\text{m}$ e $400\mu\text{m}$. Assim, apesar das limitações impostas pela granulometria e pela atenuação das ondas, é possível achar uma relação de equilíbrio entre a frequência do sinal e a granulometria utilizada para realizar experimentos sísmicos em caixas de areia. No sismograma apresentado na Figura 2.6 obteve-se o melhor contraste de impedâncias

usando camadas com esferas de vidro com diâmetros entre 200-300 μm e 300-400 μm , ilustrado no ensaio P2.

Figura 2.6: Seção sísmica em diferentes configurações de granulometrias.



Fonte: Krawczyk et al. (2013).

2.2.1 Topologias experimentais em ensaios sísmicos laboratoriais

Em estudos experimentais voltados à simulação de propagação sísmica em meios granulares, especialmente em caixas de areia laboratoriais, diversas pesquisas adotam estruturas e equipamentos de alta precisão, geralmente com custo elevado. A seleção dos sensores, circuitos de aquisição e condições de excitação do meio depende fortemente da fidelidade desejada na reconstrução das interfaces geológicas propostas.

Os sensores ultrassônicos piezoelétricos são comumente empregados nesses experimentos por sua alta sensibilidade e capacidade de operar em faixas de frequência compatíveis com meios granulados secos e saturados. Os sensores utilizados apresentam bandas de atuação centradas entre 40 kHz e 500 kHz, com larguras de banda que variam entre 10% e 20% da frequência central (Montero de Espinosa et al. 2005). A tensão de alimentação recomendada para esses sensores varia, mas em geral os transdutores piezoelétricos utilizados na emissão requerem pulsos com tensão que variam de ± 50 volts até ± 200 volts, enquanto os circuitos de recepção devem ser protegidos por etapas limitadoras, uma vez que a tensão de saída na recepção pode variar de milivolts a alguns volts, dependendo da amplificação. Um exemplo de especificação de bancada utilizada por Krawczyk et al. (2013) pode ser analisada na Tabela 2.1 a seguir.

Tabela 2.1: Componentes e especificações técnicas do sistema sísmico em tanque

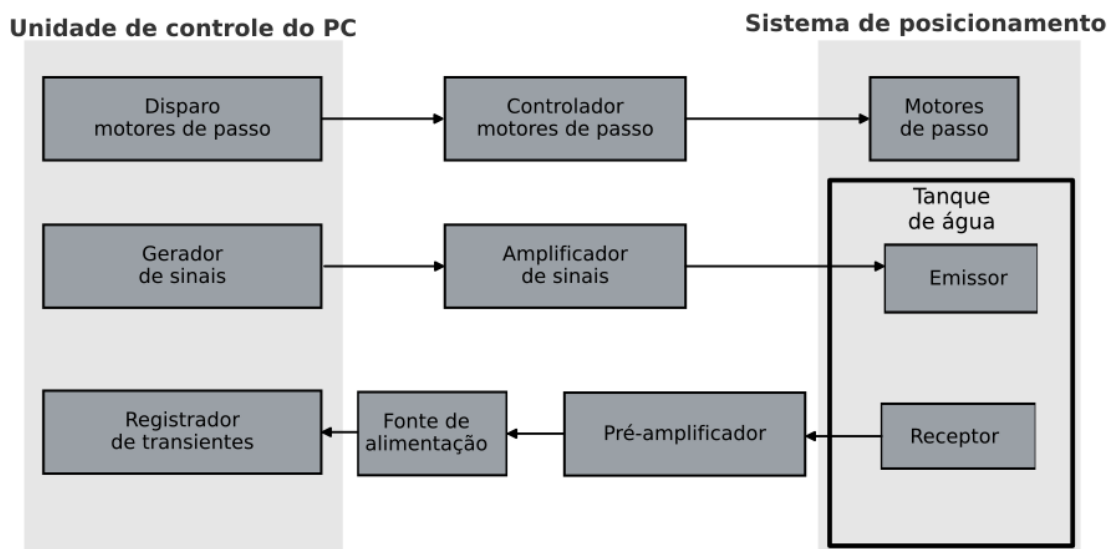
Componente	Parte / Subconjunto	Especificação técnica
Tanque Sísmico	Mesa de alumínio com bandeja de acrílico	Dimensões: 1 m $\times$ 1 m $\times$ 0,4 m
Unidade de Controle PC	Gerador de sinais (placa PCI, tipo MI6030)	Saída máx. 125 MHz (14 bits); máx. 8 MHz; amplitude máx. de saída 3 V
	Amplificador de sinais (amplificador de tensão AC)	Entrada -2 a $+2$ V; resistência de entrada 200 Ω ; saída -141 a $+141$ V; resistência de saída 2 k Ω ; largura de banda 20–500 kHz (-3 dB), 20–1000 kHz (-6 dB)
	Pré-amplificador (tipo VV30)	Amplificação de tensão de 30 dB e ajuste de impedância; faixa de frequência 1 kHz–2 MHz; amplitude máx. de saída 3 V
	Registrador de transientes (três placas PCI de 4 canais, tipo MI4022)	Para cada canal: amplificador de sinal e conversor AD; amostragem máx. 20 MHz (14 bits); memória máx. 2 Msamples/canal
Sistema de Posicionamento	Motores de passo	Percurso máx. 1000 mm; precisão 0,12 mm/passos do motor
Transdutor	Conversores piezoelétricos (metaniobato de chumbo)	Sensibilidade máx. 425 kHz; diâmetro 5 mm, altura 2 mm; revestido por um cilindro de latão

Fonte: Adaptado de Krawczyk et al. (2013).

Esta instrumentação de aquisição descrita apresenta arquiteturas baseadas em sistemas

de aquisição de dados com resoluções de 14 bits e taxa de amostragem de 20 MHz por canal, no máximo. Esses sistemas geralmente são descentralizados em unidades de aquisição de alto desempenho, conectadas a computadores por interfaces com baixa latência na aquisição e alta integridade dos dados. Uma topologia bastante utilizada é indicada na Figura 2.7 que exibe a separação entre os subsistemas de geração, recepção e tratamento do pulso, além do sistema de movimentação embarcado no protótipo.

Figura 2.7: Sistema de aquisição de dados sísmicos descentralizados.



Fonte: Adaptado de Buddensiek (2009).

No que tange ao condicionamento de sinais, os experimentos analisados utilizam desde amplificadores de instrumentação com ganho programável até discretização utilizando um osciloscópio digital com envio dos dados via comunicação serial. Em estágios de excitação, os circuitos de potência para emissão dos pulsos, frequentemente, utilizam *drivers* ou mesmo circuitos baseados em transistores alimentados com fontes simétricas de ± 100 Volts (Hidayat et al. 2018), de modo a gerar pulsos curtos e de alta energia, otimizando a penetração no meio granular. Tais pulsos são formados por excitações das mais variadas formas, com duração entre $1\ \mu\text{s}$ e $10\ \mu\text{s}$, sintonizadas à resposta do sensor.

A geometria de aquisição também influencia na escolha da instrumentação. Topologias com múltiplos sensores distribuídos sobre uma malha bidimensional, requerem multiplexadores de baixa distorção ou circuitos de comutação rápida, além de *buffers* de impedância e proteção contra sobrecarga para evitar perdas de sinal (Jiang et al. 2020). Em muitos desses sistemas, o controle de aquisição e sincronização é feito via microcontroladores de alto desempenho, com relógios de precisão e temporizadores dedicados para garantir coerência temporal entre emissão e recepção.

A implementação de sistemas multicanais para aquisição de dados ultrassônicos em experimentos de sísmica de reflexão laboratorial envolve custos consideráveis, principalmente devido à necessidade de transdutores dedicados, módulos de condicionamento de

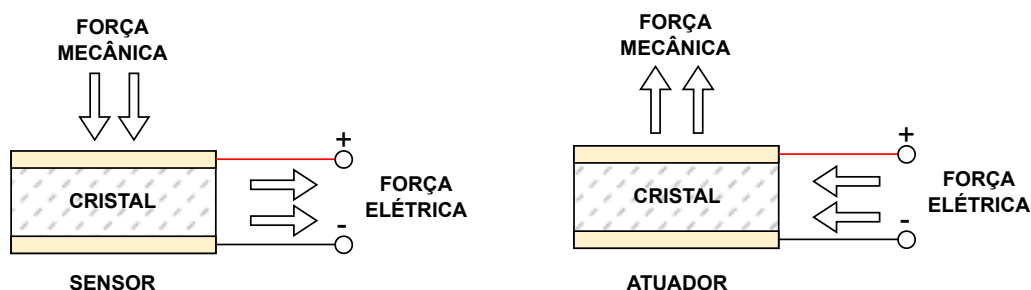
sinal de baixo ruído e placas de aquisição de alta velocidade. Além disso, a inclusão de sistemas de posicionamento de alta precisão, estruturas mecânicas robustas e a necessidade de blindagem eletromagnética elevam significativamente o orçamento total. Esses valores justificam a busca por soluções alternativas de menor custo, como a desenvolvida neste trabalho, que procura conciliar viabilidade técnica e acessibilidade financeira.

2.3 Elementos piezoelétricos

Os materiais piezoelétricos funcionam devido a uma propriedade intrínseca chamada piezoelectricidade. Essa propriedade é baseada na resposta eletromecânica de certos materiais quando submetidos a forças mecânicas ou campos elétricos (Ikeda 1996). O efeito piezoelétrico ocorre em materiais que não possuem centro de simetria em sua estrutura cristalina, ou seja, essa assimetria permite que a aplicação de uma força ou tensão mecânica desloque os dipolos elétricos internos, gerando uma polarização elétrica e um campo elétrico mensurável (Jaffe et al. 1971).

Sendo assim, existem duas formas de utilização dos materiais piezoelétricos, como ilustrado na Figura 2.8. No efeito direto, uma força mecânica é aplicada ao material e os dipolos elétricos são deslocados, o que gera uma diferença de potencial elétrico, e nesse modo é usado como sensor, onde as vibrações ou pressões externas podem ser convertidas em sinais elétricos. O efeito inverso também é observado, quando um campo elétrico alternado é aplicado ao material piezoelétrico, gera uma deformação mecânica devido à reorientação dos dipolos elétricos, sendo assim usado para gerar ondas mecânicas a partir dos sinais elétricos (Lines & Glass 2001).

Figura 2.8: Efeito piezoelétrico em um cristal



Fonte: Autor (2025).

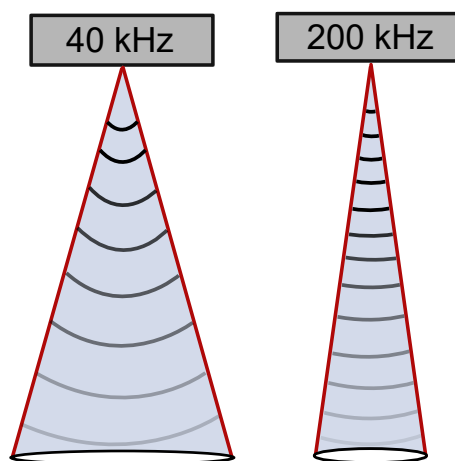
Graças a estas propriedades, os transdutores piezoelétricos desempenham um papel essencial em experimentos que simulam levantamentos sísmicos, em terra ou no mar, pois sua capacidade de atuar como transmissor e receptor ultrassônico torna-o ideal para aplicações que exigem alta resolução e estabilidade na resposta acústica (Sherlock & Evans 1999). Para os experimentos em caixa de areia, geralmente imersos em líquidos para melhorar o acoplamento acústico e reduzir perdas de sinal, são utilizadas frequências

mais altas, na ordem de centenas de kHz com o objetivo de resolver camadas particuladas bem menores, da ordem de milímetros, composta de microgrãos (Buddensiek 2009).

2.3.1 Diretividade e largura de banda de um transdutor ultrassônico

Devido à natureza ondulatória, o feixe ultrassônico de um transdutor diverge ao se afastar do emissor, fenômeno conhecido como abertura de feixe ou divergência do feixe. A energia máxima permanece ao longo do eixo central do transdutor, mas a intensidade cai em ângulos laterais, definindo um ângulo de semi-abertura do feixe. Essa relação indica tendências importantes: transdutores de maior diâmetro e/ou maior frequência produzem feixes mais estreitos. Em contrapartida, frequências menores ou elementos menores geram feixes mais divergentes, como ilustrado na Figura 2.9, onde são exibidos os ângulos de abertura para dois sensores hipotéticos, sendo um de 40 kHz e outro de 200 kHz.

Figura 2.9: Exemplo da diferença de abertura de um feixe para os sensores de 40 kHz e 200 kHz

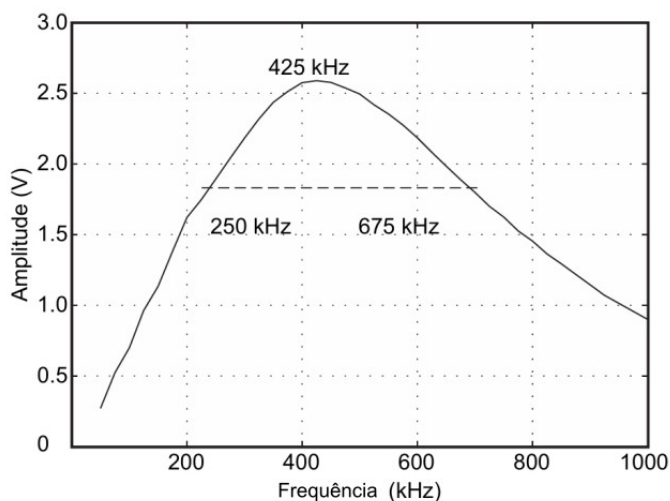


Fonte: Autor (2025).

Outro aspecto ultrassônico importante é a largura de banda, que é a faixa de frequências na qual um transdutor consegue operar eficientemente. Um exemplo de gráfico que mostra a resposta de um transdutor ultrassônico pode ser observado na Figura 2.10, é possível notar sua largura de banda e pico de ressonância em 425 kHz.

Essa característica está diretamente relacionada ao tempo de duração do pulso gerado pelo transdutor e à forma como seu cristal piezoelétrico é amortecido internamente. Transdutores com forte amortecimento produzem pulsos curtos no tempo, o que significa que sua resposta cobre uma ampla gama de frequências. Esses transdutores são capazes de captar variações rápidas no sinal, sendo ideais para aplicações que exigem alta resolução temporal, como a identificação de interfaces geológicas muito próximas entre si. No entanto, como o pulso é breve e menos energético, esses transdutores tendem a ser menos sensíveis, exigindo maior amplificação do sinal recebido.

Figura 2.10: Resposta em frequência de um sensor ultrassônico de banda larga



Fonte: Buddensiek (2009).

Por outro lado, transdutores com fraco amortecimento mantêm a vibração do cristal por um tempo maior, emitindo pulsos mais longos e concentrando a maior parte da energia em uma única frequência central resultando em uma largura de banda estreita. Embora essa configuração reduza a resposta em frequência, ela aumenta a intensidade e o alcance do sinal, favorecendo a detecção de regiões com coeficiente de reflexão mais fracos e profundos.

Em experimentos de sísmica de reflexão, transdutores com largura de banda ampla são os mais indicados, pois produzem pulsos ultrassônicos curtos, capazes de gerar reflexões bem definidas e minimamente sobrepostas. Essa característica é fundamental para distinguir sinais refletidos provenientes de interfaces geológicas próximas, garantindo maior qualidade na interpretação das seções sísmicas obtidas (Krawczyk et al. 2012).

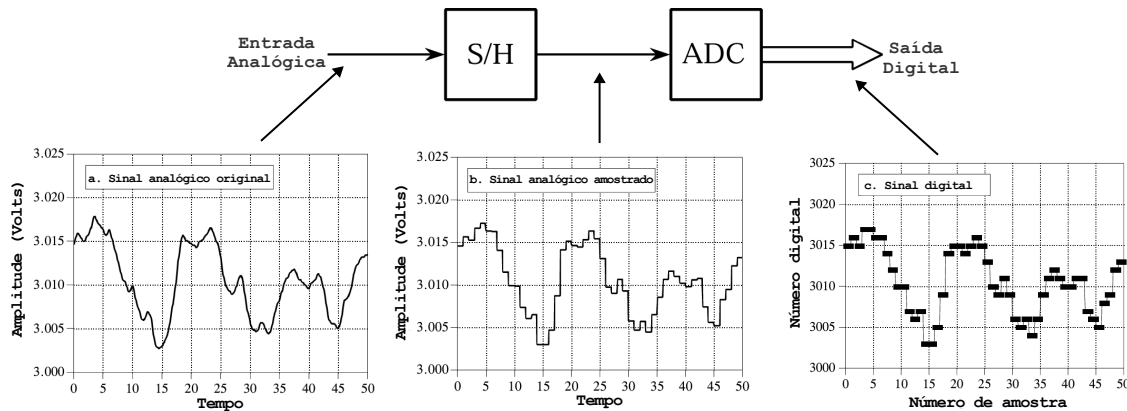
No entanto, uma limitação prática importante é o custo desses sensores, geralmente mais elevados em razão da sua construção mais complexa e do uso de materiais de amortecimento específicos para alcançar uma resposta eficiente em ampla faixa de frequências. Essa restrição orçamentária muitas vezes impõe a necessidade de compromissos entre resolução e acessibilidade, influenciando diretamente a configuração experimental adotada.

2.4 Sinais Analógicos e o Processador Digital de Sinais (PDS)

Os sinais analógicos são contínuos no tempo e na amplitude, representando grandezas como tensão elétrica, pressão ou deslocamento. Sua digitalização é realizada por conversores analógico-digitais (ADC), os quais executam duas operações fundamentais: a amostragem (registro do sinal em instantes equidistantes) e a quantização (representação

da amplitude em níveis digitais), como ilustrado na Figura 2.11. A qualidade dessa conversão está diretamente relacionada a dois parâmetros: a taxa de amostragem e a resolução do conversor.

Figura 2.11: Procedimento para amostragem do sinal



Fonte: Adaptado de Smith (1999).

A taxa de amostragem f_s deve respeitar o teorema de Nyquist, que estabelece que $f_s \geq 2f_{\max}$, sendo $f_{\max}$ a maior frequência presente no sinal. O descumprimento dessa condição ocasiona *aliasing* — fenômeno de sobreposição espectral que inviabiliza a reconstrução fiel do sinal original (Oppenheim & Schaffer 2010). Já a resolução, normalmente expressa em bits, determina o menor incremento detectável entre dois níveis consecutivos de amplitude. Um ADC de n bits, por exemplo, pode representar 2^n níveis distintos, sendo que resoluções maiores oferecem maior fidelidade na discretização.

Sendo assim, a busca pela crescente demanda por sistemas embarcados capazes de processar sinais em tempo real com alta precisão, desempenho determinístico e baixo consumo de energia, culminou no desenvolvimento dos Processadores Digitais de Sinais (DSP). Essa necessidade tornou-se evidente a partir da década de 1970, quando o avanço da microeletrônica e a consolidação dos circuitos integrados viabilizaram a implementação de algoritmos matemáticos diretamente em hardware dedicado. Tarefas computacionalmente intensivas, passaram a ser tratadas com maior eficiência em áreas como telecomunicações, controle industrial, instrumentação científica e áudio digital (Smith 1997).

Os DSPs modernos são frequentemente baseados em arquiteturas *Harvard* modificadas, com separação entre os barramentos de dados e instruções, acesso paralelo à memória e múltiplos núcleos de processamento. Além disso, incorporam unidades de ponto flutuante (FPU), aceleradores trigonométricos (TMU), periféricos de comunicação serial (SPI, UART, I2C, CAN, McBSP) e módulos dedicados para temporização e geração de pulsos (ePWM, eCAP, timers programáveis). Para este trabalho, os periféricos de conversão analógica-digital e digital-analógica, aliados às interrupções de tempo e externas, com possibilidade de comunicação serial, completam todos os requisitos para funcionamento do sistema proposto neste trabalho.

Tais recursos permitem que os DSPs sejam empregados em tarefas complexas de aquisição, processamento e controle de sinais em tempo real, com elevada flexibilidade e precisão. Portanto, o estudo dos sinais analógicos e a compreensão da estrutura dos DSPs é fundamental para o desenvolvimento de sistemas embarcados voltados à instrumentação e automação. A sinergia entre sensores, conversores e processadores é o que possibilita a implementação de soluções eficientes e confiáveis em aplicações científicas e industriais de alta exigência técnica.

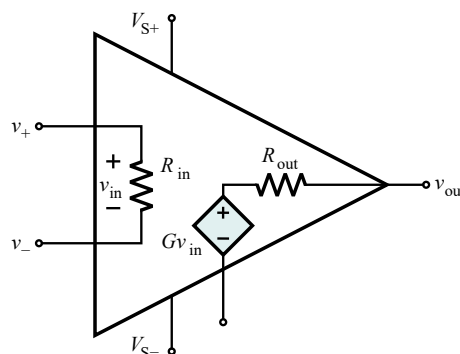
2.4.1 Os amplificadores de sinais analógicos

Os amplificadores operacionais (AmpOps) são blocos fundamentais em circuitos analógicos, amplamente utilizados para amplificação de sinais, condicionamento, filtragem, integração, diferenciação e controle. Tratam-se de dispositivos com ganho de tensão muito elevado em malha aberta, entradas diferenciais de alta impedância e saída de baixa impedância, idealizados para operar em diversas configurações com realimentação, positiva ou negativa, conforme a aplicação desejada (Sedra 2010).

Os parâmetros de desempenho mais relevantes de um AmpOp incluem: ganho em malha aberta (A_{ol}), taxa de variação (*slew rate*), largura de banda unificada (*unity gain bandwidth*), impedância de entrada, impedância de saída, tensão de offset, e densidade espectral de ruído. Em aplicações de instrumentação, esses parâmetros tornam-se cruciais, como por exemplo, uma baixa taxa de variação pode distorcer sinais rápidos, enquanto uma largura de banda limitada compromete a resposta em alta frequência (Baker 2019).

A arquitetura básica de um amplificador operacional é composta por três blocos principais: um estágio diferencial de entrada, um estágio de ganho intermediário e um estágio de saída, como ilustrado pela Figura 2.12, onde a impedância de entrada é infinita, a impedância de saída é considerada nula e a saída tem um ganho com relação a entrada dada por G .

Figura 2.12: Modelo ideal de um amplificador operacional



Fonte: Adaptado de Ulaby & Maharbiz (2012).

Os amplificadores operacionais podem ser configurados de diferentes formas conforme a aplicação desejada. Dentre as principais topologias utilizadas para este trabalho, estão o **seguidor de tensão**, o **amplificador inversor** e o **amplificador não inversor**,

cada uma com características específicas de ganho e impedância, ilustrados na Figura 2.13.

O seguidor de tensão (ou *buffer*), Figura 2.13a, é uma configuração em que a saída do amplificador é conectada diretamente à entrada inversora, enquanto o sinal é aplicado à entrada não inversora. Essa estrutura apresenta ganho unitário ($G = 1$), alta impedância de entrada e baixa impedância de saída, sendo ideal para isolar estágios de circuitos sem distorcer a amplitude do sinal.

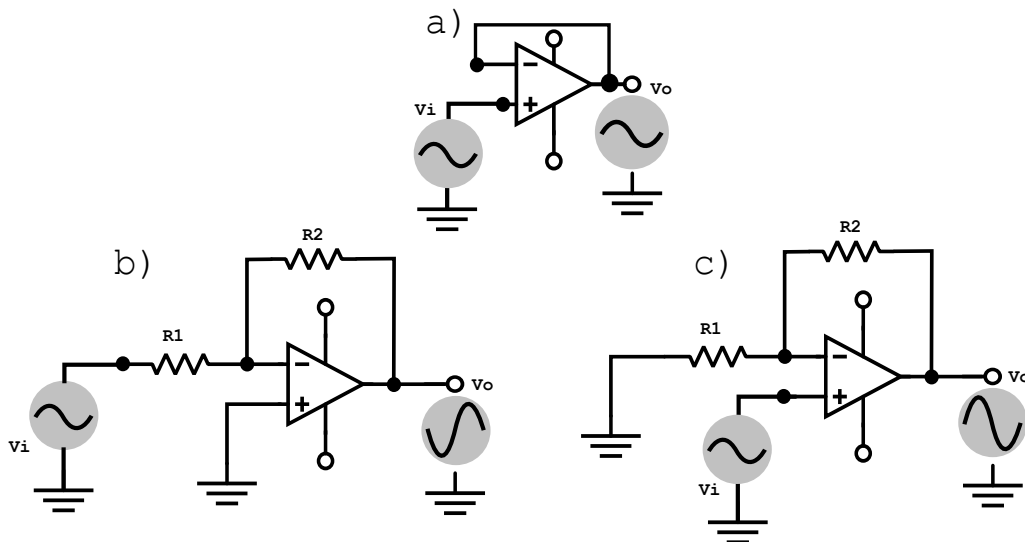
Já o amplificador inversor com realimentação negativa, Figura 2.13b, aplica o sinal à entrada inversora por meio de um resistor R_1 , enquanto a realimentação é feita com um resistor R_2 conectado entre a saída e essa mesma entrada. A entrada não inversora permanece aterrada. Essa topologia proporciona ganho negativo, ou seja, há inversão de fase, e seu ganho é definido por:

$$G = -\frac{R_2}{R_1} \quad (2.5)$$

Por fim, o amplificador não inversor com realimentação negativa, Figura 2.13c, conecta o sinal de entrada à entrada não inversora, enquanto a entrada inversora é ligada à saída por meio de R_2 e ao terra por meio de R_1 , formando um divisor resistivo. Essa configuração mantém a fase do sinal e oferece *ganho positivo*, descrito por:

$$G = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (2.6)$$

Figura 2.13: Modelos de configurações de um amplificador operacional



Fonte: Autor (2025).

Em sistemas de aquisição de sinais é comum o uso de múltiplos estágios de amplificação, separados por capacitores de acoplamento e acompanhados de circuitos de polarização em corrente contínua. Essa estratégia permite ajustar o ganho global do sistema, filtrar

as componentes harmônicas indesejadas de baixa frequência e adequar os níveis de tensão à faixa operacional dos conversores analógico-digitais. Além disso, apesar dos filtros ativos baseados em AmpOps permitirem uma maior seletividade espectral em comparação aos filtros passivos, otimizando a relação sinal-ruído do sistema (Johns 1997), neste trabalho já se utilizam transdutores ultrassônicos com estreita faixa de frequência, funcionando naturalmente como um passa-faixa adequado.

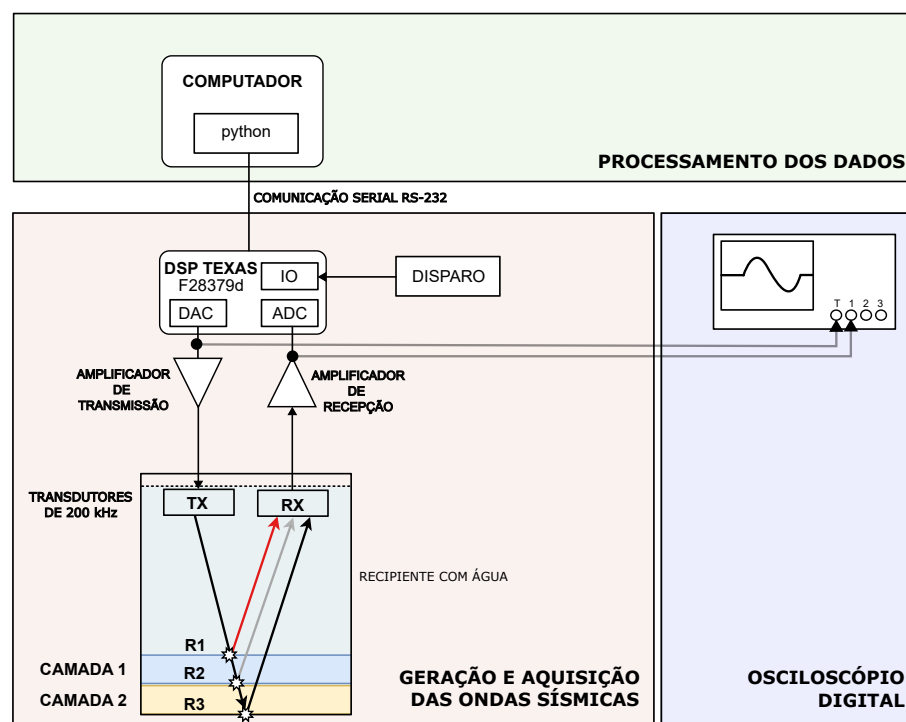
Com o avanço da tecnologia de fabricação, os amplificadores operacionais passaram a incorporar características adicionais, como modos de economia de energia, compensação interna, proteção contra curto-circuito e operação *rail-to-rail*, que aumentam sua aplicabilidade em dispositivos embarcados, sistemas portáteis e instrumentação de campo. Como resultado, os AmpOps continuam a ser elementos centrais em projetos de automação, medição e controle, mantendo sua relevância tanto em aplicações industriais quanto acadêmicas (Sedra 2010, Baker 2019).

Capítulo 3

Desenvolvimento do sistema ultrassônico

Este capítulo irá tratar da implementação do sistema para aquisição dos sinais sísmicos aplicados em caixas de areia, como ilustrado na Figura 3.1. É possível observar os subsistemas que permitem realizar o ensaio, sendo eles a geração e aquisição das ondas sísmicas e o processamento dos dados obtidos, e dependem de um osciloscópio digital para verificações prévias com a finalidade de manter a integridade de funcionamento do DSP, amplificadores e transdutores.

Figura 3.1: Sistema ultrassônico proposto para ensaio sísmico em caixa de areia.

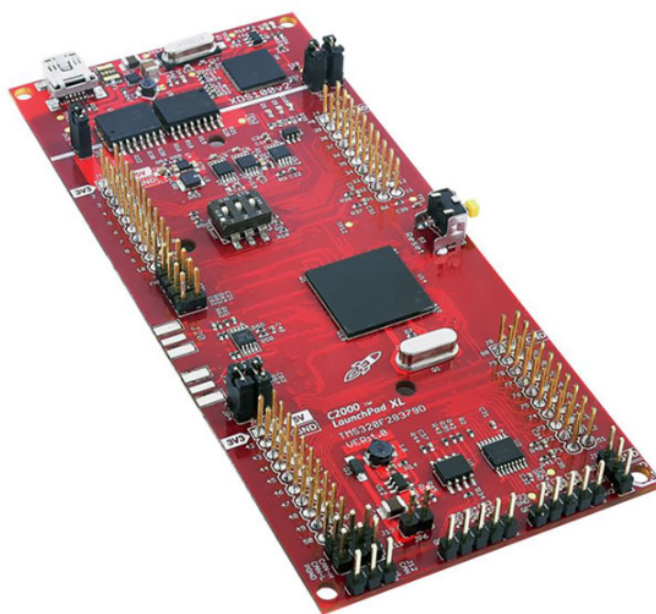


Fonte: Autor (2025).

3.1 Geração e aquisição de sinais ultrassônicos

Com a finalidade de diminuir o custo do projeto, foram concentradas as etapas de geração e aquisição de dados em um único dispositivo, um DSP com conversores digitais-analógicos e analógicos-digitais embarcados. O DSP utilizado para construção do protótipo foi o *LAUNCHXL-F28379D*, ilustrado na Figura 3.2, que possui um conjunto de processadores e periféricos que auxiliam na construção de projetos em múltiplas áreas de desenvolvimento.

Figura 3.2: LAUNCHXL-F28379D da Texas Instruments ®



Fonte: Texas Instruments ®.

Este dispositivo possui um conjunto de quatro módulos ADC (do inglês *Analog to Digital Converter*) que permitem amostrar quatro variáveis analógicas na mesma base de tempo. Além de dois módulos DAC (do inglês *Digital to Analog Converter*) acessíveis, que permitem a construção analógica do sinal que será emitido para os transdutores ultrassônicos. A seguir, será apresentada a Tabela 3.1 de especificações do DSP, disponibilizado pelo fabricante Texas Instruments®.

Dessa forma, o DSP LAUNCHXL-F28379D apresenta um conjunto de especificações que o tornam adequado tanto para a geração dos sinais ultrassônicos quanto para a aquisição dos dados refletidos de forma eficiente e mais econômica. Os conversores DAC de 12 bits permitem gerar sinais analógicos com resolução e estabilidade suficientes para excitar os transdutores ultrassônicos dentro da faixa de frequência proposta de 200 kHz. Além disso, seus quatro módulos ADC de até 3,46 MSPS permitem a digitalização simultânea de até quatro sinais analógicos, com amostragem em alta taxa e resolução adequada para reconstrução do sinal refletido. A presença de temporizadores programáveis e suporte a

interrupções com baixa latência também garante o controle determinístico necessário para sincronizar com precisão os eventos de disparo e aquisição, essenciais para a construção das seções sísmicas.

Tabela 3.1: Especificações Técnicas do LAUNCHXL-F28379D

CARACTERÍSTICA	ESPECIFICAÇÃO
Arquitetura	32 bits
Frequência Máxima de Operação	200 MHz
Memória Flash	1,5 MB
Memória RAM	256 KB
Controladores PWM	16 canais
ADC	4 módulos de 12, ou 16 bits, até 3,4 MSPS
DAC	3 canais de 12 bits
Periféricos de Comunicação	SPI, I2C, UART, CAN, e McBSP
Unidade de Ponto Flutuante (FPU)	Sim, com suporte a operações de 32 bits
Temperatura de Operação	-40°C a 125°C
Pacote	LQFP de 176 pinos ou BGA de 337 pinos

Fonte: Adaptado de Texas Instruments ®.

3.1.1 Configuração dos periféricos do DSP

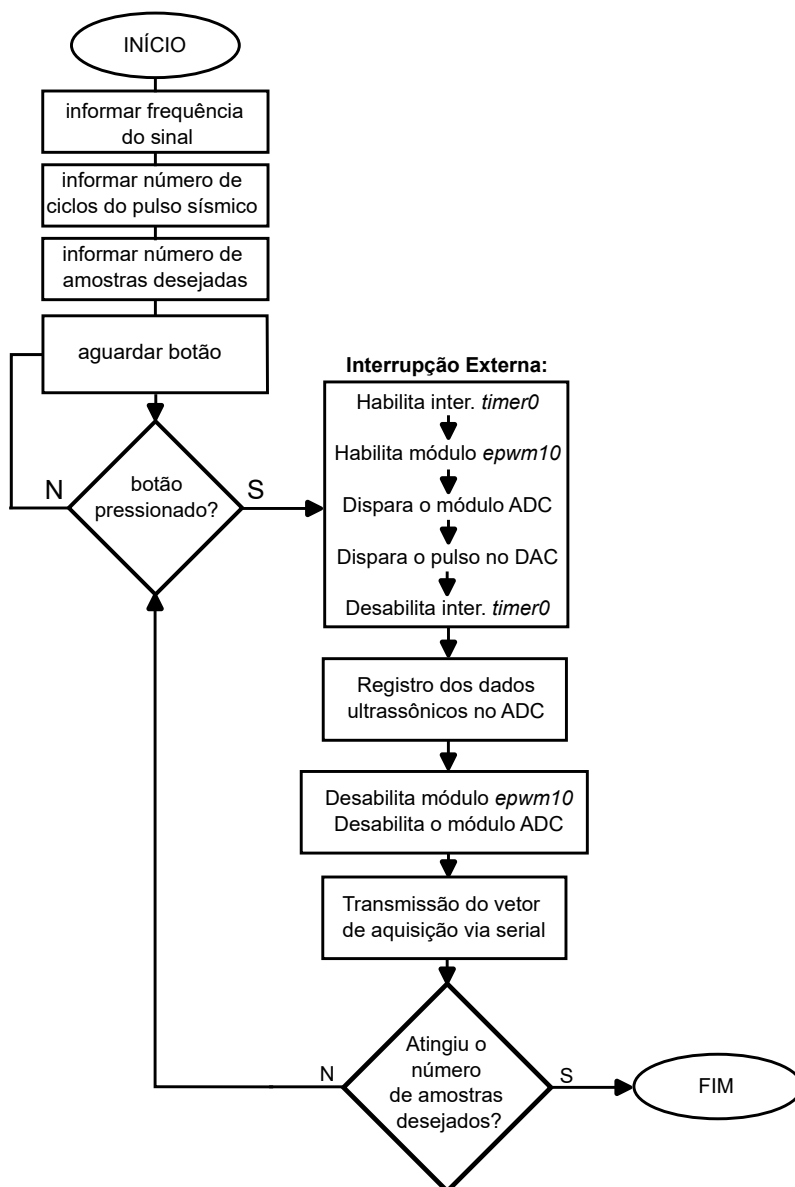
Neste projeto foram utilizadas as interrupções de tempo e entradas externas, assim como os já mencionados DAC e ADC, com uma lógica de atuação ilustrada na Figura 3.3. O processo inicial consiste na informação dos dados básicos para o ensaio, que é a frequência do sinal que será gerada, o número de ciclos da onda e o número de amostras que serão colhidas. Em seguida, todo o processo de interrupção do processador de sinais só será iniciado após o dispositivo perceber uma entrada externa vinda de um botão configurado como *pull-up*.

Dentre os *timers* de tempo, o *timer0* cumpre o papel de determinar a frequência do sinal gerado pelo DAC fornecido pelo usuário na etapa inicial, enquanto que o módulo *epwm10* cumpre o papel de determinar a taxa de amostragem do sinal para o módulo ADC escolhido. Desta forma, é possível conseguir determinismo na taxa de aquisição dos dados e na geração do pulso na frequência correta, pois os transdutores ultrassônicos possuem uma banda estreita de frequências.

3.1.2 Os transdutores ultrassônicos comerciais de baixo custo

Os transdutores ultrassônicos comerciais foram especificados e adquiridos de acordo com a faixa de trabalho definida entre 40 kHz e 500 kHz. Na Tabela 3.2, são apresentados os elementos piezoelétricos comerciais disponíveis no LAMP (Laboratório de Medição e Avaliação do Petróleo da UFRN) para avaliação da resposta do sistema, juntamente com os principais parâmetros técnicos de cada dispositivo.

Figura 3.3: Fluxograma de utilização dos periféricos do DSP.



Fonte: Autor (2025).

Dessa forma, o objetivo é gerar pulsos senoidais com frequência central correspondente à ressonância de cada transdutor listado na Tabela 3.2, buscando compatibilidade com a faixa de resposta útil de cada dispositivo. Embora existam transdutores ultrassônicos com preços acessíveis e faixas de frequência mais elevadas, a largura de banda reduzida de muitos desses dispositivos exige sinais de excitação compatíveis, com conteúdo espectral concentrado e duração controlada. Além disso, é necessário considerar as limitações do processador digital de sinais empregado no projeto quanto à geração de formas de onda de alta frequência com a resolução temporal exigida.

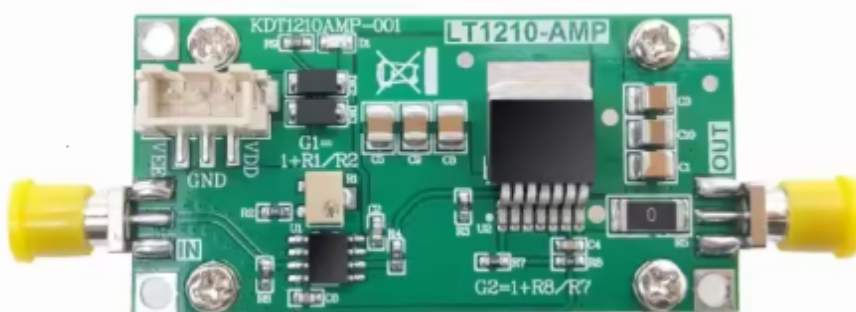
Tabela 3.2: Resumo dos transdutores ultrassônicos disponíveis para utilização nos ensaios sísmicos em caixa de areia.

FREQUÊNCIA CENTRAL	LARGURA DE BANDA	MÁX. TENSÃO APLICÁVEL	TEMPO DE RESPOSTA	ÂNGULO DE ABERTURA
25 kHz	$\pm 1,5$ kHz	150 Vpp	2 ms	$50^\circ \pm 15^\circ$
40 kHz	± 1 kHz	120 Vpp	$\leq 1,3$ ms	$60^\circ \pm 10^\circ$
58 kHz	± 5 kHz	150 Vpp	1 ms	$95^\circ \pm 15^\circ$
200 kHz	± 6 kHz	500 Vpp	-	$7^\circ \pm 2^\circ$

3.1.3 O módulo amplificador de transmissão do sinal ultrassônico

Na etapa de transmissão do sinal ultrassônico, o sinal gerado pelo conversor digital-analógico do DSP possui amplitude limitada, sendo necessário amplificá-lo para alcançar os níveis de tensão adequados para a aplicação proposta. Para isso, foi utilizado um módulo amplificador composto por dois estágios: um estágio de pré-amplificação ajustável, baseado no amplificador operacional THS4001, seguido por um estágio de potência com ganho fixo, implementado com o circuito integrado LT1210. A tensão do sinal aplicado ao transdutor emissor será de, no máximo, 25 Vpp, valor que corresponde à tensão de alimentação do módulo e está abaixo dos limites suportados pelos elementos piezoelétricos apresentados na Tabela 3.2. Essa escolha deve-se ao fato de que tal tensão gera energia sonora suficiente para que as reflexões sejam captadas pelo transdutor receptor, considerando o tamanho total da seção de testes.

Figura 3.4: Módulo amplificador com CI LT1210 e THS4001.



Fonte: Autor (2025).

O THS4001, da Texas Instruments, é um amplificador operacional de alta velocidade com entrada JFET e largura de banda superior a 100 MHz, capaz de operar com baixíssimo ruído e alta impedância de entrada, o que o torna ideal como pré-amplificador para sinais analógicos provenientes de conversores digitais (TEXAS INSTRUMENTS, 2002). Neste módulo, o estágio possibilita ajuste de ganho de até 11 $\times$, permitindo adequar a amplitude do sinal de entrada para utilizar plenamente a faixa de operação antes da saturação do estágio subsequente. Já o LT1210, com topologia de realimentação por corrente, opera

com ganho fixo de $3\times$, sendo responsável pela entrega de corrente elevada à carga, com capacidade de até 1,1 A contínuo e *slew rate* de 900 V/ μ s, além de largura de banda típica de 35 MHz em ganho unitário (LINEAR TECHNOLOGY, 1995). Essa configuração em dois estágios permite amplificar com fidelidade os pulsos de alta frequência, assegurando integridade espectral e potência suficiente mesmo em condições de carga capacitiva.

Tabela 3.3: Especificações do módulo amplificador para excitação dos transdutores

Parâmetro	Valor típico
CI do pré-amplificador	THS4001 (Texas Instruments)
Ganho do pré-amplificador	Ajustável até $11\times$
CI do estágio de potência	LT1210 (Linear Technology)
Ganho do estágio de potência	Fixo em $3\times$
Corrente de saída do LT1210	Até 1,1 A (contínua) / 2 A (pico)
Largura de banda	35 MHz (LT1210) / >100 MHz (THS4001)
Alimentação do módulo	± 12 V
Impedância de saída	$< 1 \Omega$
Tipo de carga suportada	Capacitiva

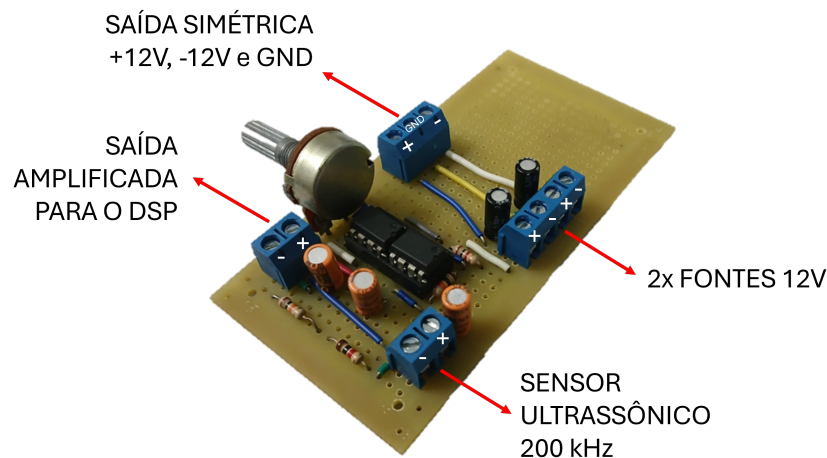
O módulo foi alimentado com fontes simétricas de ± 12 V, e sua construção física em PCB de camada dupla apresenta conectores padrão SMA (SubMiniature version A) para entrada e saída de sinal, o que facilita o uso de cabos coaxiais de 50Ω e garante bom casamento de impedância em aplicações de alta frequência. O uso de SMA também contribui para reduzir interferências eletromagnéticas, ruído de modo comum e perdas de sinal por reflexões, além de aumentar a robustez mecânica da conexão. Essa solução modular e compacta se mostrou tecnicamente adequada para aplicações de excitação ultrassônica em sistemas experimentais de baixo custo, garantindo desempenho compatível com as exigências do projeto sem a necessidade de desenvolvimento de hardware customizado.

3.1.4 O módulo amplificador de recepção do sinal ultrassônico

Nesta etapa de recepção, os sinais refletidos captados pelos transdutores apresentam baixíssima amplitude e devem ser amplificados cuidadosamente antes de serem digitalizados pelos ADCs do DSP. Dessa forma, é essencial garantir alta impedância de entrada, baixo ruído e largura de banda compatível com a frequência central dos sinais (Krautkrämer & Krautkrämer 1990). O circuito amplificador, ilustrado na Figura 3.5, foi desenvolvido para recepção dos sinais ultrassônicos refletidos. Ele é composto por dois amplificadores operacionais CA3140 conectados em cascata com realimentação negativa e possui capacitores de desacoplamento.

O primeiro estágio foi configurado com ganho fixo de 10 vezes, com o objetivo de elevar o sinal captado pelo transdutor para níveis compatíveis com a faixa dinâmica do sistema de aquisição. O segundo estágio, por sua vez, foi projetado com ganho ajustável entre 1 e 10 vezes, utilizando um potenciômetro no ramo de realimentação, possibilitando a calibração fina do sinal de saída conforme as condições experimentais, como a frequência do pulso, o meio propagante e a profundidade das interfaces. Entre os dois estágios,

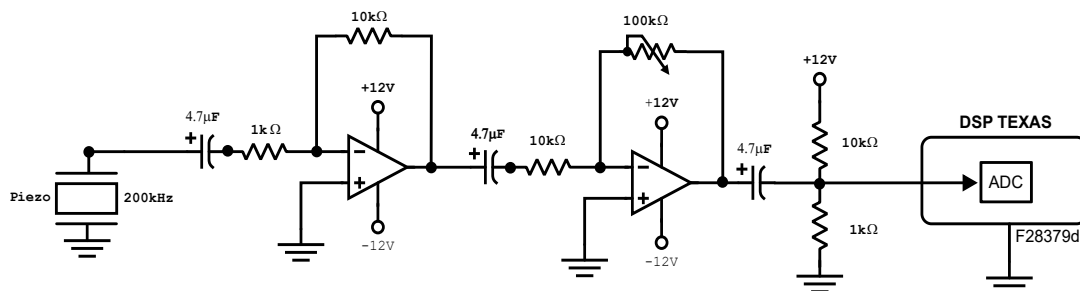
Figura 3.5: Circuito soldado em placa ilhada



Fonte: Autor (2025).

como também na entrada e saída do circuito, foram inseridos capacitores de desacoplamento, com a função de eliminar o componente DC entre os estágios, permitindo que apenas o conteúdo AC, relativo ao pulso ultrassônico, seja amplificado na etapa seguinte. O diagrama elétrico do circuito desenvolvido pode ser visualizado na Figura 3.6.

Figura 3.6: Módulo amplificador em cascata com ganho máximo de 100 vezes



Fonte: Autor (2025).

O CA3140 é um amplificador operacional de precisão que opera com alimentação simples ou simétrica, possuindo uma faixa típica de operação entre ± 3 V e ± 18 V. A velocidade de resposta é outro fator relevante: sua taxa de variação de tensão (*slew rate*) é de aproximadamente $9 \text{ V}/\mu\text{s}$, valor suficiente para preservar a forma de ondas ultrassônicas de frequências centrais de até 200 kHz, como demonstrado na Tabela 3.2.

Além disso, o ganho em malha aberta do CA3140 é da ordem de 100 dB, o que o torna apto a operar como estágio de pré-amplificação em sistemas de instrumentação. O baixo nível de ruído de entrada também favorece sua aplicação em contextos que demandam alta sensibilidade e boa relação sinal/ruído (SNR). Tais características são particularmente importantes na recuperação de sinais refletidos com amplitude significativamente inferior

ao sinal de excitação original.

Essas características fazem do CA3140 uma solução eficiente e de baixo custo para a etapa de recepção de sinais ultrassônicos, compatível com os requisitos técnicos do sistema proposto e com as boas práticas de instrumentação eletrônica em aplicações de sensoriamento sísmico.

Tabela 3.4: Características técnicas principais do CI CA3140.

Parâmetro	Valor típico
Tensão de alimentação	$\pm 3 \text{ V}$ a $\pm 18 \text{ V}$
Impedância de entrada	$1.5 \times 10^{12} \Omega$
Corrente de polarização de entrada	10 pA
Ganho em malha aberta	100 dB
Slew rate	9 V/ μs
Largura de banda em ganho unitário (GBW)	4.5 MHz
Tensão de offset de entrada	2 mV
Faixa de tensão de entrada	de $V_{SS} + 0.05 \text{ V}$ até $V_{DD} - 1.5 \text{ V}$
Corrente de consumo	1.5 mA

Além disso, para garantir que o sinal final esteja centrado dentro da faixa de entrada aceitável do conversor analógico-digital do DSP, foi implementado um circuito de *offset* utilizando um divisor de tensão resistivo, alimentado por uma tensão de referência estável. Essa técnica permite elevar a linha de base do sinal para uma tensão positiva, em torno de 1,2 V, evitando a entrada de tensões negativas no ADC. Dessa forma, o circuito apresenta uma abordagem combinada de ganho escalonado, acoplamento capacitivo e inserção de *offset*, garantindo fidelidade na leitura dos sinais ultrassônicos em contextos laboratoriais sujeitos a variações de acoplamento e de atenuação dos materiais.

3.1.5 Montagem dos transdutores ultrassônicos

A inserção dos transdutores ultrassônicos na estrutura física foi realizada com base na geometria do experimento e na diretividade de cada sensor, a fim de maximizar a energia transferida entre as camadas e minimizar reflexões indesejadas fora do eixo de interesse. Os transdutores emissores e receptores foram fixados na parte superior do recipiente, orientados perpendicularmente à superfície das interfaces.

Os elementos foram acoplados mecanicamente à caixa por meio de suportes rígidos fabricados em impressora 3D, conforme ilustrado na Figura 3.7a, assegurando estabilidade estrutural e fixação adequada durante os disparos. Os transdutores piezoelétricos permaneceram imersos em água, de modo a favorecer o acoplamento acústico com o meio a ser investigado, sendo adotado um espaçamento mínimo de 25 mm entre eles, consequência do diâmetro do transdutor mais a espessura da parede do suporte fabricado. Com o intuito de complementar a descrição da montagem, a Figura 3.7b apresenta a vista explodida do conjunto, evidenciando a relação entre os componentes do suporte.

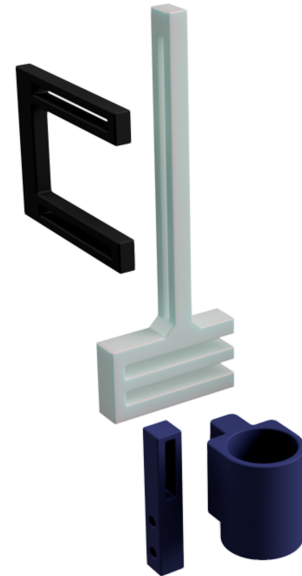
Em seguida, a Figura 3.8 reúne todas as cotas relevantes, em milímetros, da versão final do suporte, fornecendo uma representação dimensional do arranjo projetado, com as

Figura 3.7: Representação 3D do suporte desenvolvido para os transdutores ultrassônicos

(a) Montagem final do suporte



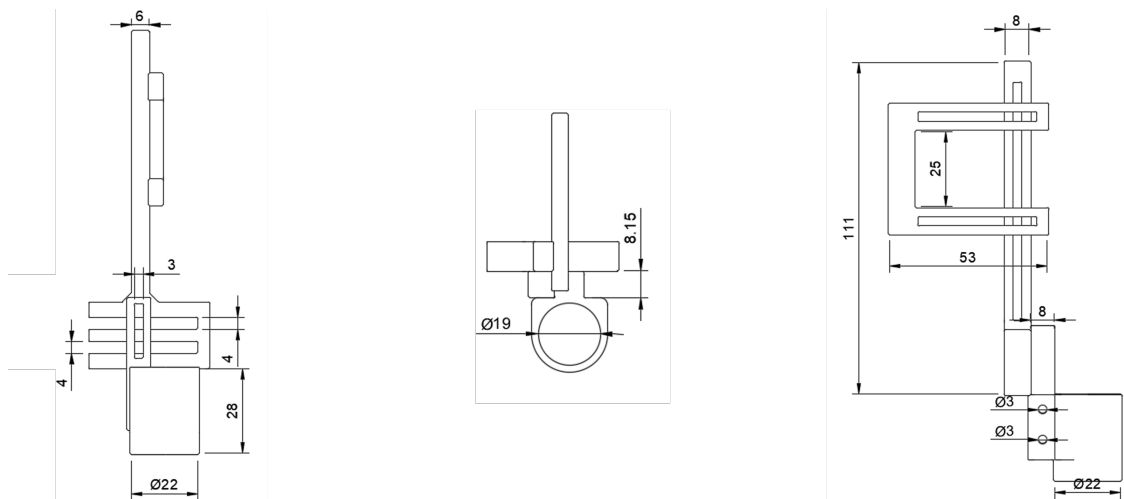
(b) Vista explodida do suporte



Fonte: Autor (2025).

vistas frontal, superior e lateral, respectivamente,

Figura 3.8: Cotas em milímetros do suporte para fixação dos transdutores ultrassônicos



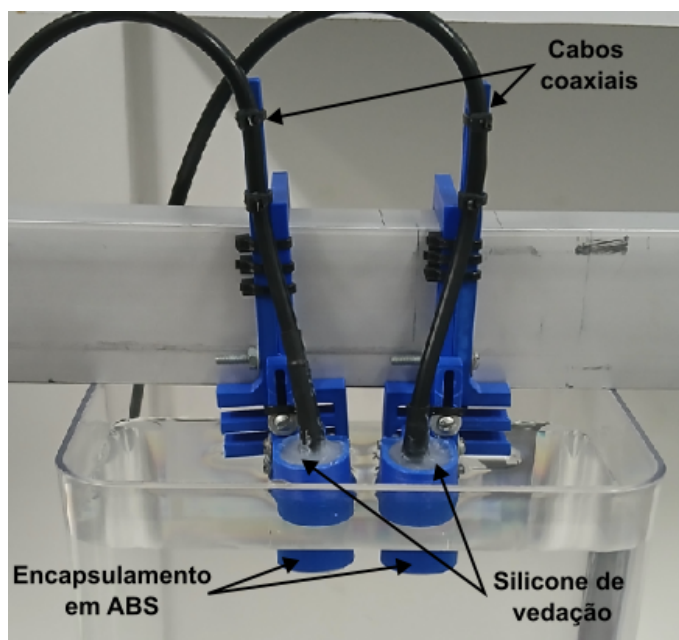
Fonte: Autor (2025).

Os cabos dos transdutores foram conectados ao circuito de excitação e recepção por meio de cabos coaxiais e conectores apropriados, garantindo blindagem eletromagnética e integridade dos sinais transmitidos. Cada canal de aquisição foi isolado eletricamente

e testado individualmente antes do início dos ensaios, assegurando que o ruído de fundo estivesse dentro dos limites aceitáveis. A Tabela 3.2 fornece as especificações técnicas dos transdutores utilizados, incluindo frequência central, largura de banda, tempo de resposta e ângulo de abertura do feixe.

Para garantir a impermeabilidade do sensor, que será utilizado abaixo d'água e não tem classificação para tal finalidade, foi necessária a utilização de silicone de vedação junto ao invólucro que protege e alinha mecanicamente o sensor. Uma foto da montagem pronta pode ser visualizada na Figura 3.9 onde são destacadas as áreas de aplicação da vedação, protegendo a conexão entre os cabos coaxiais e os transdutores ultrassônicos, bem como o invólucro fabricado na impressora 3D que suporta todo o conjunto.

Figura 3.9: Montagem e vedação do suporte para fixação dos transdutores ultrassônicos



Fonte: Autor (2025).

3.1.6 Preparação das camadas granulométricas

A simulação das interfaces geológicas em laboratório requer controle rigoroso da granulometria, da espessura e da composição dos materiais utilizados. Neste trabalho, foram selecionados materiais granulares com propriedades compatíveis com os limites impostos pela frequência de operação dos transdutores ultrassônicos disponíveis citados na Tabela 3.2.

Sendo assim, foram escolhidas as microesferas de vidro comumente utilizadas em serviços de jateamento. Especificamente, optou-se pelas microesferas de vidro classificadas como tipo RA (212-600 μm) e tipo RB (180-300 μm). Esses materiais foram selecionados por apresentarem boa esfericidade, baixa densidade relativa, distribuição granulométrica

controlada e disponibilidade no mercado brasileiro. Porém, foi necessário peneirar os grãos para garantir a correta classificação do material que foi utilizado, conforme ilustrado na Figura 3.10.

Figura 3.10: Classificação granulométrica das microesferas de vidro (600 μm , 425 μm , 250 μm e 150 μm)



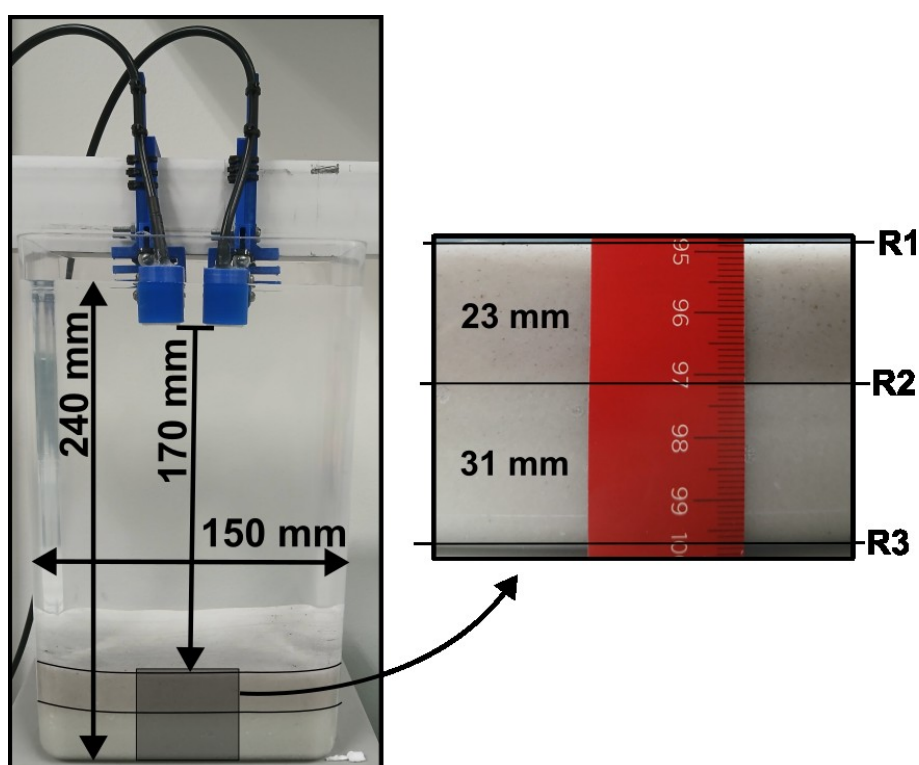
Fonte: Autor (2025).

A escolha de granulometrias distintas e bem classificadas permite a construção de interfaces com contrastes acústicos mensuráveis, fundamentais para a avaliação da resposta sísmica e detecção de descontinuidades ao longo do perfil experimental, logo, os dois materiais passaram pelas peneiras com abertura de 600 μm , 425 μm , 250 μm e 150 μm . Como resultado, a maior quantidade de grãos ficou retida no intervalo entre 425 μm e 250 μm , em seguida, no intervalo entre 250 μm e 150 μm . Apesar da variação dos grãos ser um pouco distinta dos diâmetros mais adequados informados por Krawczyk et al. (2013) em sua pesquisa, onde as camadas foram montadas com os diâmetros dos grãos sendo de 400 μm a 300 μm e 300 μm a 200 μm , o trabalho desenvolvido aqui ainda está condizente com a relação frequência-granulometria informada pela autora utilizando a frequência central de 200 kHz para emissão do pulso sonoro com grãos variando entre 425 μm e 150 μm .

Após o processo de classificação dos grãos, foi iniciada a montagem das interfaces granulométricas, com a utilização de um recipiente de acrílico com as seguintes dimensões: 250 mm x 150 mm x 150 mm, e adotou-se o método da peneiração manual, técnica

empregada em experimentos geotécnicos para garantir a deposição controlada de materiais granulares. As peneiras permitiram a queda uniforme das microesferas de vidro, assegurando uma compactação leve e homogênea. O movimento constante aplicado à peneira durante a deposição contribuiu para a formação de uma superfície plana e a manutenção da espessura desejada para cada camada. Após a construção das camadas, foi inserido água no recipiente até que atingisse a altura de 240 mm, garantindo que os elementos ultrassônicos ficassem submersos, e o resultado da montagem pode ser visualizado na Figura 3.11.

Figura 3.11: Montagem e distribuição das microesferas no recipiente acrílico

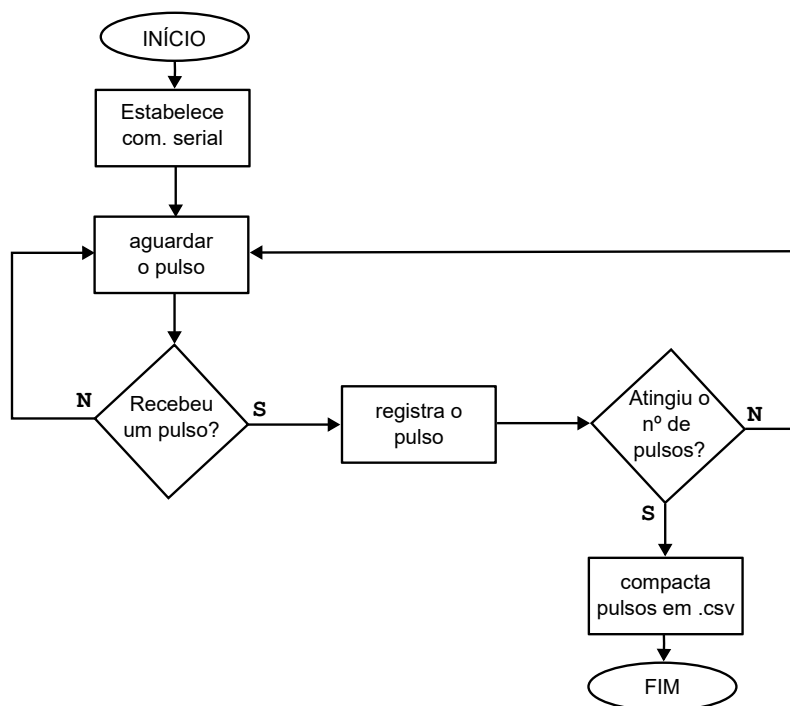


Fonte: Autor (2025).

3.2 Registro e processamento dos dados

Na etapa de processamento dos dados, o fluxo tem início com a abertura de comunicação serial entre o DSP e um computador remoto, utilizando a interface UART configurada para operar a uma taxa de **115200** bps. A recepção dos dados é realizada por um script em *Python*, desenvolvido especificamente para funcionar como um *datalogger*, capturando os valores enviados pelo DSP em tempo real e armazenando-os em arquivos no formato *.csv*, de acordo com a Figura 3.12. Cada linha do arquivo corresponde a uma aquisição individual, representando a resposta temporal do meio à excitação ultrassônica.

Figura 3.12: Fluxograma de aquisição do sinal ultrassônico no computador



Fonte: Autor (2025).

Para facilitar a identificação dos eventos sísmicos refletidos, é calculado o envelope analítico de cada traço utilizando a transformada de Hilbert, permitindo visualizar com maior clareza os tempos de chegada e a atenuação das reflexões. A estrutura de processamento foi implementada em *Python*, utilizando bibliotecas como *NumPy*, *SciPy* e *Matplotlib*, garantindo reprodutibilidade e portabilidade dos resultados. Essa abordagem permitiu construir sismogramas bidimensionais, onde cada linha representa um traço sísmico obtido em uma posição espacial distinta da caixa de areia, viabilizando a análise qualitativa e quantitativa das interfaces presentes.

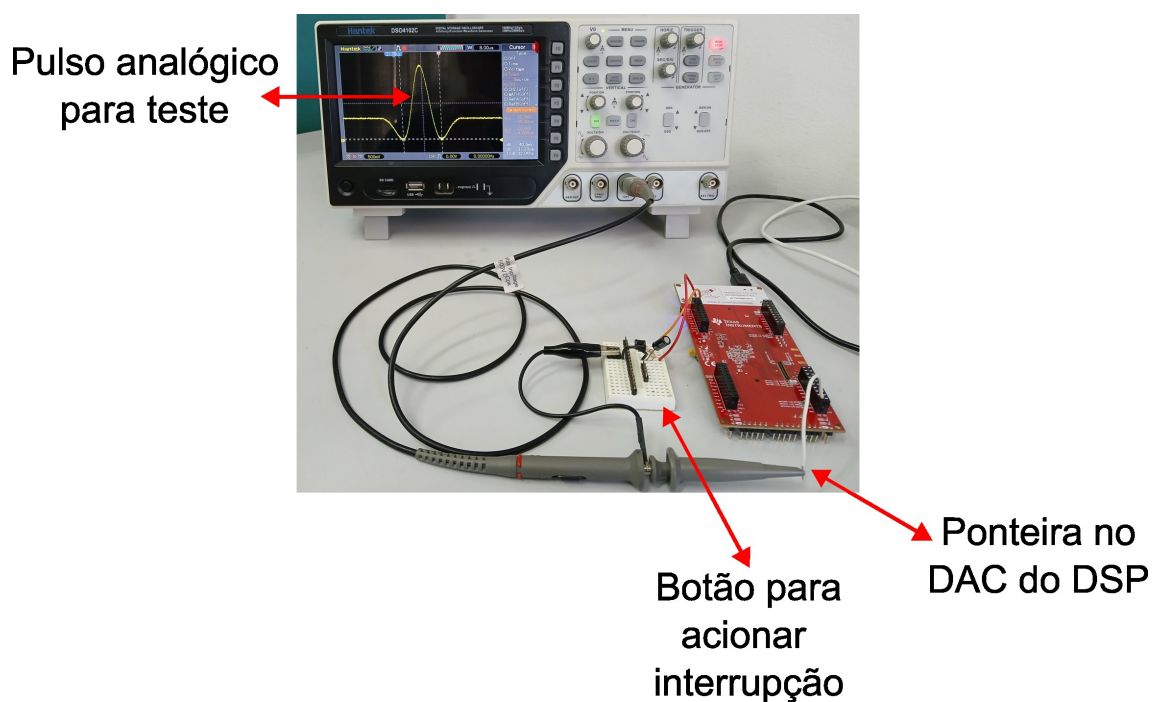
3.3 Comissionamento do sistema ultrassônico

Após a conclusão da montagem física do sistema e da implementação dos módulos de *software* embarcado, foi realizada a etapa de comissionamento com o objetivo de validar o funcionamento do processador digital de sinais, verificar a integridade dos sinais de saída e garantir a sincronização correta entre os eventos de geração e aquisição. Essa etapa é essencial para assegurar que todos os subsistemas operem conforme os requisitos definidos no projeto.

O principal instrumento de verificação utilizado foi o osciloscópio digital, que permitiu a análise em tempo real das formas de onda geradas pelo DAC. A Figura 3.13 ilustra como as medições foram realizadas utilizando a sonda do osciloscópio diretamente no

pino de saída analógica do DSP (DACOUTB). Vale lembrar que este canal de leitura do osciloscópio também foi definido como *trigger* para aquisição do sinal e que o sinal apresentado neste procedimento é de um sinal do tipo *Ricker*, que foi estudado durante o desenvolvimento deste trabalho, mas por precisar de uma largura de banda maior que os transdutores disponíveis seriam capazes de fornecer, foi substituído por um sinal senoidal de 200 kHz.

Figura 3.13: Montagem para verificação do funcionamento do botão.



Fonte: Autor (2025).

Inicialmente, foi verificada a geração dos pulsos senoidais programados em resposta à interrupção externa (XINT1). Como esperado, os pulsos apresentaram frequência e número de ciclos compatíveis com a configuração do sensor utilizado, com baixa distorção e estabilidade temporal. A Figura 3.14 apresenta a forma de onda gerada, uma senoide de 200 kHz com 5 pulsos emitidos, capturada diretamente no pino de saída do DAC.

Além disso, foram realizados testes de integridade na comunicação UART entre o DSP e o computador. Foram enviados pacotes simulados contendo dados adquiridos e marcadores de início e fim de transmissão. A recepção dos dados foi monitorada em tempo real via terminal serial e comparada com os valores esperados, validando tanto a função de transmissão quanto os algoritmos de empacotamento de dados.

Após o comissionamento dos módulos digitais do sistema, foi realizada uma verificação física do funcionamento completo da cadeia de emissão e recepção do sinal ultrassônico. O objetivo desse teste era assegurar que os pulsos gerados pelo DSP fossem corretamente transmitidos por meio do transdutor emissor, propagassem-se e fossem detectados pelo transdutor receptor, cujos sinais seriam então visualizados no osciloscópio.

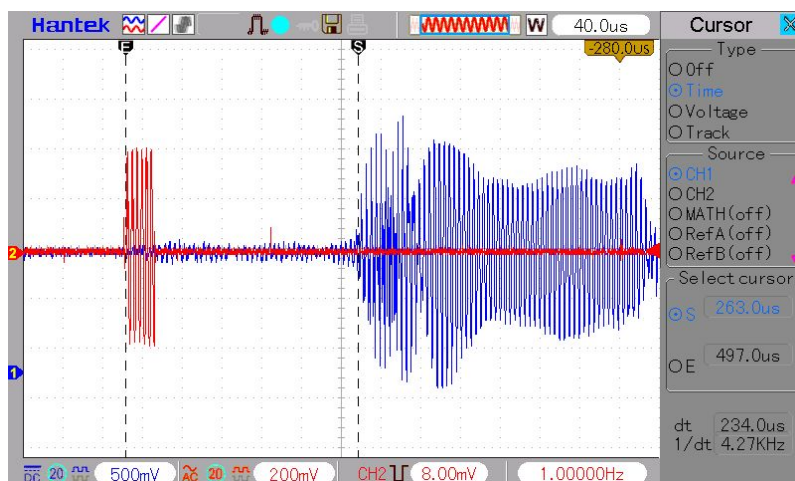
Figura 3.14: Observação via osciloscópio do sinal emitido pelo DAC para uma frequência de 200 kHz e 5 pulsos



Fonte: Autor (2025).

Para excitação do emissor, foi programada uma sequência de pulsos senoidais na frequência de 200 kHz. A Figura 3.15 mostra as formas de ondas observada no osciloscópio: o primeiro pulso, na cor vermelha, corresponde à excitação aplicado ao amplificador do transdutor emissor, enquanto o segundo pulso, de cor azul, refere-se ao eco captado pela amplificação do sinal recebido pelo transdutor receptor.

Figura 3.15: Observação via osciloscópio dos sinais de emissão (DAC) e recepção amplificado



Fonte: Autor (2025).

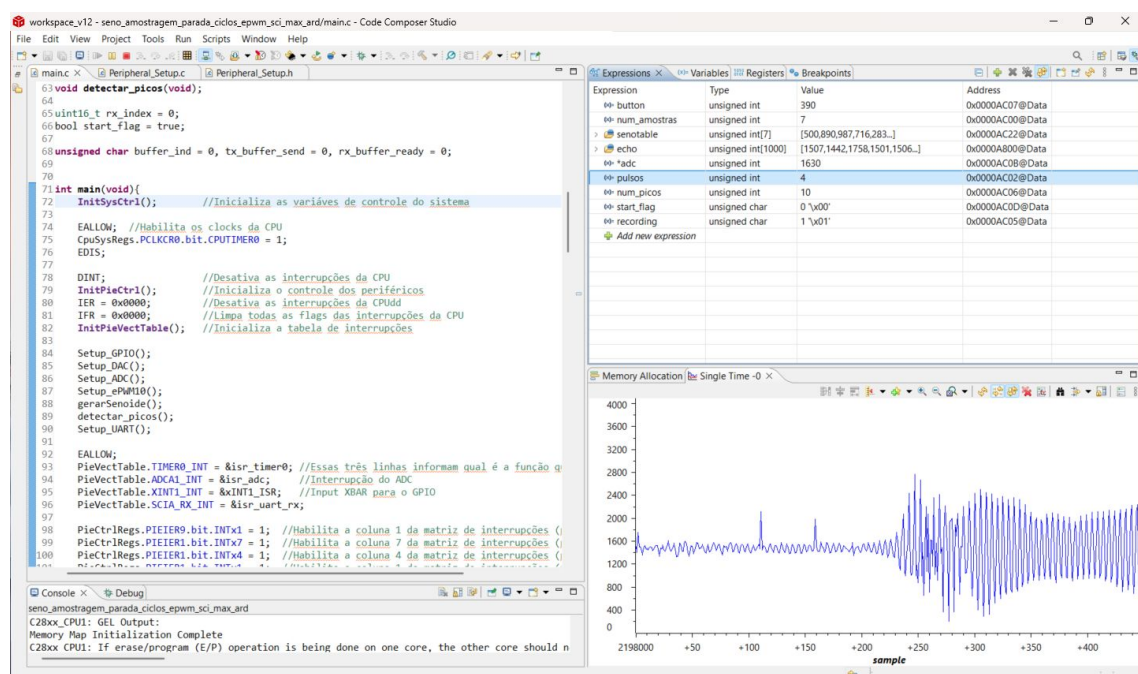
O tempo medido entre a emissão e a recepção do sinal foi de 234 μ s. Considerando que a coluna de água onde os transdutores estavam instalados possuía, aproximadamente, 170

mm até o contato com as primeiras microesferas do recipiente, obteve-se uma velocidade de propagação do sinal de cerca de 1453 m/s. Esse valor está em concordância com a velocidade de propagação do som em água doce a 20 °C, usualmente reportada como 1480 m/s (Kinsler et al. 2000). Contudo, deve ser levado em consideração neste resultado que existe uma incerteza na medição da distância por usar uma régua milimétrica, enquanto que o tempo está sendo medido em microsegundos, assim, pequenas variações de tempo e distância podem alterar significativamente a velocidade de propagação. Por exemplo, caso a diferença de tempo entre emissão e recepção do sinal fosse de 230 μ s, observado nos casos posteriores, a velocidade de propagação do som seria, aproximadamente, 1478 m/s.

Outro fator importante é que a tensão do sinal recepcionado não ultrapassou a tensão de 3 V, que é o limite físico para a entrada do ADC do dispositivo de aquisição do sinal analógico, assim, apesar de recomendado, não foi implementado um circuito de proteção para a entrada analógica do DSP, que estava configurado para uma taxa de aquisição de 1 MHz.

Sendo assim, com o sinal analógico de recepção amplificado menor que a tensão limite permitida pelo ADC do DSP, mostrou-se seguro fazer a conexão destes estágios do sistema de aquisição. O resultado disto é representado na Figura 3.16, com o resultado gráfico da amostragem realizada pelo ADC do DSP na tela do *software* de compilação Code Composer Studio®, quando comparado com o gráfico apresentado no osciloscópio na Figura 3.15, linha azul, é possível constatar que o resultado é satisfatório.

Figura 3.16: Resultado da amostragem do ADC no Code Composer Studio®



Fonte: Autor (2025).

Dessa forma, o comissionamento garantiu que o sistema embarcado desenvolvido

atende aos requisitos de sincronização, fidelidade dos sinais e comunicação digital, estabelecendo uma base segura para a realização dos experimentos e para a realização da análise dos pulsos sísmicos recepcionados.

3.4 Custo financeiro do sistema ultrassônico proposto

O custo total aproximado, apresentado na Tabela 3.5, foi de R\$ 1.495,00, valor que contempla todos os insumos utilizados na construção e execução experimental do sistema proposto. Parte significativa dos custos foi otimizada pela utilização de peças fabricadas em impressora 3D, pelo desenvolvimento próprio na etapa de condicionamento do sinal de recepção, pela escolha de implementar as etapas de geração e aquisição dos sinais analógicos em um único dispositivo (DSP) e pela escolha de materiais consumíveis acessíveis no mercado nacional. Assim, o investimento realizado demonstra que é possível desenvolver um sistema funcional, de baixo custo e com potencial de expansão para configurações mais complexas em pesquisas futuras.

Tabela 3.5: Estimativa de custos dos principais componentes utilizados no sistema

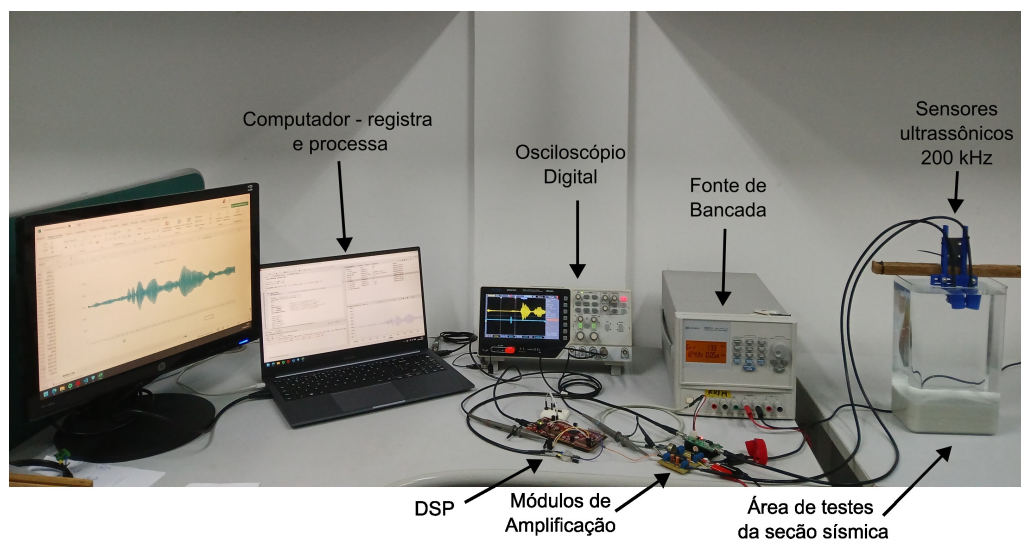
ITEM	QTD.	DESCRIÇÃO	CUSTO (R\$)
DSP	1 und.	LAUNCHXL-F28379D	500,00
Transdutores ultrassônicos	2 und.	RCWL-18200-TR	120,00
Amplificador de transmissão	1 und.	KDT1210AMP-001	340,00
Cabo coaxial	4 metros	LMR240	100,00
Peça em 3D	8 peças	Fabricação própria	30,00
Amplificador de recepção	1 und.	Fabricação própria	50,00
Conectores coaxiais	2 und.	SMA para LMR240	20,00
Reservatório acrílico	1 und.	250 × 150 × 150 (mm)	50,00
Materiais granulares	10 kg	5 kg RA + 5 kg RB	285,00
SOMA			1495,00

Capítulo 4

Experimentos e Resultados

Este capítulo apresenta os resultados obtidos a partir dos ensaios realizados com o sistema ultrassônico proposto neste trabalho, ilustrado na Figura 4.1, bem como a discussão crítica desses dados à luz dos conceitos teóricos apresentados nos capítulos anteriores. A estruturação dos experimentos considerou diferentes configurações de posicionamento dos transdutores ultrassônicos, visando analisar a resposta sísmica refletida em ambientes controlados. As análises incluem tanto a visualização dos sinais adquiridos quanto o tratamento digital aplicado para extração de informações relevantes, como tempos de chegada e reflexões obtidas.

Figura 4.1: Sistema ultrassônico completo



Fonte: Autor (2025).

4.1 Ajuste de foco do transdutor ultrassônico

Os transdutores ultrassônicos, conforme apresentados anteriormente, têm um ângulo de dispersão do pulso que depende da sua natureza de construção. Dessa forma, a fim de

conhecer a melhor configuração de testes para identificar a posição de instalação destes elementos, os transdutores foram fixados a 25 mm de distância inicialmente, centro a centro, e tiveram seus *offsets* aumentados a cada 5 mm até atingirem 45 mm de distância, conforme ilustrado na Figura 4.2.

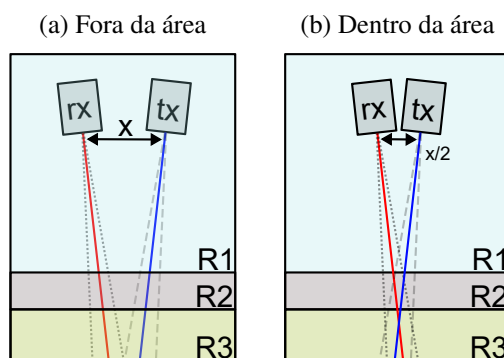
Figura 4.2: Variação da distância entre os transdutores: 25 mm até 45 mm



Fonte: Autor (2025).

A Figura 4.3 ilustra o que está sendo buscado neste experimento, que é a determinação da diretividade dos transdutores escolhidos.

Figura 4.3: Diretividade dos transdutores ultrassônicos e suas respectivas áreas de detecção



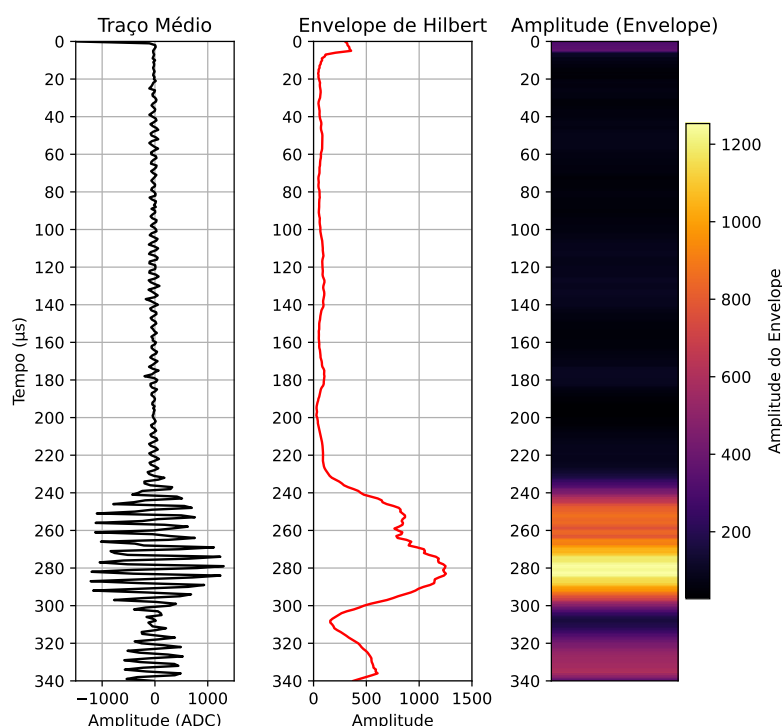
Fonte: Autor (2025)

Os transdutores de emissão e recepção fixados inicialmente com deslocamento X , Figura 4.3a, centro a centro, com o mesmo feixe direcional de atuação, só irão observar a reflexão vinda da interface $R1$, pois ambos os elementos estão dentro do mesmo meio

acústico. Porém, quando essa distância é diminuída pela metade, Figura 4.3b, a área de detecção dos transdutores abrangem as interfaces e suas prováveis reflexões. Dessa forma, a escolha da posição relativa entre transmissor e receptor deve considerar esse campo de diretividade, garantindo que ambos estejam alinhados ao ponto focal para máxima eficiência de captação.

Na primeira etapa, com 25 mm entre os transdutores, é possível perceber a interface R1 e R3, respectivamente, em 230 μs quando se inicia o aumento de amplitude da reflexão e por volta de 300 μs quando acontece a inversão de fase do sinal indicando uma possível diferença de impedância, o que caracteriza uma interface.

Figura 4.4: Ensaio sísmico com 25 mm de distância



Fonte: Autor (2025).

Com os dados de construção das interfaces e os tempos das reflexões é possível determinar a velocidade de propagação do som como forma de verificar se as interfaces estão condizentes com a realidade. Para o caso de 25 mm, é possível observar as informações do ensaio organizadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Cálculo de velocidade com base no tempo de eco - 25 mm

Tempo de eco (μs)	Δ eco (μs)	Distância (m)	Velocidade calculada (m/s)
230	230	0,17	1478,26
300	70	0,054	1542,85

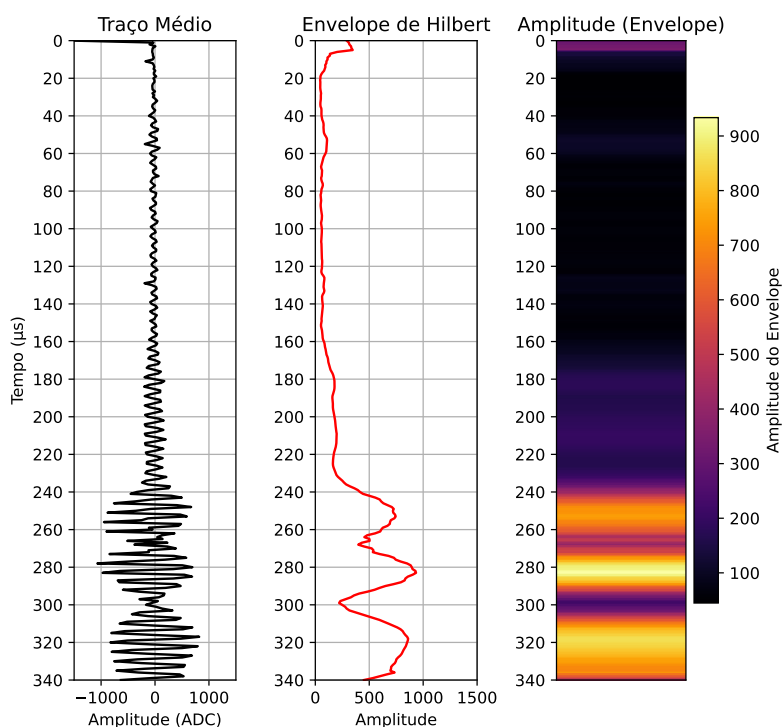
A velocidade calculada para o tempo de propagação na água foi de 1478 m/s, o que é

muito semelhante à bibliografia citada que relata velocidades de aproximadamente 1480 m/s. Levando em consideração que a camada total de material granular é de 54 mm, é possível determinar que a velocidade de propagação do sinal nos materiais granulares foi de 1542,85 m/s.

Segundo estudos experimentais com microesferas de vidro submersas, as velocidades de propagação podem variar conforme o grau de compactação do meio e a proporção entre sólidos e fluidos, situando-se geralmente entre 1500 e 1800 m/s (Guéguen & Palciauskas 1994). A proximidade dos valores obtidos neste experimento reforça a consistência dos dados coletados e valida a metodologia adotada para análise da resposta acústica do meio.

Seguindo com a variação da distância, os transdutores foram movidos até 30 mm de distância entre eles. Nesta posição, foi possível observar a melhor definição das interfaces R1, R2 e R3, com definições claras do posicionamento no tempo destas camadas, como ilustrado na Figura 4.5.

Figura 4.5: Ensaio sísmico com 30mm de distância



Fonte: Autor (2025).

A Tabela 4.2 refere-se aos dados consolidados de tempo para o ensaio com 30 mm de distância. Com estas informações é possível determinar a velocidade de propagação do meio ao qual a onda percorre.

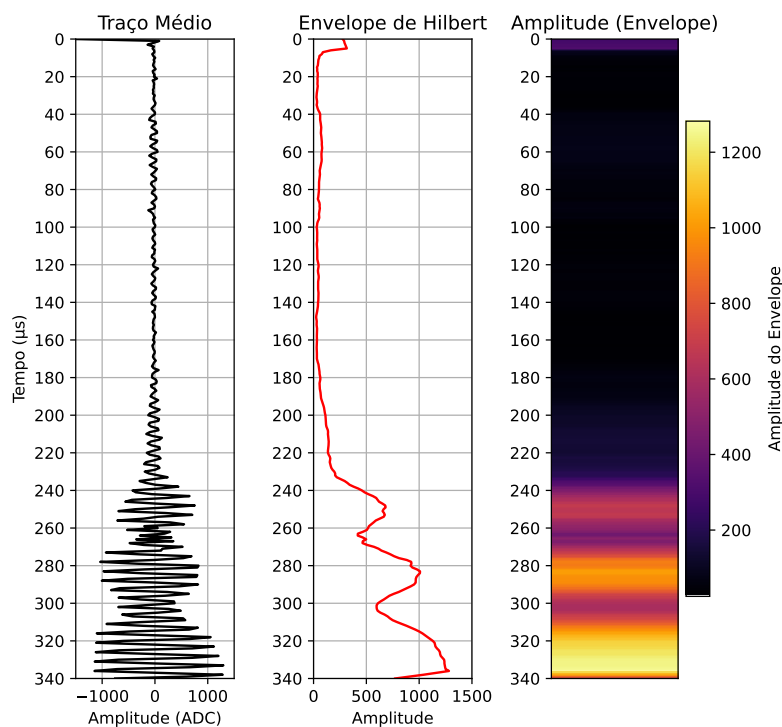
Com a separação dos transdutores em 35 mm, observa-se uma leve atenuação das reflexões, embora ainda seja possível identificar de forma relativamente clara as interfaces R1, R2 e R3. A reflexão R1, correspondente ao limite entre a água e as microesferas, mantém-se bem definida, enquanto R2 e R3 já apresentam sinais de enfraquecimento em

Tabela 4.2: Cálculo de velocidade com base no tempo de eco - 30 mm

Tempo de eco (μs)	Δ eco (μs)	Distância (m)	Velocidade calculada (m/s)
230	230	0,17	1478,26
259	29	0,023	1586,2
298	41	0,031	1589,74

amplitude. Esse comportamento está relacionado ao campo de diretividade do sensor, que começa a se afastar de seu ponto focal ideal, reduzindo a energia detectada nas reflexões provenientes de camadas mais profundas.

Figura 4.6: Ensaio sísmico com 35mm de distância



Fonte: Autor (2025).

Vale notar que R2 tem uma inversão de fase próximo a 259 μs , o que leva a uma provável interface de materiais distintos, como aconteceu no teste anterior com 30 mm. A reflexão R3 é mais sutil, perceptível apenas pela diferença de amplitude do sinal. A Tabela 4.3 reúne os tempos das reflexões obtidas no teste com espaçamento de 35 mm, sendo utilizada para o cálculo das velocidades correspondentes às camadas identificadas no experimento.

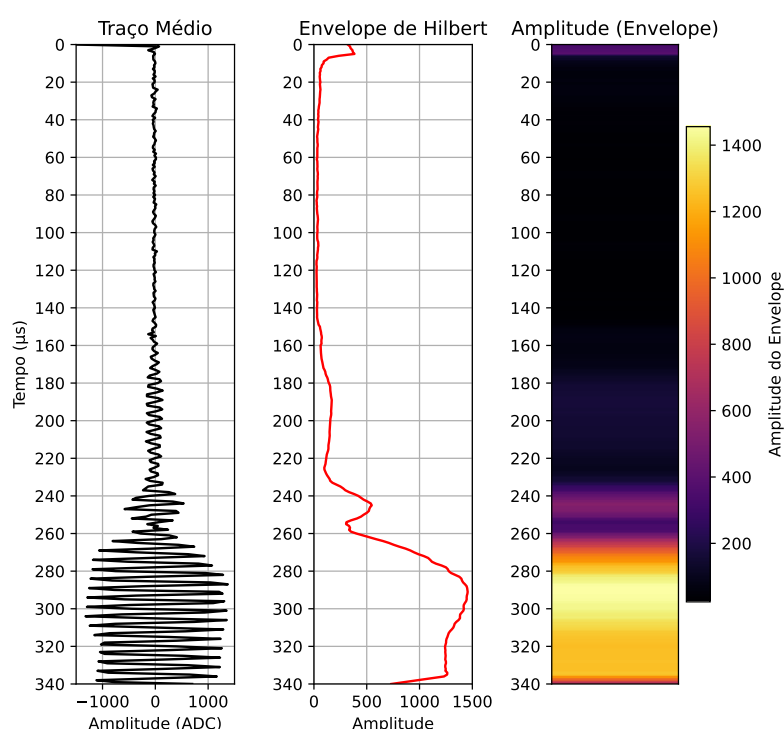
A 40 mm de distância entre o emissor e receptor, a tendência de perda de definição das interfaces intermediárias se acentua. A reflexão correspondente à interface R1 permanece identificável, embora com menor nitidez em comparação aos casos anteriores. As demais interfaces, R2 tornou-se quase imperceptível, enquanto R3 foi totalmente supri-

Tabela 4.3: Cálculo de velocidade com base no tempo de reflexão - 35 mm

Tempo de reflexão (μs)	Δ reflexão (μs)	Distância (m)	Velocidade calculada (m/s)
230	230	0,17	1478,26
259	29	0,023	1586,2
300	41	0,031	1512,2

mida, o que evidencia uma limitação da capacidade de detecção do sistema para alvos mais profundos quando os transdutores são afastados além do ponto de foco ideal.

Figura 4.7: Ensaio sísmico com 40mm de distância



Fonte: Autor (2025).

Na Tabela 4.4 é possível notar que a velocidade de propagação do sinal para R1 e R2 permaneceu próximo ao esperado para um pulso sonoro propagado no meio aquoso, como mostrou os ensaios anteriores.

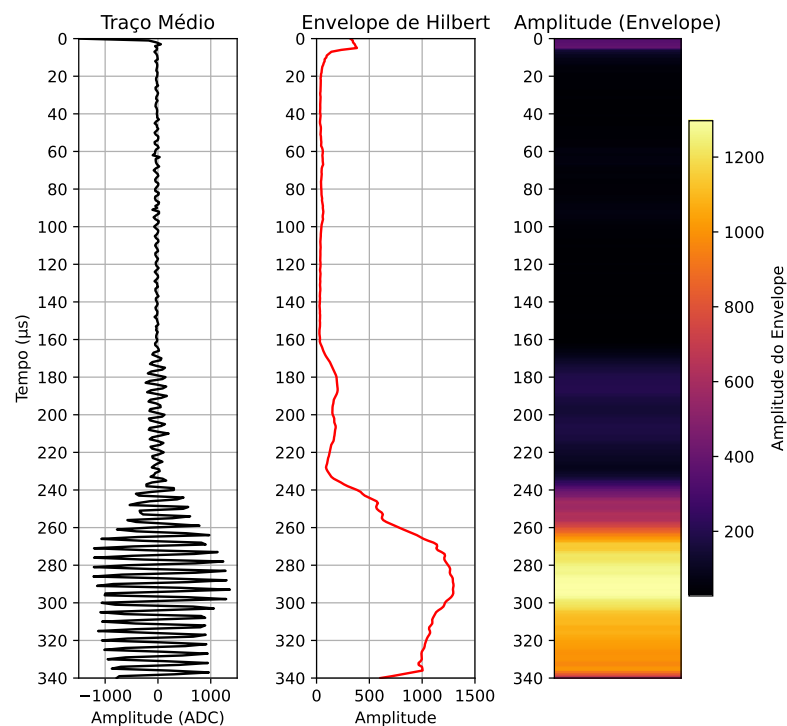
Tabela 4.4: Cálculo de velocidade com base no tempo de reflexão - 40 mm

Tempo de reflexão (μs)	Δ reflexão (μs)	Distância (m)	Velocidade calculada (m/s)
227	227	0,17	1497,79
257	30	0,023	1533,33

No experimento com 45 mm de distância entre os transdutores, a única reflexão claramente observada é a proveniente da interface R1 aos 230 μs , pois as reflexões R2 e R3

deixam de ser perceptíveis. O que reforça que o sistema perde sensibilidade para interfaces mais profundas em maiores distâncias de separação. Essa limitação está relacionada ao feixe acústico do transdutor, que se dispersa significativamente com o aumento da distância, reduzindo a energia refletida detectável. Tais resultados confirmam a importância de considerar o foco do sensor na configuração do experimento, a fim de garantir a melhor resolução possível das interfaces do meio.

Figura 4.8: Ensaio sísmico com 45mm de distância



Fonte: Autor (2025).

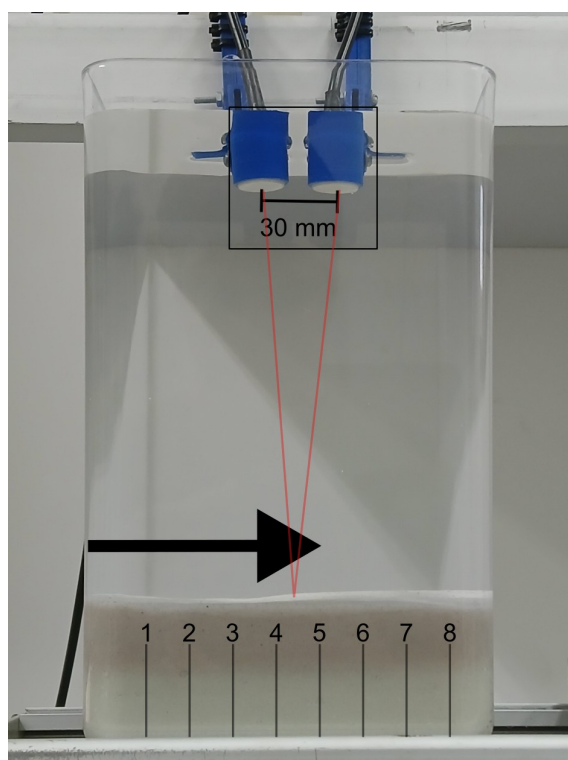
Com base nos resultados apresentados, observa-se que a configuração mais adequada para os transdutores ultrassônicos neste experimento está entre 30 mm e 35 mm de *offset*. Nessa faixa, obtém-se o melhor equilíbrio entre amplitude dos sinais refletidos, nitidez das interfaces e fidelidade dos tempos de eco. Distâncias superiores comprometem a qualidade da detecção, devido à perda de foco e atenuação dos sinais, indicando que a diretividade do sensor deve ser cuidadosamente considerada no projeto de experimentos com múltiplas camadas. Por outro lado, distâncias muito reduzidas destacam as reflexões mais superficiais em detrimento das intermediárias e da base.

4.2 Seção sísmica no reservatório acrílico

Para a realização da seção sísmica os transdutores foram fixados com 30 mm de distância entre eles, por ser a melhor distância focal encontrada no teste anterior. Em seguida,

foi realizado o deslocamento do conjunto em oito pontos de medição, com diferença de 1 cm entre cada ponto, localizados mais ao centro com a finalidade de diminuir a interferência das paredes do recipiente. A Figura 4.9 ilustra, sem escala, como o deslocamento foi realizado para a realização da seção sísmica no reservatório de acrílico.

Figura 4.9: Procedimento para realização do ensaio sísmico de reflexão no reservatório



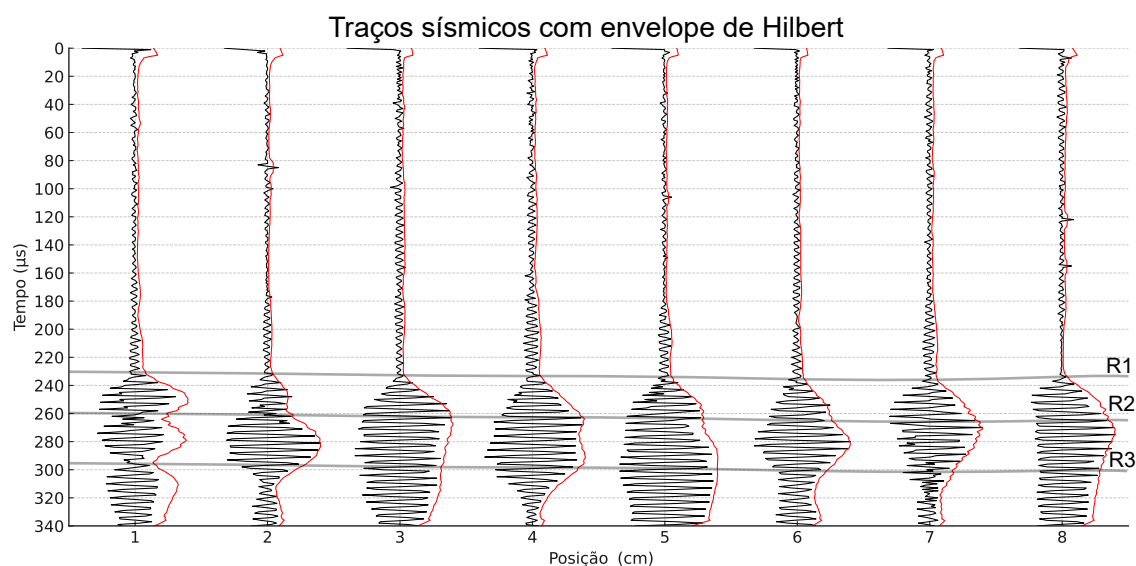
Fonte: Autor (2025).

Os traços sísmicos obtidos em cada posição são apresentados na Figura 4.10, já processados por meio da extração do envelope utilizando a transformada de Hilbert. Observa-se que a primeira reflexão (**R1**) está claramente identificada na maioria dos traços, especialmente nos pontos centrais da seção. No entanto, em alguns pontos específicos, como 3 cm, 5 cm e 8 cm, somente a reflexão primária R1 é visível com clareza, enquanto as reflexões subsequentes (R2 e R3) apresentam atenuação significativa ou não são percebidas.

Esse comportamento pode estar associado a diversos fatores, entre eles a variação no acoplamento entre os transdutores e o meio, desnível na superfície de deposição das camadas ou pequenas irregularidades na espessura das interfaces granulares. Além disso, devido à geometria do recipiente e à natureza da propagação ultrassônica, a reflexão e refração das ondas nas interfaces podem sofrer efeitos de desvio angular e atenuação localizada, reduzindo a energia refletida em determinados pontos de recepção.

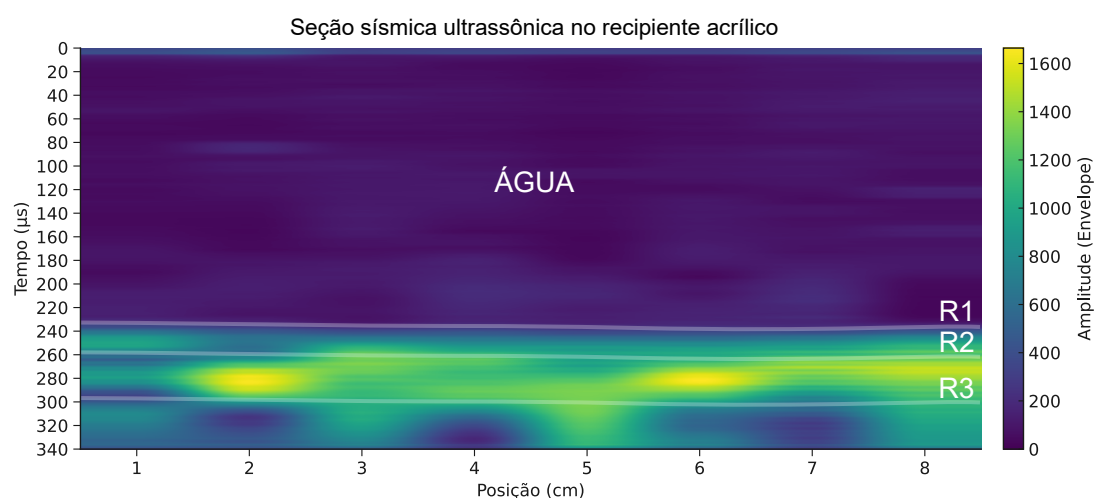
Para uma visualização espacial mais integrada dos dados, a Figura 4.11 apresenta a seção sísmica bidimensional construída a partir da interpolação dos traços adquiridos. A amplitude do envelope é representada em uma escala de cores, onde tons mais intensos indicam maior energia refletida.

Figura 4.10: Traços sísmicos do ensaio



Fonte: Autor (2025).

Figura 4.11: Seção sísmica 2D da área ensaiada



Fonte: Autor (2025).

Essa visualização permite identificar com mais clareza a posição da interface **R1** ao longo de todos os pontos medidos, enquanto as interfaces **R2** e **R3** apresentam comportamento menos homogêneo, sendo detectadas com maior evidência apenas em determinadas regiões. Tal variação pode ser atribuída às diferenças locais na compactação das camadas ou à espessura da camada intermediária entre elas, que influencia diretamente no tempo de propagação e na intensidade da onda refletida.

Capítulo 5

Conclusão

Este trabalho teve como finalidade o desenvolvimento e a aplicação de um sistema ultrassônico voltado à realização de ensaios de sísmica de reflexão em modelos físicos controlados, utilizando uma caixa de areia como meio de propagação. A pesquisa integrou os fundamentos teóricos da geofísica com a engenharia elétrica nas áreas de instrumentação e sistemas embarcados, permitindo a implementação de um sistema de aquisição de dados robusto, preciso e adaptado às necessidades de laboratório.

Ao longo do desenvolvimento, foram elaboradas soluções para a geração de pulsos, amplificação e condicionamento do sinal, sincronização de eventos e aquisição digital por meio de um DSP da família C2000. A arquitetura proposta demonstrou-se eficiente tanto na emissão quanto na recepção de sinais ultrassônicos, possibilitando a identificação de múltiplas interfaces em materiais granulares, com refletividades distintas.

O processamento dos dados seguiu uma abordagem sistemática simples, fundamentada em técnicas clássicas da sísmica de reflexão. Tais etapas permitiram o realce dos eventos sísmicos relevantes, viabilizando a geração de seções sísmicas bidimensionais com qualidade suficiente para interpretação.

A validação experimental confirmou que o sistema é capaz de capturar reflexões provenientes de descontinuidades internas no meio, mesmo em distâncias verticais pequenas. Os resultados obtidos mostraram coerência com o comportamento físico esperado, evidenciando o potencial da abordagem adotada como ferramenta didática, de pesquisa e de validação de modelos geofísicos em escala reduzida.

O trabalho apresentado não apenas oferece uma solução funcional para a aquisição e visualização de dados sísmicos em ambiente laboratorial, como também estabelece uma base para futuros avanços. Caso sejam incorporadas técnicas de controle, a implementação de algoritmos de inversão ou migração em tempo real e o uso de materiais mais complexos, que constituem etapas desafiadoras, poderão impulsionar significativamente o desenvolvimento e ampliar o potencial de aplicação desta plataforma.

Assim, o presente trabalho reforça a viabilidade da aplicação da sísmica de reflexão em modelos físicos simplificados, proporcionando um ambiente de investigação acessível e replicável para estudos em geociências, instrumentação e processamento de sinais.

5.1 Trabalhos futuros

Por fim, com a finalidade de obter melhores resultados, faz-se necessária a realização de algumas etapas para consolidação do projeto:

1. Implementar o sistema ultrassônico desenvolvido aqui no sistema de movimentação de dois eixos concluído na primeira etapa deste projeto, para que seja possível realizar o imageamento sísmico em três dimensões;
2. Implementar o sistema ultrassônico desenvolvido aqui no sistema de aquisição e tratamento dos dados concluído na primeira etapa deste projeto, para que melhore a experiência entre usuário-sistema;
3. Aumentar o número de transdutores ultrassônicos amostrados pelo DSP para, no mínimo, quatro, o que irá permitir uma maior quantidade de análises possíveis, como, por exemplo, uma determinação mais precisa da velocidade de propagação do som no meio;
4. Verificar a possibilidade de adquirir transdutores com maior ângulo de diretividade e largura de banda, em torno dos 200 kHz, desde que não comprometa o custo total do projeto, com a finalidade de melhorar a detecção das interfaces.

Referências Bibliográficas

- Aki, K. & P. G. Richards (1980), 'Quantitative seismology: Theory and methods', *W.H. Freeman and Company* **1**, 144–148.
- Baker, R. Jacob (2019), *CMOS: Circuit Design, Layout, and Simulation*, 4th ed.^a edição, Wiley-IEEE Press.
- Buddensiek, Maïke-Liselotte (2009), Seismic Imaging of Sandbox Models, Tese de doutorado, Freie Universität Berlin, Berlin, Germany. Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades doctor rerum naturalium (Dr. rer. nat.) im Fachbereich Geowissenschaften.
- Caldas, Manuela Fernandes & Pedro Victor Zalán (2009), 'Reconstituição cinemática e tectono-sedimentação associada a domos salinos nas águas profundas da bacia de Santos, Brasil', *Boletim de Geociências Petrobras* **17**(2), 227–248.
- Costa, Anderson Eugênio Silva da (2024), Desenvolvimento de uma plataforma didática para experimento sísmico em caixa de areia, Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal, RN, Brasil. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação, área de concentração: Automação e Sistemas.
- French, W. S. (1974), 'Two-dimensional and three-dimensional migration of model-experiment reflection profiles', *Geophysics* **39**(3), 265–277.
- Guéguen, Yves & Victor Palciauskas (1994), *Introduction to the Physics of Rocks*, Princeton University Press, Princeton.
- Hidayat, Darmawan, Setianto, Nendi Suhendi Syafei & Bambang Mukti Wibawa (2018), Mosfet-based high voltage short pulse generator for ultrasonic transducer excitation, em 'AIP Conference Proceedings', Vol. 1927, p. 030018.
- Ikeda, T. (1996), *Fundamentals of Piezoelectricity*, Oxford University Press, New York.
- Jaffe, B., W. R. Cook & H. Jaffe (1971), *Piezoelectric Ceramics*, Academic Press, London.
- Jiang, Wei, Xin Li, Hao Zhao & Rui Chen (2020), 'High-speed multiplexed ultrasonic array system with synchronized switching', *Ultrasonics* **108**, 106153.
- Johns, David; Martin, Ken (1997), *Analog Integrated Circuit Design*, Wiley.

- Kearey, Philip, Michael Brooks & Ian Hill (2002), *An Introduction to Geophysical Exploration*, 3ª edição, Blackwell Science, Oxford.
- Kinsler, Lawrence E., Austin R. Frey, Allan B. Coppers & James V. Sanders (2000), *Fundamentals of Acoustics*, 4ª edição, John Wiley & Sons, New York.
- Krautkrämer, Josef & Herbert Krautkrämer (1990), *Ultrasonic Testing of Materials*, 4ª edição, Springer-Verlag.
- Krawczyk, C. M., M.-L. Buddensiek, O. Oncken & N. Kukowski (2013), ‘Seismic imaging of sandbox experiments – laboratory hardware setup and first reflection seismic sections’, *Solid Earth* **4**(1), 93–104.
- Krawczyk, Charlotte M., Ulrich Polom & Susanne Trabs (2012), ‘Ultrasonic high-resolution seismic methods for near-surface applications — a review’, *Journal of Applied Geophysics* **80**, 25–38.
- Lines, M. E. & A. M. Glass (2001), *Principles and Applications of Ferroelectrics and Related Materials*, Oxford University Press, Oxford.
- Michlmayr, G., D. Cohen & D. Or (2013), ‘Shear-induced force fluctuations and acoustic emissions in granular materials’, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* **118**, 6086–6098.
- Montero de Espinosa, Francisco, Oscar Martínez, Luis Elvira Segura & Luis Gómez-Ullate (2005), ‘Double frequency piezoelectric transducer design for harmonic imaging purposes in ndt’, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control* **52**(6), 980–986.
- Oppenheim, Alan V. & Ronald W. Schaffer (2010), *Processamento de Sinais em Tempo Discreto*, Pearson, São Paulo.
- Pratt, R. G., Z. Song, P. Williamson & M. Warner (1999), ‘Two-dimensional velocity models from wide-angle seismic data by wavefield inversion’, *Geophysical Journal International* **124**, 323–340.
- Queiroz, Klyfton Stanley Fernandes da Silva (2025), Interface para imageamento geológico utilizando sensores ultrassônicos em um sistema de caixa de areia, Trabalho de conclusão de curso - engenharia de computação, Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal, RN, Brasil. Departamento de Engenharia de Computação e Automação (DCA).
- Schreurs, G., R. Hänni, M. Panien & P. Vock (2003), ‘Analogue modelling of brittle thrust wedges using x-ray computed tomography’, *Tectonophysics* **373**, 119–134.
- Sedra, Adel S.; Smith, Kenneth C. (2010), *Microeletrônica*, 6. ed.ª edição, LTC.
- Sheriff, R. E. & L. P. Geldart (1995), *Exploration Seismology*, Cambridge University Press, Cambridge.

- Sherlock, Donald H. & Brian J. Evans (1999), Time-lapse 3-d seismic with analogue sandbox models, *em* 'SEG Technical Program Expanded Abstracts', pp. 1683–1686.
- Smith, Steven W. (1997), *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing*, California Technical Publishing, San Diego.
- Smith, Steven W. (1999), *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing*, 2ª edição, California Technical Publishing, San Diego, CA.
- Ulaby, Fawwaz T. & Michel M. Maharbiz (2012), *Circuits*, 2ª edição, NTS Press, Austin, TX, USA.
- Vilas Boas, Daniel Bono Ribeiro & Marco Antonio Barsottelli Botelho (2014), Sísmica de reflexão aplicada ao mapeamento de contato entre solo e rocha cristalina, utilizando fonte sísmica awd, *em* 'Anais do VI Simpósio Brasileiro de Geofísica (SimBGf)', Porto Alegre, RS, Brasil.
- Yilmaz, Öz (2001), *Seismic Data Analysis: Processing, Inversion, and Interpretation of Seismic Data*, Vol. 1, Society of Exploration Geophysicists (SEG).