

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Gabriel Guimarães Azzuz Athayde de Souza

**DESENVOLVIMENTO DE UM ESCÂNER AUTOMATIZADO PARA  
MEDIÇÃO SEQUENCIAL E CARACTERIZAÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL  
DE MATERIAIS ACÚSTICOS**

Santa Maria, RS  
2022

**Gabriel Guimarães Azzuz Athayde de Souza**

**DESENVOLVIMENTO DE UM ESCÂNER AUTOMATIZADO PARA MEDIÇÃO SEQUENCIAL E CARACTERIZAÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DE MATERIAIS ACÚSTICOS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração em Conforto ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Civil**. Defesa realizada por videoconferência.

ORIENTADOR: Prof. Eric Brandão Carneiro

COORIENTADOR: Prof. William D'Andrea Fonseca

Santa Maria, RS  
2022

Souza, Gabriel Guimarães Azzuz Athayde de  
Desenvolvimento de Um Escaner Automatizado Para  
Medição Sequencial e Caracterização Espaço-temporal de  
Materiais Acústicos / Gabriel Guimarães Azzuz Athayde de  
Souza.- 2022.  
65 p.; 30 cm

Orientador: Eric Brandão Carneiro  
Coorientador: William D'Andrea Fonseca  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil, RS, 2022

1. Acústica de Salas 2. Holografia de Campo Próximo 3.  
Impedância acústica in-situ 4. Coeficiente de Absorção in  
situ I. Brandão Carneiro, Eric II. D'Andrea Fonseca,  
William III. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

Declaro, GABRIEL GUIMARÃES AZZUZ ATHAYDE DE SOUZA, para os devidos fins e sob as penas da lei, que a pesquisa constante neste trabalho de conclusão de curso (Dissertação) foi por mim elaborada e que as informações necessárias objeto de consulta em literatura e outras fontes estão devidamente referenciadas. Declaro, ainda, que este trabalho ou parte dele não foi apresentado anteriormente para obtenção de qualquer outro grau acadêmico, estando ciente de que a inveracidade da presente declaração poderá resultar na anulação da titulação pela Universidade, entre outras consequências legais.

---

©2022

Todos os direitos autorais reservados a Gabriel Guimarães Azzuz Athayde de Souza. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

End. Eletr.: gabriel.azzuz@eac.ufsm.br

**Gabriel Guimarães Azzuz Athayde de Souza**

**DESENVOLVIMENTO DE UM ESCÂNER AUTOMATIZADO PARA MEDIÇÃO SEQUENCIAL E CARACTERIZAÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DE MATERIAIS ACÚSTICOS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração em Conforto ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Civil**.

**Aprovado em 12 de setembro de 2022:**

---

**Eric Brandão Carneiro, Dr. (UFSM) (videoconferência)**  
(Presidente/Orientador)

---

**William D'Andrea Fonseca, Dr. (UFSM) (videoconferência)**  
(Coorientador)

---

**Paulo Henrique Mareze, Dr. (UFSM) (videoconferência)**

---

**Marcio Henrique de Avelar Gomes, Dr. (UTFPR) (videoconferência)**

Santa Maria, RS  
2022

## RESUMO

### DESENVOLVIMENTO DE UM ESCÂNER AUTOMATIZADO PARA MEDIÇÃO SEQUENCIAL E CARACTERIZAÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DE MATERIAIS ACÚSTICOS

AUTOR: Gabriel Guimarães Azzuz Athayde de Souza

ORIENTADOR: Eric Brandão Carneiro

COORIENTADOR: William D'Andrea Fonseca

Esta dissertação apresenta o desenvolvimento de um escâner automatizado para a tomada sequencial de medições de resposta ao impulso, a ser usado na caracterização espaço-temporal de materiais usados no tratamento acústico. O sistema usa o mesmo tipo de tecnologia de impressoras 3D, com uma base que move um sensor acústico nos eixos  $x$ ,  $y$  e  $z$ . A movimentação do sensor é feita por motores de passo, controlados por um processador Arduino. Assim, um conjunto de  $M$  respostas ao impulso, distribuídas no espaço, são medidas sequencialmente com o arranjo configurado. Com as  $M$  respostas ao impulso coletadas, é possível mapear a informação espaço-temporal do campo sonoro em uma série de  $L$  ondas planas, utilizando a solução de um problema inverso com regularização de Tikhonov. O sistema desenvolvido é flexível, de forma que diversos experimentos podem ser executados com exatidão. Como demonstração, a bancada é utilizada na medição *in situ* da impedância acústica. De posse das amplitudes complexas das  $L$  ondas planas, pode-se reconstruir o campo acústico nas imediações do arranjo utilizado, o que permite a reconstrução da impedância de superfície do material sob teste.

**Palavras-chave:** medição de impedância, escaneamento do campo acústico, arranjo de microfones, decomposição em ondas planas

## ABSTRACT

### THE DEVELOPMENT OF AN AUTOMATED SCANNER FOR THE SEQUENTIAL MEASUREMENT AND SPATIO-TEMPORAL CHARACTERIZATION OF ACOUSTICAL MATERIALS

AUTHOR: Gabriel Guimarães Azzuz Athayde de Souza

ADVISOR: Eric Brandão Carneiro

CO-ADVISOR: William D'Andrea Fonseca

This thesis presents the development of an automated scanner for measuring sequential impulsive responses, to be applied on the spatio-temporal characterization of materials, used in acoustic treatment. The system uses the same type of technology as 3D printers, with a base that moves an acoustic sensor along the  $x$ ,  $y$ , and  $z$ -axis. The sensor displacement is accomplished with stepper motors, controlled by an Arduino processor. Thus, a set of  $\mathfrak{M}$  impulse responses are measured sequentially with a configured array. With the  $\mathfrak{M}$  spatially-distributed impulsive responses collected, it is possible to map the spatial information in the sound field to a set of  $\mathcal{L}$  plane waves, by solving the inverse problem with Tikhonov regularization. The built system is flexible, and different experiments can be executed accurately. This study focuses on the *in situ* impedance measurement. Once one computes the complex amplitudes of the  $\mathcal{L}$  plane waves, the sound field can be reconstructed in the vicinity of the array, which allows the estimation of the surface impedance of a sound absorber.

**Keywords:** impedance measurement; sound field scanning; array of microphones; plane-wave decomposition

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 2.1 – Ilustração do janelamento temporal da RI. ....   | 15 |
| Figura 2.2 – Cenário hipotético de um arranjo regular captando o som emitido por uma fonte sonora. ....   | 16 |
| Figura 2.3 – Direções dos componentes de ondas planas que formam o espectro do número de onda e domínio espacial em segundo plano. ....   | 17 |
| Figura 2.4 – Critério da curva L. ....  | 21 |
| Figura 3.1 – Peças e acessórios do tipo <i>V-slot</i> . ....  | 22 |
| Figura 3.2 – Conexões do sistema eletrônico do escâner. ....  | 23 |
| Figura 3.3 – Gabinetes do sistema eletrônico do escâner. ....   | 24 |
| Figura 3.4 – Conexões do sistema eletroacústico. ....   | 25 |
| Figura 3.5 – Arranjo <i>Double Planar Array</i> e suas variáveis. ....  | 26 |
| Figura 3.6 – Mudança do arranjo na análise de $\tilde{Z}_s$ e de $\alpha$ . ....  | 28 |
| Figura 3.7 – Mudanças do arranjo para analisar a influência de seu tamanho. ....  | 28 |
| Figura 3.8 – Arranjos utilizados na análise da influência de sua resolução espacial. ..   | 29 |
| Figura 3.9 – Arranjos utilizados na análise da influência de sua resolução espacial. ..   | 29 |
| Figura 3.10 – Arranjos utilizados na análise dos efeitos de seu formato. ....   | 30 |
| Figura 3.11 – Posições da fonte sonora que foram medidas. ....  | 30 |
| Figura 3.12 – Amostras medidas. ....  | 31 |
| Figura 3.13 – Coeficientes de absorção: $\alpha_{imp}$ e $\alpha_{Miki}$ , ambas na cor azul, correspondem à melamina e foram obtidos, respectivamente, com o ensaio no tubo de impedância e pela estimativa em função da resistividade ao fluxo medido. $\alpha_{Sonex}$ , apresentado na cor vermelha corresponde ao coef. de absorção medido de acordo com a ISO 354. .... | 32 |
| Figura 3.14 – Janela temporal aplicada às respostas impulsivas. ....  | 33 |
| Figura 3.15 – Pontos onde são reconstruídas as pressões e velocidades de partícula. ....  | 35 |
| Figura 3.16 – Espectro $\tilde{P}(k)$ para $f = 500$ Hz. ....   | 36 |
| Figura 3.17 – Espectro $\tilde{P}(\theta, \phi)$ de $\tilde{P}(\mathbf{k})$ apresentado na Figura 3.16. ....  | 36 |
| Figura 4.1 – Resultado final da construção do protótipo. ....   | 37 |
| Figura 4.2 – Principais dimensões do tripé eletrônico. A principais dimensões, $D_x$ , $D_y$ , $D_z$ , correspondem às indicadas em vermelho, enquanto as demais dimensões são as que estão em azul. ....   | 38 |
| Figura 4.3 – Atuador linear. ....   | 39 |
| Figura 4.4 – Projeto final de escâner (esquerda) e o esquema de deslocamento nos três eixos. ....   | 39 |
| Figura 4.5 – Desenho digital do protótipo. ....   | 40 |
| Figura 4.6 – O ensaio começa depois de centralizar o microfone e extrair sua altura $z_0$ . ....  | 40 |
| Figura 4.7 – Fluxograma da lógica da primeira fase do ensaio com o escâner. ....  | 41 |
| Figura 4.8 – Cenário hipotético no qual o escâner desloca um microfone do ponto $\mathbf{r}_n$ ao ponto $\mathbf{r}_{n+1}$ . ....   | 42 |
| Figura 4.9 – Fluxograma da lógica da segunda fase do ensaio com o escâner. ....   | 42 |
| Figura 4.10 – Cenários referentes à averiguação do deslocamento (do eixo X). ....   | 43 |
| Figura 4.11 – Flutuações em $Z_s$ e em $\alpha_{rec}$ devidos à variação de $\tau_{up}$ . ....  | 44 |
| Figura 4.12 – Flutuações em $Z_s$ e em $\alpha_{rec}$ devidos à variação de $\tau_{down}$ . ....  | 44 |
| Figura 4.13 – Flutuações em $Z_s$ e em $\alpha_{rec}$ devidos à variação de $l_{w_3}$ . ....  | 45 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 4.14 – Flutuações em $Z_s$ e em $\alpha_{rec}$ em função do método de cálculo da magnitude dos componentes $\tilde{P}(\mathbf{k})$ .   | 45 |
| Figura 4.15 – Espectros $\tilde{P}(\theta, \phi)$ ( <b>Sonex</b> ). Figs. (a)-(c): DPA $36 \times 60 \text{ cm}^2$ ; (d)-(f): DPA $36 \times 44 \text{ cm}^2$ .   | 46 |
| Figura 4.16 – Espectros $\tilde{P}(\theta, \phi)$ ( <b>Melamina</b> ). Figs. (a)-(c): DPA $36 \times 60 \text{ cm}^2$ ; (d)-(f): DPA $36 \times 44 \text{ cm}^2$ .  | 47 |
| Figura 4.17 – Espectros $\tilde{P}(\theta, \phi)$ ( <b>Sonex</b> ), para $f = 4.000 \text{ Hz}$ , a medida que o DPA tem seu tamanho reduzido.  | 47 |
| Figura 4.18 – Espectros $\tilde{P}(\theta, \phi)$ ( <b>Sonex</b> ) para incidência oblíqua de 45 graus.   | 48 |
| Figura 4.19 – Impedância $Z_s$ e coef. de absorção $\alpha_{rec}$ , da placa <b>Sonex</b> , obtidas com os arranjos (DPA) de $36 \times 60 \text{ cm}^2$ e de $36 \times 44 \text{ cm}^2$ .                     | 49 |
| Figura 4.20 – Impedância $Z_s$ e coef. de absorção $\alpha_{rec}$ da <b>melamina</b> , obtidas com os arranjos (DPA) de $36 \times 60 \text{ cm}^2$ e de $36 \times 44 \text{ cm}^2$ .                          | 49 |
| Figura 4.21 – Impedância $Z_s$ e coef. de absorção $\alpha_{rec}$ da placa <b>Sonex</b> , obtidas com os arranjos (DPA) de $36 \times 60 \text{ cm}^2$ , para incidência normal (0 graus) e oblíqua (45 graus). | 50 |
| Figura 4.22 – Comparação entre as impedâncias e os coeficientes de absorção, da melamina, obtidas neste trabalho, pelo ensaio no tubo de impedância além da estimativa empírica pelo modelo de Miki.            | 50 |
| Figura 4.23 – Impedância $Z_s$ e coef. de absorção $\alpha_{rec}$ , da placa <b>Sonex</b> , obtidos na redução do tamanho do arranjo.   | 51 |
| Figura 4.24 – Impedância $Z_s$ e coef. de absorção $\alpha_{rec}$ da <b>melamina</b> , obtidos na redução do tamanho do arranjo.  | 52 |
| Figura 4.25 – Impedância $Z_s$ e coef. de absorção $\alpha_{rec}$ da placa <b>Sonex</b> , obtidos na redução do da resolução espacial do arranjo.   | 53 |
| Figura 4.26 – Impedância $Z_s$ e coef. de absorção $\alpha_{rec}$ da <b>melamina</b> , obtidos na redução do da resolução espacial do arranjo.  | 53 |
| Figura 4.27 – Impedância $Z_s$ e coef. de absorção $\alpha_{rec}$ da amostra <b>Sonex</b> obtidos a partir do DPA de $28 \times 32 \text{ cm}^2$ e do arranjo de pontos randômicos.                             | 54 |
| Figura A.1 – Imagens ampliadas de algumas partes do escâner.  | 60 |
| Figura A.2 – Fotos tiradas do escâner logo depois que foi montado pela primeira vez.  | 60 |
| Figura A.3 – Foto do estado atual do escâner.   | 61 |
| Figura B.1 – Espectros $\tilde{P}(\mathbf{k})$ ( <b>Sonex</b> ). Figs. (a)-(c): DPA $36 \times 60 \text{ cm}^2$ ; (d)-(f): DPA $36 \times 44 \text{ cm}^2$ .  | 62 |
| Figura B.2 – Espectros $\tilde{P}(\mathbf{k})$ ( <b>Melamina</b> ). Figs. (a)-(c): DPA $36 \times 60 \text{ cm}^2$ ; (d)-(f): DPA $36 \times 44 \text{ cm}^2$ .   | 63 |
| Figura B.3 – Espectros $\tilde{P}(\mathbf{k})$ ( <b>Sonex</b> ) para incidência oblíqua ( $45^\circ$ ) no DPA de $36 \times 60 \text{ cm}^2$ .  | 63 |

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela 3.1 – Módulo - aquisição.....  | 25 |
| Tabela 3.2 – Módulo - geração.....  | 25 |
| Tabela 3.3 – Configurações dos sinal de excitação utilizado nos ensaios. ....       | 26 |
| Tabela 3.4 – Configurações dos arranjos utilizados nos ensaios deste trabalho. .... | 27 |
| Tabela 3.5 – Parâmetros de configuração da janela temporal.....                     | 34 |
| Tabela 3.6 – Métodos de cálculo dos coeficientes espectrais.....                    | 35 |
| Tabela 4.1 – Valores das dimensões do protótipo indicadas na Figura 4.2. ....       | 38 |
| Tabela 4.2 – Componentes do protótipo.....  | 40 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|         |   |
|---------|---|
| A1, A2  | Par de atuadores lineares paralelos que deslocam suas respectivas cargas ao longo do eixo x |
| A3      | atuador linear que desloca sua carga ao longo do eixo y                                     |
| A4      | atuador linear que desloca sua carga ao longo do eixo z                                     |
| B&K     | Brüel & Kjær  |
| CNC     | Comando Numérico Computadorizado  |
| DPA     | <i>Double Planar Array</i>  |
| FFT     | Do inglês <i>Fast Fourier Transform</i>   |
| MDF     | Do inglês <i>medium density fiberboard</i>  |
| NEMA    | Do inglês <i>National Electrical Manufacturers Association</i> .                            |
| NI      | National Instruments  |
| NI-cDAQ | Do inglês National Instruments Compact Data Acquisition                                     |
| RI      | Resposta Impulsiva  |
| TR      | Tempo de Reverberação   |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|                       |   |
|-----------------------|---|
| $\alpha$              | Coeficiente de absorção   |
| $\alpha_{\text{rec}}$ | Coeficiente de absorção reconstruído  |
| $c$                   | Velocidade do som em $\text{m.s}^{-1}$  |
| $d_z$                 | Distância entre os planos de pontos que formam o DPA  |
| $D_{x, y, z}$         | Maiores dimensões do protótipo, apontadas na Figura 4.2   |
| $e$                   | número de Euler   |
| $f$                   | Frequência em Hz  |
| $h_{x, z}$            | Alturas características do protótipo, apontadas na Figura 4.2                                   |
| $\mathbf{H}$          | Matriz de sensibilidade com as funções de ondas planas propagantes                              |
| $\tilde{H}(f)$        | Espectro da resposta impulsiva  |
| $j$                   | Número complexo $j = \sqrt{-1}$   |
| $k_0$                 | Magnitude do número de onda no ar   |
| $\lambda_t$           | Parâmetro de regularização  |
| $d$                   | distância entre os pontos $\mathbf{r}_n - \mathbf{r}_{n-1}$ do cenário hipotético da Figura 4.8 |
| $\mathbf{k}_i$        | Vetor do componente $i$ de onda plana   |
| $l_{x, c, p}$         | Dimensões específicas de algumas partes do protótipo que estão apontadas na Figura 4.2          |
| $l_{w_3}$             | Intervalo de duração da parte descendente da janela Adrienne                                    |
| $\mathcal{L}$         | Número de componentes de ondas planas do espectro angular                                       |
| $L_x \times L_y$      | Dimensões por $x$ e $y$ (cm) do arranjo   |
| $\mathfrak{M}$        | Numero total de pontos de gravação  |
| $\mathbf{n}$          | Efeitos do ruído e das inconsistências matemáticas  |
| $n_{x, y}$            | Número de pontos ao longo de $x$ e $y$ , respectivamente  |
| $N(d)$                | Número de micro-passos em função da distância   |
| $\theta$              | Ângulo de elevação (em relação ao material)   |
| $\phi$                | Ângulo de azimute (em relação ao material)  |
| $\rho$                | Densidade do ar em $\text{kg.m}^3$  |
| $\tilde{\mathbf{p}}$  | Vetor com as pressões dos pontos do arranjo   |

|                           |  |
|---------------------------|--|
| $\tilde{\mathbf{p}}_{re}$ | Vetor com as pressões reconstruídas  |
| $\mathbf{r}_i$            | Vetor do ponto $i$ de gravação   |
| $\mathbf{r}_0$            | Vetor do ponto inicial centralizado no material  |
| $t_{start}$               | Instante do início da janela temporal Adrienne   |
| $\tau_{up}$               | Número adimensional, $0 \leq \tau_{up} \leq 1$ que, multiplicado por $t_d$ , resulta no instante do início da região linear da janela Adrienne |
| $\tau_{down}$             | Número adimensional, $1 \leq \tau_{down}$ que, multiplicado por $t_d$ , resulta no instante do término da região linear da janela Adrienne     |
| $\tilde{\mathbf{u}}$      | Relação de Euler da velocidade de partícula  |
| $\tilde{\mathbf{u}}_{re}$ | Vetor com as velocidades de partícula calculadas para todos os pontos  |
| $\tilde{u}_n$             | Componente normal da velocidade de partícula   |
| $w(t)$                    | Amplitude (adimensional) da janela temporal em função do tempo   |
| $\omega$                  | Frequência angular, i.e. $\omega = 2\pi f$   |
| $x$                       | Eixo $x$   |
| $\tilde{\mathbf{x}}$      | Vetor com as magnitudes dos componentes de ondas planas  |
| $\tilde{\mathbf{X}}(f)$   | Espectro da sinal de excitação   |
| $y$                       | Eixo $y$   |
| $\tilde{\mathbf{Y}}(f)$   | Espectro do sinal gravado  |
| $z$                       | Eixo $z$   |
| $z_r$                     | Altura do plano inferior do arranjo DPA em relação à superfície do material  |
| $Z_s$                     | Impedância de superfície   |
| $\bar{Z}_s$               | Média espacial da impedância de superfície   |
| $z_0$                     | Altura do microfone em relação ao material   |

## SUMÁRIO

|         |  |    |
|---------|--|----|
| 1       | <b>INTRODUÇÃO</b> .....  | 12 |
| 2       | <b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....   | 15 |
| 2.0.1   | <b>Espectro de número de onda (ou angular)</b> .....                         | 16 |
| 2.0.2   | <b>Regularização de Tikhonov e métodos iterativos</b> .....                  | 18 |
| 2.0.2.1 | <i>Critério da curva-L</i> .....   | 20 |
| 3       | <b>METODOLOGIA</b> .....   | 22 |
| 3.1     | <b>CONFECÇÃO DO PROTÓTIPO DE ESCANEAMENTO ACÚSTICO</b> .....                 | 22 |
| 3.1.1   | <b>Sistema eletrônico</b> .....  | 22 |
| 3.2     | <b>INSTRUMENTAÇÃO</b> .....  | 24 |
| 3.2.1   | <b>Geração e aquisição dos sinais sonoros</b> .....                          | 25 |
| 3.3     | <b>ROTINAS EXPERIMENTAIS</b> .....   | 26 |
| 3.3.1   | <b>Materiais analisados</b> .....  | 31 |
| 3.3.2   | <b>Janelamento temporal</b> .....  | 32 |
| 3.3.3   | <b>Decomposição e reconstrução</b> .....                                     | 34 |
| 3.3.3.1 | <i>Espectros do número de onda (ou angulares)</i> .....                      | 35 |
| 4       | <b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....   | 37 |
| 4.1     | <b>CONFECÇÃO DO PROTÓTIPO DE ESCANEAMENTO</b> .....                          | 37 |
| 4.1.1   | <b>Estrutura</b> .....   | 38 |
| 4.1.2   | <b>Funcionamento e validação</b> .....                                       | 40 |
| 4.2     | <b>CONDICIONAMENTO DOS SINAIS</b> .....                                      | 43 |
| 4.3     | <b>ANÁLISES DOS MATERIAIS POROSOS</b> .....                                  | 45 |
| 4.3.1   | <b>Espectros do número de onda (ou angular)</b> .....                        | 45 |
| 4.4     | <b>RECONSTRUÇÃO DE <math>Z_S</math> E DE <math>\alpha_{REC}</math></b> ..... | 48 |
| 4.4.1   | <b>Comparação com resultados obtidos com outras metodologias</b> .....       | 50 |
| 4.4.2   | <b>Variação do tamanho do arranjo</b> .....                                  | 51 |
| 4.4.3   | <b>Variação da resolução espacial do arranjo</b> .....                       | 52 |
| 4.4.4   | <b>Variação do formato do arranjo</b> .....                                  | 54 |
| 5       | <b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....  | 55 |
| 5.1     | <b>DIFICULDADES E TRABALHOS FUTUROS</b> .....                                | 56 |
|         | <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....                                      | 57 |
|         | <b>APÊNDICE A – IMAGENS DO ESCÂNER</b> .....                                 | 60 |
|         | <b>APÊNDICE B – ESPECTROS <math>\tilde{P}(K)</math></b> .....                | 62 |

## 1 INTRODUÇÃO

A caracterização espaço-temporal de cenários acústicos é um tema fundamental na acústica técnica. Tal necessidade se origina no fato de que a equação da onda sonora implica que o campo acústico tem variações temporais e espaciais (BRANDÃO, 2016). As variações temporais de um determinado ponto no espaço podem ser obtidas a partir da medição do campo sonoro com um microfone. Para medir as variações espaciais é necessário tomar medições em uma série de pontos no espaço (i.e., usando um arranjo de microfones). O uso de múltiplos pontos de medição tem inúmeras aplicações em acústica, sendo que uma série de técnicas e algoritmos existem para a caracterização de cenários acústicos. Em geral, pode-se classificar a caracterização espaço-temporal em: (i) técnicas de *beamforming* (FONSECA, 2013; JOHNSON; DUDGEON, 1993; SIJTSMAN, 2004), que são utilizadas para identificar fontes sonoras afastadas do arranjo de microfones; e (ii) técnicas de *holografia do campo próximo* (ou *Nearfield Acoustical Holography*, NAH) (MAYNARD; WILLIAMS; LEE, 1985), utilizadas para analisar o comportamento do campo acústico próximo a uma fonte sonora (ou elemento difrator).

Os métodos baseados em NAH, que são o foco deste trabalho, têm diversas aplicações como: a caracterização da radiação sonora de fontes (HALD, 2009; FERNANDEZ-GRANDE, 2016; ZEA, 2017); a medição da resposta espacial em acústica de salas (NOLAN et al., 2019; GOVER; RYAN; STINSON, 2002; PARK; RAFAELY, 2005); a caracterização *in situ* de absorvedores (TAMURA, 1990; TAMURA; ALLARD; LAFARGE, 1995; RICHARD et al., 2017; NOLAN, 2020; HALD et al., 2018); e a caracterização de fenômenos de difração em amostras finitas e/ou irregulares (KLEINER; GUSTAFSSON; BACKMAN, 1995; RICHARD et al., 2019; BRANDÃO; FERNANDEZ-GRANDE, 2022). Diversos tipos de processamentos matemáticos existem para essas aplicações. Neste trabalho, as gravações de diversos microfones no domínio espacial serão mapeadas para o domínio do número de onda (NOLAN et al., 2019).

Maynard *et al.* (MAYNARD; WILLIAMS; LEE, 1985) aponta que as técnicas de NAH têm muito potencial, pois são capazes de extrapolar as medições e calcular dados como: pressão, velocidade de partícula e intensidade sonora no campo próximo de uma fonte ou aparato (em pontos diferentes dos medidos). No entanto, o ensaio pode ter alto custo, visto o número de microfones necessários para montar um arranjo. Por exemplo, as análises holográficas investigadas por Hald *et al.* (HALD et al., 2018) utilizaram um arranjo com 128 microfones. Ottink *et al.* (OTTINK et al., 2015) utilizou 60 microfones fixados em um arranjo retangular que possuía ajuste de altura, que era alterada entre os ensaios para expandir o número de pontos gravados. Considerando que o custo de microfones (capacitivos) de medição de alta precisão e exatidão é elevado, o custo total de um arranjo pode se tornar inviável, mesmo que ele seja formado por poucas dezenas desses microfones. Uma

possível solução, que contorna esse problema, consiste em utilizar um braço robótico que varre os pontos do arranjo de microfones sequencialmente (NOLAN, 2020). Neste caso, o método necessita apenas de um sensor, e tem a vantagem de eliminar os problemas de diferenças de amplitude e fase relativas entre os diversos microfones de um arranjo. Além disso, utilizando apenas um microfone também se minimiza os efeitos da difração sonora que um suporte com dezenas/centenas de microfones pode causar. Por outro lado, esse método eleva consideravelmente o tempo de execução do ensaio, durante o qual o braço robótico monitora as variações de temperatura e umidade para que, se necessário, aplicar as devidas correções.

Este trabalho apresenta uma aplicação e o desenvolvimento de um protótipo de custo reduzido, capaz de varrer o espaço com um microfone e tomar medidas do campo acústico de maneira sequencial. O projeto do protótipo foi concebido considerando alguns detalhes funcionais importantes, como a exatidão do deslocamento e que este seja feito de maneira silenciosa. O projeto foi esboçado em um programa de desenho digital – depois de importar os desenhos 3D das peças e parafusos, eles foram encaixados para formar o protótipo virtual do escâner.

O escâner é controlado por meio de uma interface em *Python* que, por sua vez, trabalha com duas sub-interfaces de programação – uma é responsável pelo controle de seu braço, enquanto a outra sub-interface é encarregada pela execução e gravação dos sinais sonoros. Elas trabalham simultaneamente, considerando que a gravação é feita nos instantes que o braço do escâner estiver parado.

Depois de projetar, construir, programar e validar o protótipo, os ensaios acústicos começaram a ser feitos. Os experimentos focaram, primeiro, na análise de alguns dos parâmetros do janelamento temporal das Respostas Impulsivas (RI), assim como nas diferenças entre os métodos de solução da equação matricial que representa o problema da decomposição em ondas planas. A próxima fase experimental focou na análise das variações da impedância de superfície  $\tilde{Z}_s$  e do coeficiente de absorção  $\alpha_{rec}$  reconstruídos a partir de ensaios que analisaram dois materiais porosos: Uma placa Sonex de  $62,5 \times 62,5 \text{ cm}^2$  e uma de melamina de  $41,0 \times 41,0 \text{ cm}^2$ , sendo que o primeiro também foi analisado com a fonte sonora posicionada a uma elevação de 45 graus em relação ao material. Foram também examinadas as flutuações de  $\tilde{Z}_s$  e de  $\alpha_{rec}$  quando reduz-se o tamanho e a resolução espacial do arranjo. O tamanho do arranjo consiste na área varrida por ele, enquanto sua resolução espacial está relacionada à distância entre os pontos de gravação. Por exemplo, para um arranjo com seu tamanho mantido constante, quanto maior for o número de pontos que formam o arranjo (regular), maior será sua resolução espacial. O método de ensaio explorado neste trabalho não impõe limites ao formato do arranjo, e a seção de resultados finaliza analisando  $\tilde{Z}_s$  e  $\alpha_{rec}$ , da placa Sonex, obtidas com ensaios de dois arranjos de mesmo tamanho,  $28,0 \times 32,0 \times 2,9 \text{ cm}^3$ , dos quais um consiste em um Double Planar

Array (DPA) regular, enquanto o outro é formado por pontos em posições aleatoriamente gerados pelo computador.

Essa sequência de eventos são derivadas dos objetivos deste trabalho. O objetivo principal é apresentar uma bancada experimental automatizada para tomada sequencial de Respostas Impulsivas (RI) de centenas de pontos no espaço que, juntos, formam um arranjo. Além disso, com ensaios medindo um material poroso, mostrar que o protótipo e o restante da bancada está funcionando devidamente. Para cumprir integralmente todos esses pontos, passou-se pelos seguintes objetivos específicos:

1. projetar e construir um braço robótico que seja capaz de deslocar um microfone por coordenadas  $x$ ,  $y$  e  $z$  de maneira precisa e silenciosa;
2. validar o deslocamento pelos eixos. Em outras palavras, verificar se a distância solicitada para deslocar por um dos eixos, efetivamente, desloca o microfone por essa mesma distância;
3. otimizar o algoritmo do sistema do protótipo no que diz respeito à ordem dos pontos de gravação, além de configurar os motores para funcionarem com *fade in / fade out* para induzir menos vibrações ao braço do protótipo;
4. realizar ensaios com dois materiais porosos com superfícies lisas, utilizando arranjos largos e com muitos pontos para analisar, no pós-processamento, efeitos do tamanho e resolução do arranjo;
5. obter espectros do número de onda e resultados de impedância e de absorção coerentes com o cenário ensaiado e com processamento aplicado.

Este trabalho é estruturado da seguinte forma: no Capítulo 2 é apresentado os conceitos teóricos e matemáticos envolvidos no processo da decomposição. No Capítulo 3 apresenta-se a eletrônica necessária para o funcionamento do protótipo, assim como a instrumentação eletroacústica utilizada e, de maneira mais extensa, os detalhes das rotinas experimentais executadas. O Capítulo 4 começa apresentando a estrutura final do protótipo, como ele funciona e como foi validado. Ainda no Capítulo 4 são apresentados e discutidos as influências dos parâmetros do condicionamento e processamento dos sinais gravados e, não menos importante, as influências do tamanho e da resolução espacial do arranjo. No Capítulo 5 são realizadas algumas observações finais a respeito do trabalho.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

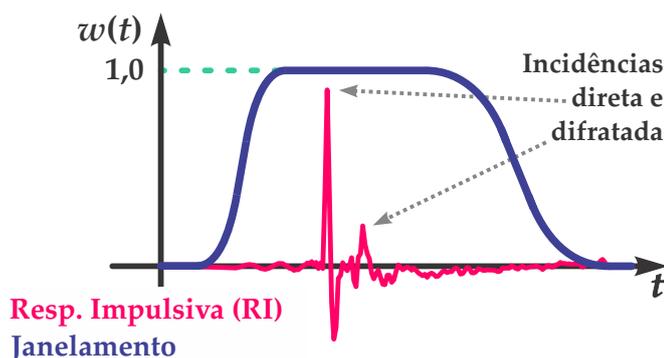
A função do escâner é realizar a tomada sequencial de medições de *respostas ao impulso* (RI), alterando a posição do microfone em função de uma lista de coordenadas pré-configuradas. O espectro  $\tilde{H}(f)$  da resposta impulsiva de um ponto do espaço é calculada com a divisão espectral do sinal gravado,  $\tilde{Y}(f)$ , pelo sinal de excitação utilizado,  $\tilde{X}(f)$ , (deconvolução) da seguinte forma,

$$\tilde{H}(f) = \frac{\tilde{Y}(f)}{\tilde{X}(f)}, \quad (2.1)$$

e a função temporal da RI,  $h(t)$ , é obtida com o cálculo da Transformada Inversa de Fourier de  $\tilde{H}(f)$ . Ainda, lembrando que no domínio discreto ( $x[n]$ ,  $y[n]$  e  $h[n]$ ), para a estimativa da Equação (2.1) os vetores são condicionados para evitar *aliasing*.

A RI de cada ponto é medida com o apoio do pacote (em Python) Pytta (FONSECA et al., 2019). As RIs medidas *in situ* carregam a informação desejada da onda incidente e da onda difratada na superfície da amostra sob teste (BRANDÃO; FERNANDEZ-GRANDE, 2022). Além disso, as RIs possuem também a informação da reverberação do ambiente onde são medidas. Com isso, uma janela temporal Adrienne (GARAI; GUIDORZI, 2000) é aplicada para isolar os registros da incidência direta e da onda difratada pelo material da reverberação do recinto. No trabalho original (GARAI; GUIDORZI, 2000), o início ascendente e o fim descendente (da janela) representam metade de uma janela Blackman-Harris. Contudo, este trabalho utilizou as metades de uma janela *Hann* no lugar, e um exemplo ilustrativo de sua aplicação está apresentada na Figura 2.1. Para a duração da seção em que  $w(t) = 1,0$  é levado em conta o tempo de chegada do som direto (distância entre fonte e microfone). Assim, se a fonte encontrar-se suficientemente distante de outros aparatos refletores presentes na sala, é possível isolar os fenômenos desejados da reverberação do recinto. Mais detalhes a respeito dos parâmetros envolvidos na geração da janela temporal serão discutidos no Capítulo 3.

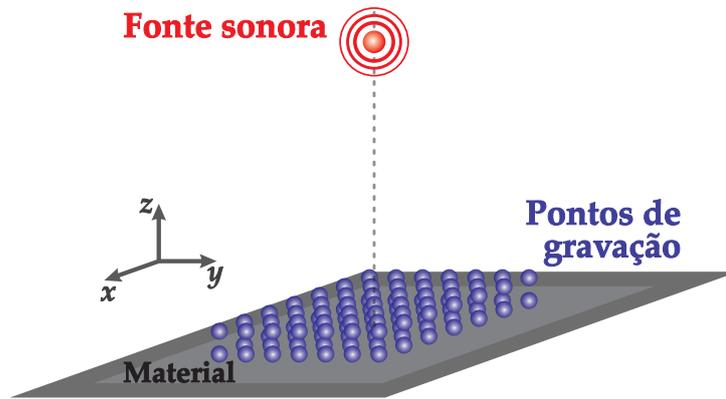
Figura 2.1 – Ilustração do janelamento temporal da RI.



### 2.0.1 Espectro de número de onda (ou angular)

O espectro do número de onda é estimado a partir dos os espectros das RIs janeladas, coletadas pelo arranjo de microfones. O procedimento de cálculo segue o proposto por Nolan *et al.* (NOLAN et al., 2019). Considere o cenário de medição apresentado na Figura 2.2, que mostra  $\mathfrak{M}$  pontos de leitura de pressão sonora. Tais pontos representam um arranjo de microfones, em que cada sensor tem coordenada  $\mathbf{r}_m$ .

Figura 2.2 – Cenário hipotético de um arranjo regular captando o som emitido por uma fonte sonora.



A decomposição do campo acústico consiste em projetar os dados medidos nas  $\mathfrak{M}$  posições varridas em uma base formada por  $\mathcal{L}$  ondas planas propagantes. A equação matricial representando este problema é dada por

$$\tilde{\mathbf{p}} = \mathbf{H} \mathbf{x} + \mathbf{n}, \quad (2.2)$$

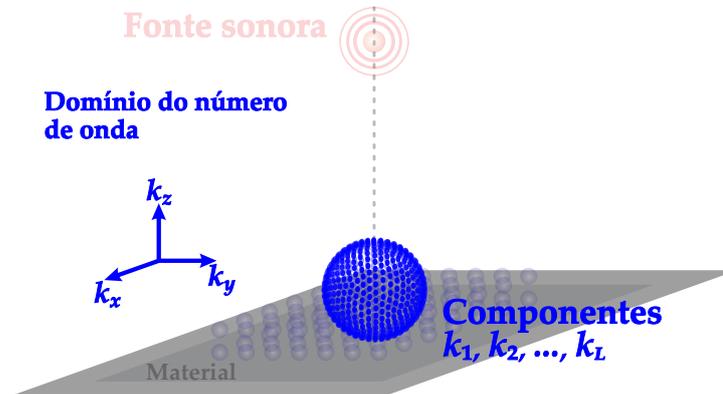
na qual  $\tilde{\mathbf{p}} \in \mathbb{C}^{\mathfrak{M}}$  contém as pressões sonoras capturadas pelas  $\mathfrak{M}$  posições (de microfone) para uma dada frequência; e  $\mathbf{x} \in \mathbb{C}^{\mathcal{L}}$  representa as amplitudes complexas das  $\mathcal{L}$  ondas planas, enquanto  $\mathbf{n}$  representa os efeitos do ruído e das inconsistências do modelo matemático (HALD, 2009; RICHARD et al., 2017; NOLAN, 2020). A matriz de sensibilidade  $\mathbf{H} \in \mathbb{C}^{\mathfrak{M} \times \mathcal{L}}$  é dada por

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} e^{-j \mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{r}_1} & e^{-j \mathbf{k}_2 \cdot \mathbf{r}_1} & \dots & e^{-j \mathbf{k}_{\mathcal{L}} \cdot \mathbf{r}_1} \\ e^{-j \mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{r}_2} & e^{-j \mathbf{k}_2 \cdot \mathbf{r}_2} & \dots & e^{-j \mathbf{k}_{\mathcal{L}} \cdot \mathbf{r}_2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ e^{-j \mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{r}_{\mathfrak{M}}} & e^{-j \mathbf{k}_2 \cdot \mathbf{r}_{\mathfrak{M}}} & \dots & e^{-j \mathbf{k}_{\mathcal{L}} \cdot \mathbf{r}_{\mathfrak{M}}} \end{bmatrix}, \quad (2.3)$$

na qual se considera a convenção temporal  $e^{j\omega t}$ , omitida no restante do texto. Cada linha de  $\mathbf{H}$  contém  $\mathcal{L}$  ondas planas propagantes, que incidem no  $m$ -ésimo receptor. Os vetores de número de onda  $\{\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2, \dots, \mathbf{k}_{\mathcal{L}}\}$  representam as direções de propagação das ondas planas contidas no modelo. A Figura 2.3 mostra que estas direções são distribuídas de

maneira equiangular na superfície de uma esfera (NOLAN et al., 2019). Note que o domínio espacial também é mostrado na figura, mas em segundo plano, e apenas para mostrar a relação do domínio  $k$  com o domínio espacial.

Figura 2.3 – Direções dos componentes de ondas planas que formam o espectro do número de onda e domínio espacial em segundo plano.



Ondas evanescentes não são consideradas neste modelo e  $\mathbf{k}_\ell = (k_x, k_y, k_z)$ , com

$$k_0 = \omega/c = \sqrt{k_x^2 + k_y^2 + k_z^2}, \quad (2.4)$$

sendo a magnitude do número de onda no ar,  $\omega$  é a frequência angular e  $c$  é a velocidade do som.

É comum que  $\mathcal{L} \gg \mathfrak{M}$ , o que faz a Equação (2.2) tornar-se um problema sub-determinado. Uma solução estável pode ser obtida usando regularização de Tikhonov (RICHARD et al., 2017; NOLAN et al., 2019), expressa por

$$\tilde{\mathbf{x}} = \underset{\mathbf{x}}{\operatorname{argmin}} \left( \|\mathbf{H}\mathbf{x} - \tilde{\mathbf{p}}\|_2^2 + \lambda_t^2 \|\mathbf{x}\|_2^2 \right), \quad (2.5)$$

na qual as amplitudes complexas estimadas das  $\mathcal{L}$  ondas planas é  $\tilde{\mathbf{x}}$  e  $\lambda_t > 0$  representa o parâmetro de regularização que é calculado usando o critério da curva-L (HANSEN, 2010). Ainda neste capítulo, a Seção 2.0.2 irá apresentar mais detalhes a respeito do procedimento de solução dessa natureza de problemas indeterminados. Depois de calculados, os valores de todos os componentes de  $\tilde{\mathbf{x}}$  representam o espectro do número de onda (ou angular)  $\tilde{P}(k)$ , com o qual é possível reconstruir o campo acústico no espaço próximo à amostra escaneada (p. ex.: na superfície de um material fonoabsorvente). A reconstrução da pressão sonora é calculada por (NOLAN et al., 2019)

$$\tilde{\mathbf{p}}_{\text{re}} = \mathbf{H}_{\text{re}} \tilde{\mathbf{x}}, \quad (2.6)$$

sendo que  $\tilde{\mathbf{p}}_{\text{re}} \in \mathbb{C}^{\mathfrak{M}}$  representa as pressões complexas estimadas em  $K$  pontos de reconstrução, enquanto  $\mathbf{H}_{\text{re}} \in \mathbb{C}^{\mathfrak{M} \times \mathcal{L}}$  é a matriz de reconstrução, que contém as funções

de ondas planas avaliadas nos  $K$  pontos. A velocidade de partícula pode ser calculada a partir da equação de Euler,  $\mathbf{u} = -\nabla p / (j k \rho c)$ , o que leva à relação dada por

$$\tilde{\mathbf{u}}_{\text{re}} = \frac{-1}{j k \rho c} \nabla \mathbf{H}_{\text{re}} \tilde{\mathbf{x}}, \quad (2.7)$$

em que  $\nabla \mathbf{H}_{\text{re}} \in \mathbb{C}^{m \times \mathcal{L}}$  contém o gradiente da matriz de reconstrução, e  $\rho$  é a densidade do ar. Para a medição *in situ* de impedância de superfície, a reconstrução da pressão sonora e da componente normal da velocidade de partícula é feita em um ponto,  $\mathbf{r}_s$ , ou múltiplos pontos na superfície do material. Com isso, a impedância de superfície reconstruída pode ser estimada por

$$\tilde{Z}_s(\mathbf{r}_s) = -\frac{1}{\rho c} \frac{\tilde{p}(\mathbf{r}_s)}{\tilde{u}_n(\mathbf{r}_s)}, \quad (2.8)$$

com  $\tilde{p}(\mathbf{r}_s)$  e  $\tilde{u}_n(\mathbf{r}_s)$  calculados pelas Equações (2.6) e (2.7), respectivamente. O coeficiente de absorção,  $\alpha$ , é dado por

$$\alpha = 1 - \left| \frac{\bar{Z}_s \cos(\theta) - 1}{\bar{Z}_s \cos(\theta) + 1} \right|^2, \quad (2.9)$$

no qual  $\theta$  é o ângulo de incidência e  $\bar{Z}_s$  é a impedância reconstruída no ponto  $\mathbf{r}_s$ , ou, a média espacial da impedância  $\tilde{Z}_s$  dos  $K$  pontos de reconstrução. A aplicação da média espacial tem por objetivo a minimização dos efeitos dos erros presentes no processo de reconstrução. Usualmente, a malha de pontos de reconstrução possui um tamanho suficientemente pequeno para que não haja grandes variações espaciais de  $\tilde{Z}_s$ , de acordo com a faixa de frequência considerada (RICHARD et al., 2017).

## 2.0.2 Regularização de Tikhonov e métodos iterativos

Problemas inversos podem ser classificados entre bem-postos ou mau-postos – para os problemas bem-postos, a solução existente deve ser única e ter uma dependência contínua com os dados de entrada (VELHO, 2001). Como a decomposição sonora consiste de um problema matemático discreto, finito e indeterminado, o sistema de equações dadas por  $\mathbf{x} = \mathbf{H}^{-1} \cdot \mathbf{p}$  é considerado mau-posto. Esse é o motivo da necessidade de se recorrer aos métodos de regularização com ou sem um algoritmo iterativo.

Para solucionar o problema dado por  $\mathbf{x} = \mathbf{H}^{-1} \cdot \mathbf{p}$ , primeiro é necessário analisar o "posto" (ou *rank*) da matriz, que basicamente indica as dificuldades associadas ao seu condicionamento. Esse conceito está ligado ao número de colunas de  $\mathbf{H}$  que são linearmente independentes. Uma ferramenta poderosa para fazer tal análise é a Decomposição em Valores singulares (do inglês *Singular Value Decomposition* (SVD)). Esse processo consiste

na fatoração de  $\mathbf{H}$  da seguinte forma,

$$\mathbf{H} = \mathbf{U} \Sigma \mathbf{V}^T = \sum_{i=1}^{\text{rank}(\mathbf{H})} u_i \sigma_i v_i^T, \quad (2.10)$$

no qual  $\mathbf{U} = (u_1, u_2, \dots, u_n) \in \mathbb{R}^{m \times \xi}$  e  $\mathbf{V} = (v_1, v_2, \dots, v_n) \in \mathbb{R}^{\xi \times \xi}$  são matrizes com colunas ortonormais, i.e.  $\mathbf{U}^T \mathbf{U} = \mathbf{V}^T \mathbf{V} = \mathbf{I}_\xi$ , e a matriz diagonal  $\Sigma = \text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_\xi)$  possui elementos diagonais positivos dispostos em ordem decrescente, ou seja,

$$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_{\text{rank}(\mathbf{H})} \geq 0. \quad (2.11)$$

O número de valores singulares  $\sigma_\xi$  não-nulos equivale ao número de colunas linearmente independentes de  $\mathbf{H}$ . Utilizando as propriedades ortonormais das matrizes unitárias  $\mathbf{U}$  e  $\mathbf{V}$ , a estimativa por quadrados-mínimos dos elementos de  $\tilde{\mathbf{x}}$  são calculadas por,

$$\tilde{\mathbf{x}} = \mathbf{V} \Sigma^{-1} \mathbf{U}^H \mathbf{p} = \sum_{i=1}^{\text{rank}(\mathbf{H})} \frac{\mathbf{u}_i^H \mathbf{p}}{\sigma_i} \mathbf{v}_i, \quad (2.12)$$

no qual a matriz  $\Sigma^{-1}$  é a inversa da matriz  $\Sigma$  e é dado por,

$$\Sigma^{-1} = \begin{bmatrix} 1/\sigma_1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1/\sigma_2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1/\sigma_3 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/\sigma_{\text{rank}(\mathbf{H})} \end{bmatrix}. \quad (2.13)$$

A sensibilidade de  $\tilde{\mathbf{x}}$  às perturbações na entrada do sistema ( $\mathbf{p}$ )  medida pelo número de condicionamento da matriz  $\mathbf{H}$ , i.e.,  $\text{cond}(\mathbf{H}) = \sigma_1/\sigma_{\text{rank}(\mathbf{H})}$ . Sistemas lineares indeterminados geralmente envolvem valores singulares de várias ordens de magnitude, o que faz de  $\mathbf{H}$  uma matrix mal-condicionada. Por isso que, nestes casos,  necessário a inserção de algum filtro ou parâmetro regulador que atue nos valores singulares (SCHUH-MACHER et al., 2003) que causam deficiências no *rank* de  $\mathbf{H}$ .

Essas diferentes ordens de magnitude dos valores singulares ocorrem não apenas por causa indeterminabilidade do sistema linear de equações, como também devido à influência de ruído no sistema, este representado pela matriz  $\mathbf{n}$  na Equação 2.2. Devido  isso, uma solução mais apropriada  obtida por meio da regularização do problema dado por  $\mathbf{p} = \mathbf{H}\tilde{\mathbf{x}} + \mathbf{n}$  que, matematicamente, pode ser escrito como um problema de minimização dado pela Equação 2.14. Esse processo é chamado de regularização de Tikhonov, para o qual este trabalho utilizou o parâmetro regulador  $\lambda_t$  que é calculado pelo critério da curva L e que será explicado adiante ainda nesta seção.

Existem algumas maneiras de resolver a regularização de Tikhonov. A primeira e

mais simples consiste no cálculo da solução analítica (também chamada de direta) resolvendo a seguinte equação matricial para  $\tilde{\mathbf{x}}$ :

$$\tilde{\mathbf{x}} = \mathbf{H}^\# \cdot \mathbf{p}, \quad \text{sendo que } \mathbf{H}^\# = (\mathbf{H}^T \mathbf{H} + \lambda^2 \mathbf{I})^{-1} \mathbf{H}^T, \quad (2.14)$$

sendo que  $\mathbf{H}^T$  denota a matriz transposta de  $\mathbf{H}$ . Essa formulação de Tikhonov estima o valor dos coeficientes de  $\tilde{\mathbf{x}}$  minimizando o resíduo,  $\|\mathbf{H} \cdot \mathbf{x} - \mathbf{p}\|_2^2$ , mas mantendo a norma da solução,  $\|\tilde{\mathbf{x}}\|_2^2$ , sob controle. Note que a solução direta utiliza apenas o parâmetro  $\lambda_t$  para filtrar os valores singulares pequenos que são gerados em decorrência do ruído. Mais detalhes a respeito do desenvolvimento da formulação de Tikhonov podem ser consultadas em seu trabalho original (TIKHONOV, 1963) e no trabalho de Philips (PHILIPS, 1962).

Uma outra maneira de obter a solução para  $\tilde{\mathbf{x}}$  consiste em utilizar o parâmetro  $\lambda_t$  e os valores singulares  $\sigma_i$  para criar um filtro que, quando inserido na solução por quadrados-mínimos (Equação 2.12), a solução para  $\tilde{\mathbf{x}}$  é dada da seguinte forma,

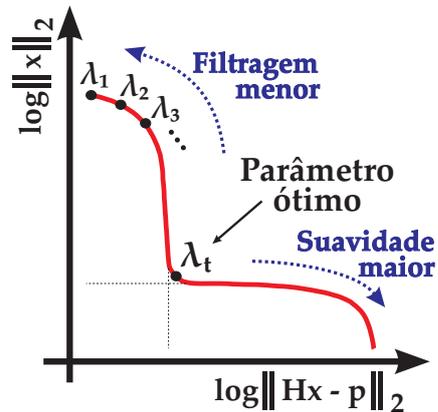
$$\tilde{\mathbf{x}}_{\lambda_t} = \sum_{i=1}^{\text{rank}(\mathbf{H})} f_i \frac{\mathbf{u}_i^H \mathbf{p}}{\sigma_i} \mathbf{v}_i, \quad \text{no qual } f_i = \frac{\sigma_i^2}{\sigma_i^2 + \lambda_t^2}. \quad (2.15)$$

*A priori*, a solução direta (Equação 2.14) tende a ser menos precisa do que a solução por mínimos-quadrados regularizada (Equação 2.15). No entanto, o critério da curva-L calcula os valores para  $\lambda_t$  considerando os valores singulares da decomposição SVD da matriz  $\mathbf{H}$ . Desta maneira, o cálculo de  $\lambda_t$  pelo critério da curva-L eleva a precisão do cálculo independente do método de solução utilizado.

### 2.0.2.1 Critério da curva-L

O critério da "curva L" (HANSEN, 2010) consiste na análise do gráfico *norma da solução vs. resíduo*, no qual é plotado os possíveis valores do parâmetro de regularização  $\lambda_t$ . O comportamento desta curva representa a sensibilidade de  $\lambda_t$  em função do peso das parcelas  $\|\mathbf{H} \cdot \mathbf{x} - \mathbf{p}\|_2^2$  e  $\|\mathbf{x}\|_2^2$ . Tal relação é feita com os logaritmos dessas parcelas, e está apresentada na Figura 2.4.

Figura 2.4 – Critério da curva L.



O critério da curva L tem este nome devido ao formato típico da curva de sensibilidade de  $\lambda_t$ . Na região quase que vertical da curva L, onde  $\|x\|_2^2$  é mais sensível ao valor de  $\lambda_t$ , as soluções são dominadas pelo erro de perturbação. Neste caso, a norma do resíduo aumenta pouco com o aumento de  $\lambda_t$ , enquanto a norma da solução decai abruptamente. Já na região aproximadamente horizontal, a norma da solução cai muito pouco, ao passo que a norma residual  $\|x = H^{-1} \cdot p\|_2^2$  torna-se a parcela mais sensível ao valor de  $\lambda_t$  (HANSEN, 1998; TERRA, 2007). Assim, o valor ótimo de  $\lambda_t$  é encontrado na “quina” da curva.

Os detalhes matemáticos, além das propriedades do critério da curva-L, podem ser consultados na seção 4.6 do livro de Hansen (HANSEN, 1998).

### 3 METODOLOGIA

Este capítulo apresenta a metodologia utilizada neste trabalho para o desenvolvimento do escâner e para a realização dos experimentos mostrados no trabalho.

#### 3.1 CONFECÇÃO DO PROTÓTIPO DE ESCANEAMENTO ACÚSTICO

O escâner desenvolvido usa o mesmo tipo de tecnologia de impressoras 3D e CNC *routers*. Tais equipamentos possuem uma estrutura de peças e perfis de alumínio do tipo *V-slot*, pertencentes a um grupo de ferramentas denominada *Openbuilds*. A Figura 3.1 apresenta alguns exemplos deste tipo de peças.

Figura 3.1 – Peças e acessórios do tipo *V-slot*.



Apesar das impressoras 3D serem populares em boa parte do mundo, estes tipos de peças estruturais não são fáceis de serem encontradas em lojas físicas. A maior parte dos apetrechos envolvidos no projeto foram comprados na Forseti Soluções<sup>1</sup> – a única loja virtual brasileira que, além de ser especializada nesse tipo de material, oferece diversos serviços aplicados aos perfis estruturais *V-slot* como, por exemplo, cortes em tamanho, suportes, inserção de roscas, dentre outros. Uma outra parte das peças foi comprada loja virtual *Openbuilds*<sup>2</sup>.

##### 3.1.1 Sistema eletrônico

O diagrama de conexões do sistema eletrônico do escâner está apresentado na Figura 3.2. A carga de um atuador linear é rosqueada em um fuso trapezoidal, que está

<sup>1</sup><[www.loja.forsetisolucoes.com.br](http://www.loja.forsetisolucoes.com.br)>.

<sup>2</sup><[www.openbuildspartstore.com](http://www.openbuildspartstore.com)>.

acoplada a um *motor de passo* (ver Figura 4.3). Este tipo de motor geralmente emite um baixo ruído em alta frequência. Os Atuadores 1 e 2 (eixo  $x$ ) utilizam o motor NEMA 17<sup>3</sup> com 4,2 Ncm de torque. Já os Atuadores 3 e 4 (eixos  $y$  e  $z$ ) utilizam o motor NEMA 23 com 12,6 Ncm de torque. Todos os quatro motores de passo do escâner possuem a resolução padrão de 1,8°/passo, o que faz uma rotação completa equivaler a 200 passos. Ao rotacionar 200 passos, a carga do atuador é linearmente deslocada por 0,8 cm.

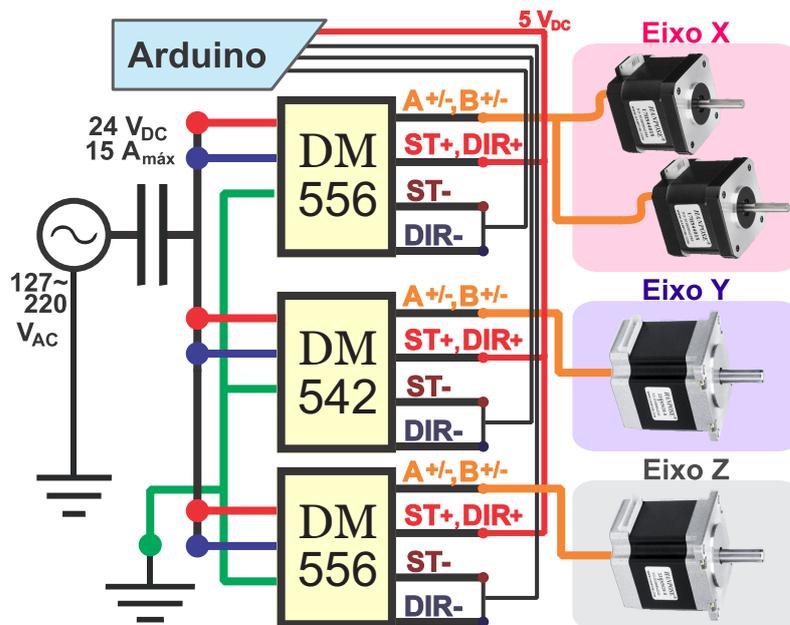


Figura 3.2 – Conexões do sistema eletrônico do escâner.

Motores de passo são energizados por um *driver* de movimento, que também é responsável pela resolução de rotação. O escâner utiliza três *drivers*, que fornecem um valor específico de corrente elétrica em função da posição das três primeiras chaves DIP<sup>4</sup> localizadas na lateral de cada *driver*. No final, o sistema trabalha com um *driver* para cada eixo - um DM542<sup>5</sup> e dois DM556<sup>6</sup>. A única diferença entre esses *drivers* está na corrente máxima fornecida. O par de motores NEMA 17 exige 3,4 A ( $2 \times 1,7$  A) de corrente elétrica, e cada um dos motores NEMA 23 consomem uma corrente de 2,8 A. A quarta chave DIP é mantida na posição *off*, o que faz o *driver* fornecer metade da corrente configurada quando o motor estiver parado, evitando assim superaquecimento dos motores.

Os três *drivers* recebem pulsos elétricos da placa Arduino MEGA 2560 pela entrada PUL-, sendo que um pulso equivale a um passo de rotação<sup>7</sup>. No entanto, as últimas

<sup>3</sup>NEMA significa National Electrical Manufacturers Association, e é a maior associação comercial de fabricantes de equipamentos elétricos dos EUA. Ela define padrões a serem utilizados na indústria, incluindo motores de passo (*step motors*). O número associado, como em NEMA 17, significa que a sua tampa frontal (*frame*) tem uma aresta de 1,7 polegadas ( $\approx 42$  mm), logo, NEMA 23 tem 2,3" ( $\approx 57$  mm).

<sup>4</sup>Dual In-line Package (ou pacote duplo em linha) são interruptores encapsulados de dois estados *on/off*.

<sup>5</sup>*Datasheet*: <<http://tinel.com/uploads/DM542.pdf>>.

<sup>6</sup>*Datasheet*:<[https://cdn.awsli.com.br/945/945993/arquivos/dm556\\_manual.pdf](https://cdn.awsli.com.br/945/945993/arquivos/dm556_manual.pdf)>.

<sup>7</sup>*Datasheet*: <<https://docs.arduino.cc/hardware/mega-2560>>.

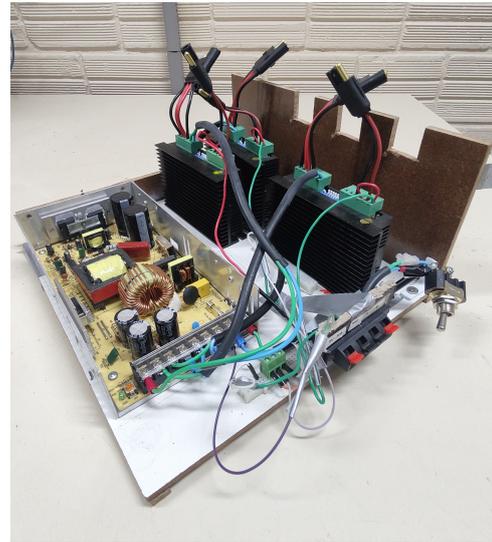
quatro chaves DIP (5–8) do *driver* configuram a resolução do motor, fazendo que o pulso represente um micro-passo, e a posição dessas chaves indicam quantos micro-passos equivalem a uma rotação completa. Os três *drivers* do escâner trabalham com a resolução de 1.600 micro-passos por revolução. O circuito eletrônico apresentado na Figura 3.3a foi montado dentro de uma caixa de papelão duro, o qual tinha sido customizado para evitar o superaquecimento dos equipamentos. De maneira mais recente, esse circuito foi otimizado e fixado numa pequena estrutura de MDF que está apresentada na Figura 3.3b.

Figura 3.3 – Gabinetes do sistema eletrônico do escâner

(a) 1ª versão.



(b) Versão atual.



## 3.2 INSTRUMENTAÇÃO

A Seção 3.1.1 apresentou os equipamentos que possibilitam o uso do escâner. Não menos importante é a interface eletroacústica, que é utilizada para gerar e executar o sinal de excitação pelo alto-falante, ao mesmo tempo que um microfone é utilizado para captar o campo sonoro.

No intuito de garantir que as gravações sejam fidedignas, foram utilizadas placas de geração e de aquisição da *National Instruments*. Os módulos NI 9263<sup>8</sup> (geração) e NI 9234<sup>9</sup> (gravação) foram utilizados de maneira simultânea, por meio do chassi NIcDAQ-9174<sup>10</sup>. Dessa maneira, apenas uma porta USB do computador é usada. Os módulos e o chassi podem ser vistos na Figura 3.4 que apresenta o diagrama de conexão do sistema eletroacústico.

<sup>8</sup>Docs.: <<https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/ni-9263-specs/page/specs.html>>.

<sup>9</sup>Docs.: <<https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/ni-9234-specs/page/overview.html>>.

<sup>10</sup>Docs.: <<https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/cdaq-9174-specs/page/specs.html>>.

Figura 3.4 – Conexões do sistema eletroacústico.



O sinal de excitação utilizado nos ensaios deste trabalho foi o *sweep* logarítmico, o qual é gerado pelo computador, convertido em sinais elétricos pelo módulo de geração e amplificado pelo amplificador da *Brüel & Kjær* 2718<sup>11</sup>, que está conectado à uma pequena caixa acústica que foi projetada e confeccionada pela empresa holandesa *Microflown*. As placas NI trabalham com a frequência de amostragem de 51.200 Hz, além do possuírem 4 canais. Outras informações técnicas dos módulos NI 9234 e 9263 podem ser consultados nas Tabelas 3.1 e 3.2, respectivamente.

Tabela 3.1 – Módulo - aquisição.

| NI 9234           |           |
|-------------------|-----------|
| Freq. amostragem  | 51.200 Hz |
| Resolução         | 24-bit    |
| Tensão de entrada | -5 ~ 5 V  |
| Faixa dinâmica    | 102 dB    |

Tabela 3.2 – Módulo - geração.

| NI 9263          |            |
|------------------|------------|
| Freq. amostragem | 51.200 Hz  |
| Resolução        | 18-bit     |
| Tensão de saída  | -10 ~ 10 V |
| Imped. de saída  | 2 $\Omega$ |

### 3.2.1 Geração e aquisição dos sinais sonoros

As respostas impulsivas obtidas a partir dos ensaios foram obtidas utilizando o *sweep* logarítmico como o sinal de excitação. A Tabela 3.3 aponta os valores dos parâmetros envolvidos na geração do sinal. É importante salientar que, diferente de um ensaio de TR, o objetivo aqui é identificar a incidência direta e difratada pelo material, o que não

<sup>11</sup> *Datasheet*: <<https://www.bksv.com/media/doc/bp1928.pdf>>.

exige utilizar longos *sweeps*, que excitam toda a resposta temporal da câmara reverberante. Durante todos os ensaios, a RI de cada um dos pontos de medição era medida duas vezes, a fim de tomar a média entre as medições.

Tabela 3.3 – Configurações dos sinal de excitação utilizado nos ensaios.

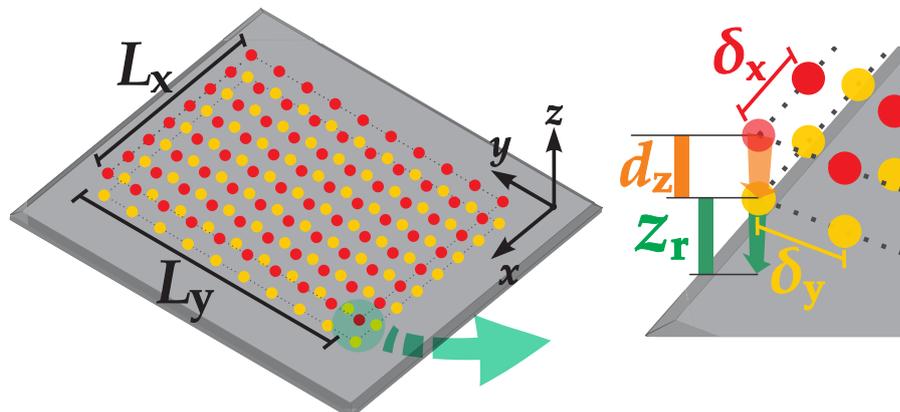
| <b>Sweep logarítmico</b>       |                       |
|--------------------------------|-----------------------|
| Duração                        | 5, 12 s               |
| FFTDegree                      | 18                    |
| Frequência de amostragem $f_s$ | 51.200 Hz             |
| $f_{\min} \sim f_{\max}$       | 1 Hz $\sim$ 25.600 Hz |
| Stop margin                    | 4, 5 s                |

Com o *stop margin* igual a 4,5 s, a varredura senoidal é executada em 0,62 s, o que pode parecer estranho para o leitor. Independente da configuração do arranjo, todos os cenários medidos e discutidos no Capítulo 4 envolveram uma fonte sonora apontada para o centro do material, junto com um microfone que varre pontos próximos à superfície desse. As análises experimentais realizadas para definir o tempo total de duração do *sweep* (FFTdegree), assim como o tempo de duração do silêncio após executada a varredura senoidal/tonal (*stop margin*).

### 3.3 ROTINAS EXPERIMENTAIS

O planejamento e execução das rotinas experimentais exploraram, primordialmente, o uso do arranjo denominado *Double Planar Array* (DPA), o qual consiste na distribuição regular dos pontos de gravação por dois planos paralelos próximos à superfície do material. A Figura 3.5 apresenta o formato e os parâmetros referentes à configuração do arranjo.

Figura 3.5 – Arranjo *Double Planar Array* e suas variáveis.



A Figura 3.5 mostra que os planos do arranjo possuem uma área de  $L_x \times L_y$  cm<sup>2</sup>, e cada um é formado por  $n_x \times n_y$  pontos regularmente espaçados por  $\delta_x$  (no eixo  $x$ ) e por  $\delta_y$  (no eixo  $y$ ). Além disso, a distância entre os planos é dada por  $d_z$ , e o plano inferior encontra-se a uma distância  $z_r$  da superfície do material. Para a análise dos parâmetros referentes ao condicionamento dos sinais gravados utilizou-se um DPA menor, enquanto para a averiguação da impedância dos materiais medidos configurou-se um DPA maior. A Tabela 3.4 aponta todos os DPA medidos – suas configurações assim como o objetivo do ensaio com cada DPA.

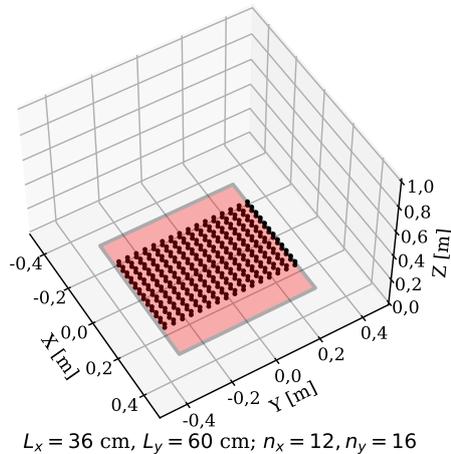
Tabela 3.4 – Configurações dos arranjos utilizados nos ensaios deste trabalho.

| Double Planar Array                                |           | Tamanho cm]      |       | Pontos           |    | $d_{\text{mics.}}$ [cm]    |       | $z_r$ | $d_z$ |
|--|-----------|------------------|-------|------------------|----|----------------------------|-------|-------|-------|
| <i>Análise da(s):</i>                              |           | $L_x \times L_y$ |       | $n_x \times n_y$ |    | $\delta_x \times \delta_y$ |       | [cm]  | [cm]  |
| Influências do condicionamento                     |           | 28,00            | 32,00 | 8                | 10 | 3,50                       | 3,20  | 1,30  | 2,90  |
| Diferenças entre os métodos de solução de $p = Hx$ |           |                  |       |                  |    |                            |       |       |       |
| Reconstrução de $Z_s$ e de $\alpha$                |           | 36,00            | 60,00 | 12               | 16 | 3,00                       | 3,75  | 1,50  | 3,00  |
| Atributos do arranjo                               | Tamanho   | 36,00            | 44,00 | 12               | 12 |                            |       |       |       |
|  |           | 29,45            | 36,00 | 10               | 10 |                            |       |       |       |
|  |           | 22,90            | 28,00 | 8                | 8  | 3,00                       | 3,75  | 1,50  | 3,0   |
|  |           | 16,40            | 20,00 | 6                | 6  |                            |       |       |       |
|  | Resolução | 36,00            | 60,00 | 12               | 4  | 3,00                       |       |       |       |
|  |           |                  |       | 4                | 4  | 12,00                      | 15,00 | 1,50  | 3,0   |

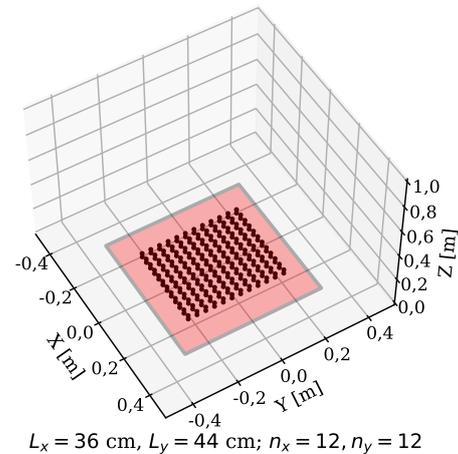
Referenciando à Tabela 3.4, a primeira comparação entre curvas de impedância e de absorção é feita entre os resultados do DPA de  $36 \times 60$  cm<sup>2</sup> (vide Figura 3.6a) e o DPA de  $36 \times 44$  cm<sup>2</sup> (vide Figura 3.6b) – eles possuem a mesma resolução espacial, além de que o primeiro cobre uma área que chega próxima às bordas da placa Sonex.

Figura 3.6 – Mudança do arranjo na análise de  $\tilde{Z}_s$  e de  $\alpha$ .

(a) Arranjo medido (maior).



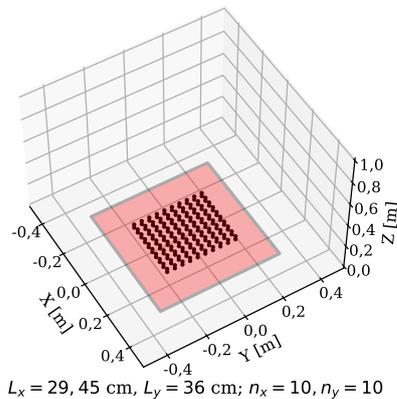
(b) Arranjo reduzido.



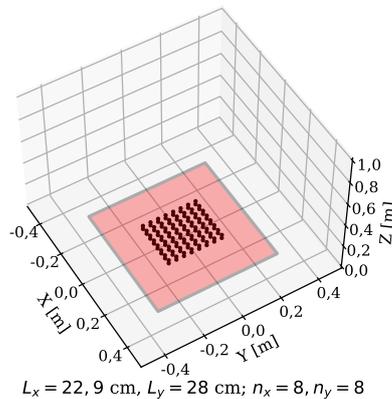
Para examinar a influência do tamanho do arranjo, o DPA de  $36,00 \times 44,00$  cm<sup>2</sup> (Figura 3.6b) foi reduzido para  $29,45 \times 36,00$  cm<sup>2</sup> (vide Figura 3.7a) e, depois, para  $22,90 \times 28,00$  cm<sup>2</sup> e para  $16,4 \times 20,00$  cm<sup>2</sup> (vide Figuras 3.7b e 3.7c), **sem alterar sua resolução espacial**.

Figura 3.7 – Mudanças do arranjo para analisar a influência de seu tamanho.

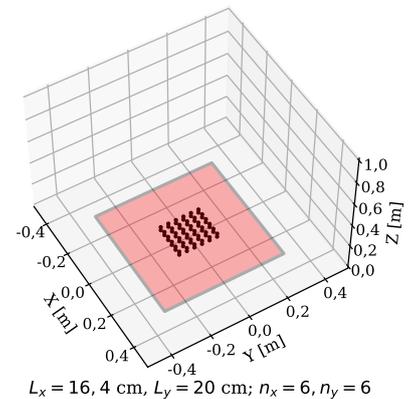
(a) DPA com 200 pontos.



(b) DPA com 128 pontos.

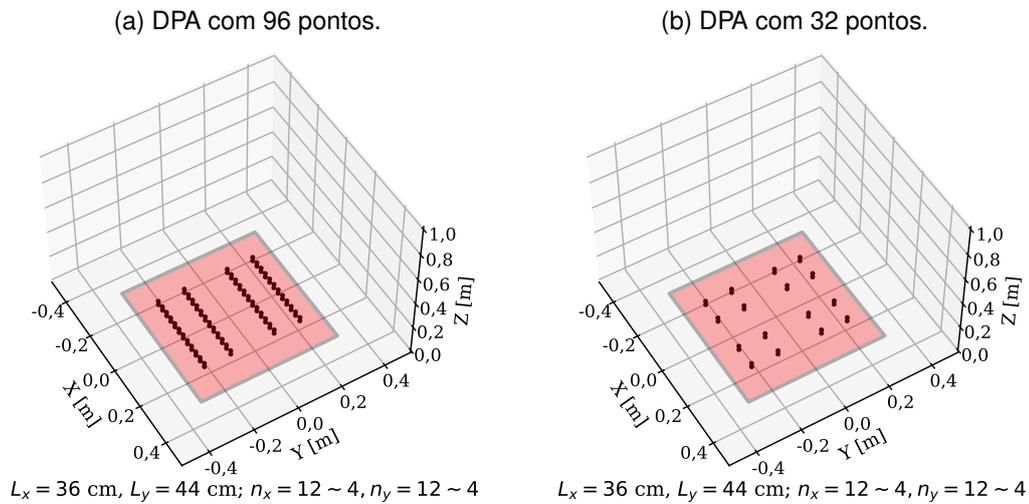


(c) DPA com 72 pontos.



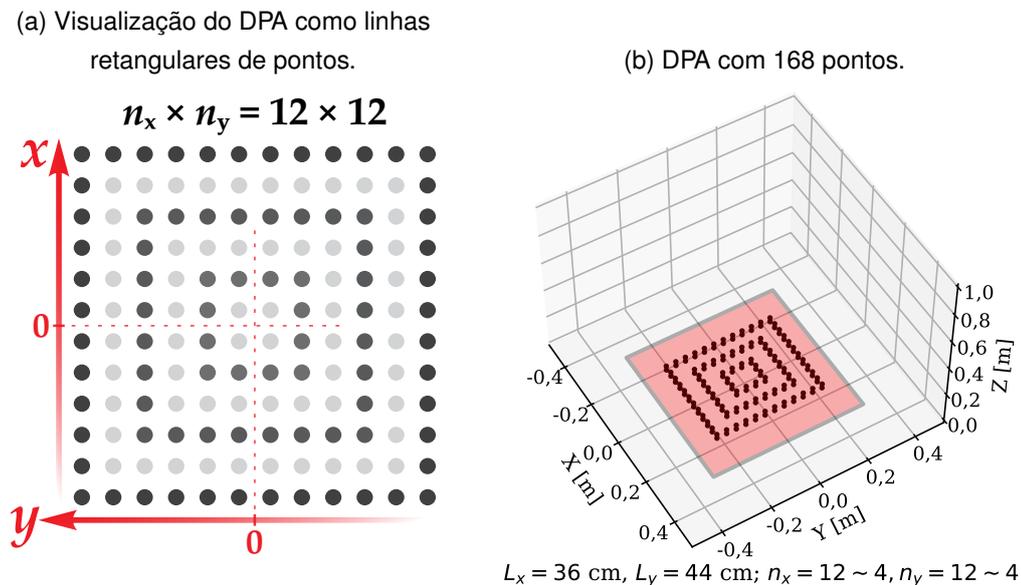
Para investigar a influência da resolução espacial do arranjo, **seu tamanho**  $L_x \times L_y$  **é mantido constante** ( $36 \times 44$  cm<sup>2</sup>) enquanto reduz-se o número de pontos a serem considerados na decomposição. Para fazer esta redução de maneira proporcional ao longo do arranjo, a primeira redução foi feita de maneira que o espaçamento  $\delta_y$  é triplicado (vide Figura 3.8a). Na segunda redução, esta feita a partir da primeira, triplicou-se o espaçamento  $\delta_x$  resultando no arranjo mostrado na Figura 3.8b, que foi o de mais baixa resolução espacial analisado por este trabalho.

Figura 3.8 – Arranjos utilizados na análise da influência de sua resolução espacial.



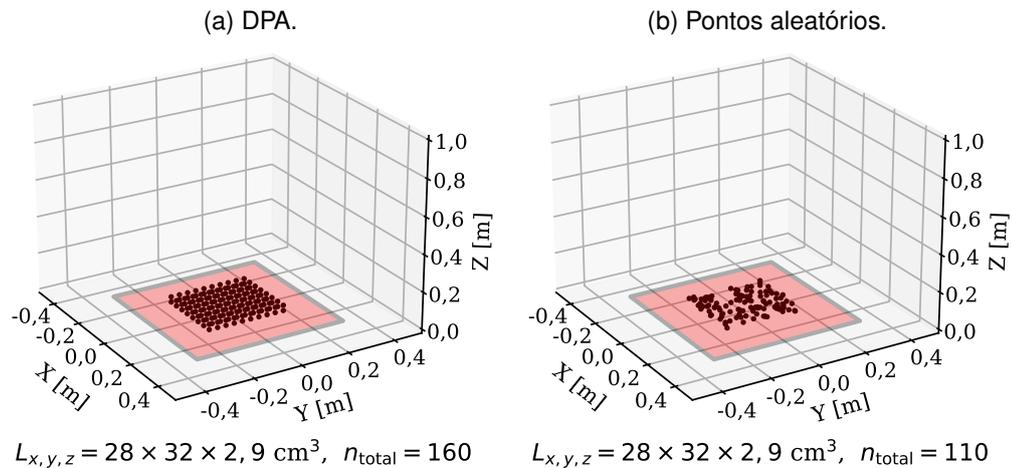
Uma outra maneira de visualizar um arranjo DPA é pelos segmentos de retas que formam retângulos em torno dos eixos  $x$  e  $y$ . Esta visualização do DPA da Figura 3.6b está ilustrada na Figura 3.9a. A última mudança da resolução espacial do DPA da Figura 3.6b que foi analisada consistiu em excluir dois dos contornos retangulares de maneira que a distância dos que não foram excluídos fosse dobrada. Este arranjo está apresentado na Figura 3.9b.

Figura 3.9 – Arranjos utilizados na análise da influência de sua resolução espacial.



Depois da averiguação da resolução espacial, a última análise apresentada no Capítulo 4 consiste na comparação dos resultados obtidos com o DPA utilizado na análise dos efeitos de condicionamento e um arranjo formado por 110 pontos randômicos que tangem a mesma área do DPA ( $28 \times 32 \text{ cm}^2$ ). Ambos os arranjos estão apresentados pelas Figuras 3.10a e 3.10b.

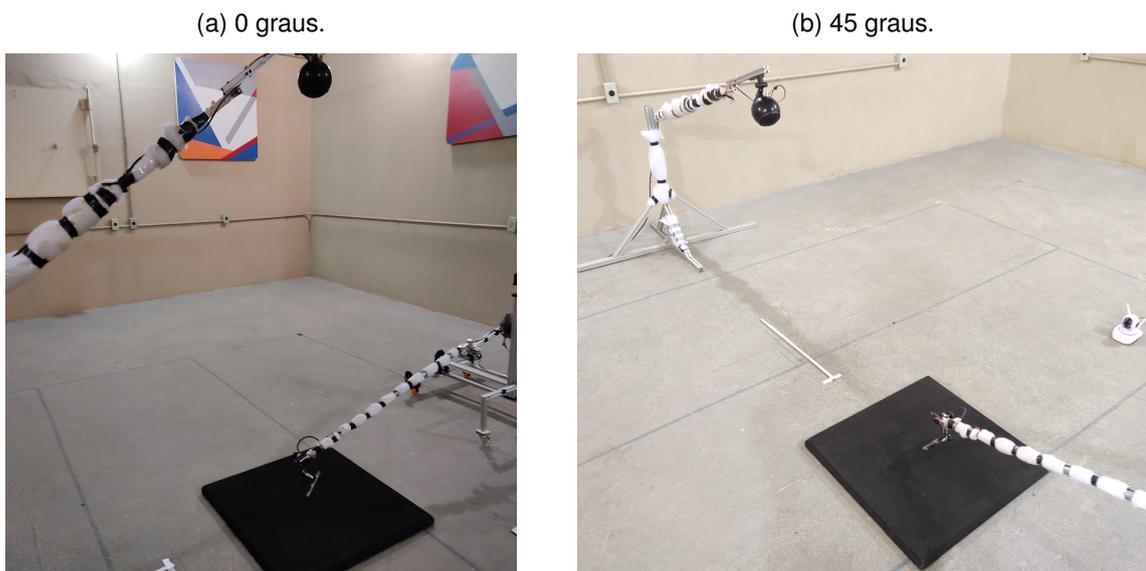
Figura 3.10 – Arranjos utilizados na análise dos efeitos de seu formato.



Esta última análise tem o objetivo de mostrar que a metodologia de ensaio explorada por este trabalho não impõe limitações físicas no arranjo que será medido. Apesar disso, é natural que os resultados entre ambos os arranjos sejam relativamente diferentes, o que será explicado no Capítulo 4.

Em todos os ensaios a fonte sonora foi mantida fixa a uma distância de 1,5 m do centro da superfície do material, mudando apenas seu ângulo de incidência – a Figura 3.11a mostra a fonte sonora em  $0^\circ$ , o qual corresponde ao ângulo de incidência normal; enquanto a Figura 3.11b mostra a fonte sonora com  $45^\circ$  de elevação.

Figura 3.11 – Posições da fonte sonora que foram medidas.



Devido ao seu tamanho, essa fonte sonora não possui uma boa eficiência de radiação para baixas frequências. Apesar de se tratar de uma margem de frequências que são minimamente atenuadas pelo material poroso, é importante manter em mente esse

viés quando os dados de gravados forem processados, já que uma eficiência (de radiação) menor leva à uma faixa dinâmica e à um SNR menores.

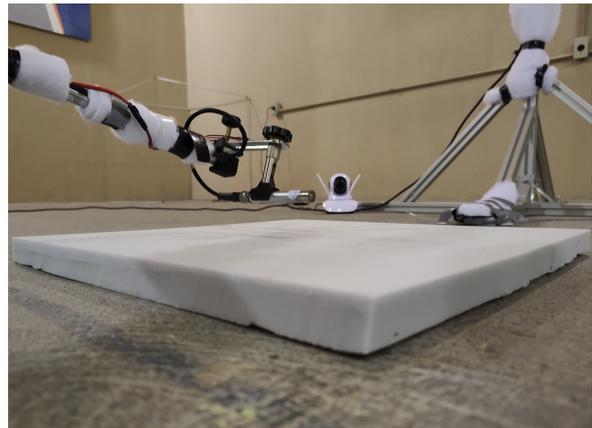
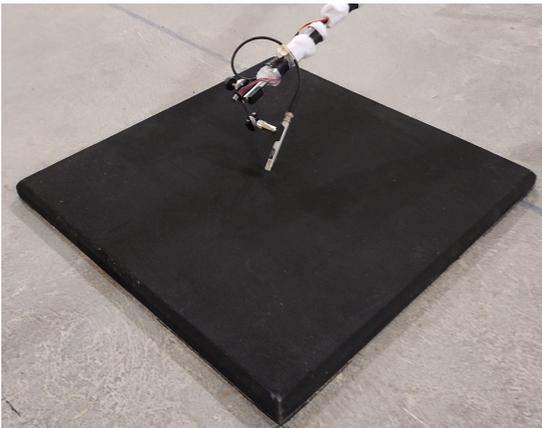
### 3.3.1 Materiais analisados

As medições envolvidas neste trabalho averiguaram amostras quadradas de dois materiais porosos. A primeira amostra está apresentada na Figura 3.12a, que mostra uma placa Sonex com 62,5 cm de aresta, espessura de 3,5 cm e com chanfros que reduzem a área de sua face superior para 61 cm de aresta. Enquanto isso, a Figura 3.12b mostra a segunda amostra analisada – uma placa de melamina com 41 cm de aresta, além de 2,5 cm de espessura. Ambas as amostras apresentam uma superfície lisa.

Figura 3.12 – Amostras medidas.

(a) Sonex –  $62,5 \times 62,5 \text{ cm}^2$ , esp. 3,5 cm.

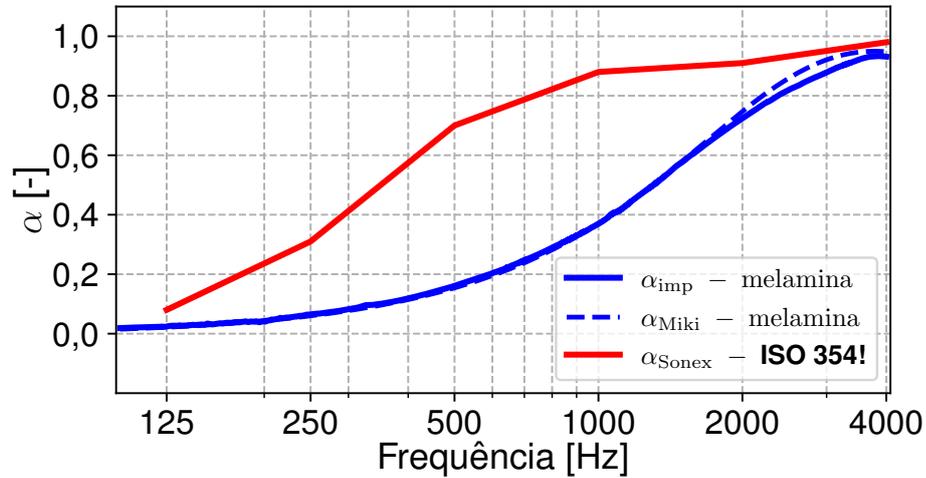
(b) Melamina –  $41,0 \times 41,0 \text{ cm}^2$ , esp. 2,5 cm.



Essa melamina teve sua impedância e coeficiente de absorção medidos pelo método do tubo de impedância, assim como sua resistividade ao fluxo. Os dados foram fornecidos pelo professor Paulo Mareze, dos quais a resistividade ao fluxo equivale à  $10.998 \text{ rayl} \cdot \text{m}^{-1}$ . A Figura 3.13 apresenta o coeficiente de absorção  $\alpha_{\text{imp}}$  medido no tubo de impedância, junto com a estimativa do mesmo coeficiente pelo modelo de Miki (MIKI, 1990),  $\alpha_{\text{Miki}}$ , para o qual utilizou-se a resistividade ao fluxo medida.

Por outro lado, a placa sonex da Figura 3.12a é a única disponível no laboratório da Engenharia Acústica. Sendo assim, não foi possível cortá-la para medir sua resistividade ao fluxo e/ou seu coeficiente de absorção no tubo de impedância. Desta maneira, a curva de absorção presente no seu *datasheet* é a única referencia disponível até então, e é apresentada junto com as curvas de absorção da melamina ( $\alpha_{\text{imp}}$  e  $\alpha_{\text{Miki}}$ ) no gráfico da Figura 3.13.

Figura 3.13 – Coeficientes de absorção:  $\alpha_{imp}$  e  $\alpha_{Miki}$ , ambas na cor azul, correspondem à melamina e foram obtidos, respectivamente, com o ensaio no tubo de impedância e pela estimativa em função da resistividade ao fluxo medido.  $\alpha_{Sonex}$ , apresentado na cor vermelha corresponde ao coef. de absorção medido de acordo com a ISO 354.

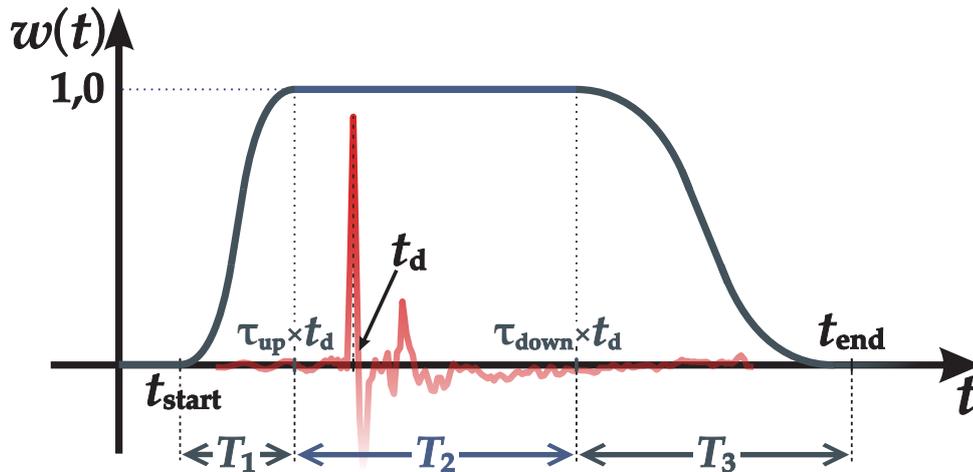


O coeficiente de absorção da placa sonex, de acordo com o *datasheet*, foi medido de acordo com a norma ISO 354, a qual é baseado na diferença do TR dentro de uma câmara reverberante, que é causado pela inserção do material no ambiente. Nesse ensaio a incidência sonora no material é aleatória, diferentemente do ensaio no tubo de impedância em que a incidência é normal e por ondas planas à amostra. Sendo assim, no Capítulo 4 as curvas de absorção em azul da Figura 3.13, ou seja, apenas os dados experimentais da melamina são comparados com os resultados dos ensaios feitos por este trabalho.

### 3.3.2 Janelamento temporal

Considerando a metodologia e o objetivo dos ensaios realizados por este trabalho, seria ideal que os mesmos fossem realizados em uma câmara anecóica ou semi-anecóica. No entanto, o laboratório de acústica da UFSM não conta com um ambiente desse tipo. Por causa disso os ensaios foram realizados na câmara reverberante 1 do laboratório, necessitando assim do janelamento temporal (das respostas impulsivas) para separar os fenômenos desejados (som direto e reflexão/difração da amostra) das reflexões espúrias das superfícies da câmara. Utilizou-se a janela chamada Adrienne (GARAI; GUIDORZI, 2000), que pode ser observada pela Figura 3.14. Considerando  $t_d$  o tempo de chegada da incidência direta, a região da janela em que  $w(t) = 1,0$  estende-se de “ $\tau_{up} \times t_d$ ” a “ $\tau_{down} \times t_d$ ”. Note que  $\tau_{up}$  ( $0 < \tau_{up} < 1$ ) e  $\tau_{down}$  ( $\tau_{down} > 1$ ) são adimensionais, e servem para alterar o tempo de duração que  $w(t) = 1, 0$ .

Figura 3.14 – Janela temporal aplicada às respostas impulsivas.



A Figura 3.14 mostra que a janela possui 3 regiões - o início ascendente de duração  $T_1 = (\tau_{up} \times t_d) - t_{start}$ , seguido da região linear de duração  $T_2 = (\tau_{down} - \tau_{up}) \times t_d$ , e ela termina com a região descendente que tem duração  $T_3 = t_{end} - (\tau_{down} \times t_d)$ .

Em um efeito dominó, as oscilações de temperatura ao longo do ensaio levam à pequenos ajustes do cálculo de  $t_d$  e, conseqüentemente, dos parâmetros da janela. Desta maneira, a posição da janela temporal em relação ao tempo de chegada permanece constante para todos os pontos do arranjo. A variação de alguns desses parâmetros tiveram influência na estimativa do espectro do número de onda e da absorção sonora. De maneira mais específica, o comprimento da região em que  $w(t) = 1,0$  ( $T_2$ ) e do decaimento ( $T_3$ ) podem ocasionar oscilações nos resultados, e para uma determinada parte do espectro. É importante salientar que  $t_d$  é calculado empiricamente para cada ponto - a distância euclidiana entre a fonte sonora e o ponto  $\mathbf{r}$  é calculado da seguinte maneira,

$$d_r = \|\mathbf{s} - \mathbf{r}\| = \sqrt{(\mathbf{s}_x - \mathbf{r}_x)^2 + (\mathbf{s}_y - \mathbf{r}_y)^2 + (\mathbf{s}_z - \mathbf{r}_z)^2}. \quad (3.1)$$

No instante logo antes de realizar a gravação de cada, a temperatura é medida com um sensor instalado próximo ao microfone. Com o valor da temperatura calcula-se a velocidade do som  $c_0$ , e sabendo o valor de  $d_{r_{mn}}$ , o tempo de chegada  $t_d$  pode ser calculado da seguinte maneira,

$$t_d = \frac{d_{r_{mn}}}{c_0}. \quad (3.2)$$

Diferentes valores foram testados para todos os parâmetros, e a apresentação e discussão das influências na reconstrução da impedância e da absorção abrem o Capítulo 4 deste trabalho. As configurações do DPA utilizado para essas análises podem ser consultadas na Tabela 3.4.

No final, os parâmetros da janela que foram utilizados no processamento dos demais resultados do capítulo 4 estão apontados na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Parâmetros de configuração da janela temporal.

| Parâmetro            | Valor   |
|----------------------|---------|
| $\tau_{\text{up}}$   | 0,80    |
| $\tau_{\text{down}}$ | 2,00    |
| $T_3$                | 9,40 ms |
| $t_{\text{start}}$   | 0,02 ms |

Considerando que  $f_s = 51.200$  Hz e o tempo de gravação igual a 5,12 s, cada resposta impulsiva janelada consiste num sinal discreto com 262.144 amostras. Como boa parte de cada RI consiste em valores próximos de zero, elas são cortadas de maneira que a duração do sinal seja de 0,2 s, o que reduz o número de amostras para 10.240. Como  $f_s$  não é alterado, as frequências da nova resolução espectral podem ser calculadas por,

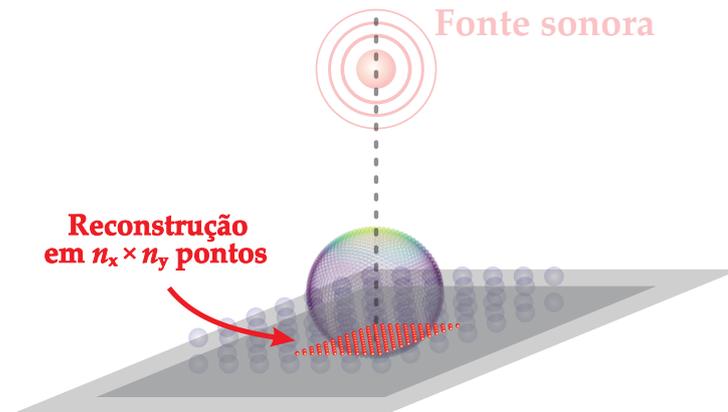
$$f_m = m \times \frac{f_s}{N}, \quad \text{sendo que } m = 0, 1, 2, \dots, M - 1. \quad (3.3)$$

Aplicando a Equação 3.3, calcula-se que a nova resolução espectral é de 5 Hz. O último condicionamento das RI consiste em utilizar o conteúdo espectral da margem que se estende a até 4.000 Hz. No final, cada componente em frequência dos pontos  $\tilde{p}_1(f), \tilde{p}_2(f), \dots, \tilde{p}_M(f)$  formam o vetor de pressão  $\mathbf{p}$  da Equação 2.2, que representa o problema matemático envolvido na decomposição.

### 3.3.3 Decomposição e reconstrução

Para cada frequência analisada, o processo da decomposição envolve calcular a magnitude de **2.562** componentes de ondas planas propagantes, que formam o espectro do número de onda (ou ângular). É importante salientar que não houveram motivos específicos para a escolha desse número de componentes. No entanto, as referências bibliográficas que abordam este processo sempre envolvem a decomposição em um número de componentes que é maior que o número de pontos de gravação ( $\mathcal{L} \gg \mathcal{M}$ ). Depois da decomposição do campo acústico em todas as frequências (100 à 4.000 Hz, com passo de 5 Hz), reconstrói-se a pressão sonora (Equação 2.6) e a velocidade de partícula (Equação 2.7) em  $21 \times 21$  pontos regularmente espaçados por uma área de  $10 \times 10$  cm<sup>2</sup> pela superfície do material (vide Figura 3.15). A impedância  $Z_s$  é obtida com a média espacial da impedância de todos os pontos, e, com ela, a absorção é calculada com a Equação 2.9.

Figura 3.15 – Pontos onde são reconstruídas as pressões e velocidades de partícula.



Com o mesmo DPA utilizado na análise dos efeitos do janelamento, a segunda averiguação feita e discutida no Capítulo 4 avalia as diferenças de  $\tilde{Z}_s$  e de  $\alpha$  para 4 métodos matemáticos de solução da Equação ??, estes apresentados na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 – Métodos de cálculo dos coeficientes espectrais.

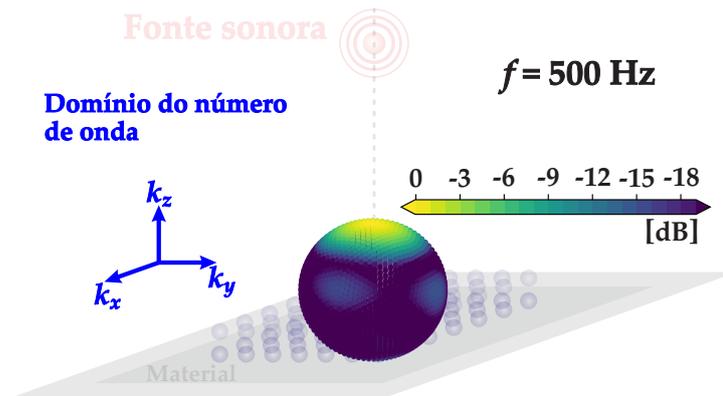
| Método        | Descrição  | Otimização |
|---------------|--|------------|
| <b>Direto</b> | Mais rápido, porém menos preciso. Consiste na solução analítica calculada com a Equação 2.5  | <i>Não</i> |
| <b>Scipy</b>  | Formulação do problema por quadrados-mínimos, utilizando $\lambda_t$ como um coeficiente de amortecimento                                      | <i>Sim</i> |
| <b>Ridge</b>  | Solução regularizada para a qual é aplicado os filtros de Tikhonov ( $f_i$ ), que por sua vez utiliza os parâmetros do SVD para serem criados. | <i>Sim</i> |

Da comparação entre os métodos, os resultados apresentados no Capítulo 4 foram utilizados para se decidir empregar o método **Ridge** no processamento dos demais resultados do Capítulo 4.

### 3.3.3.1 Espectros do número de onda (ou angulares)

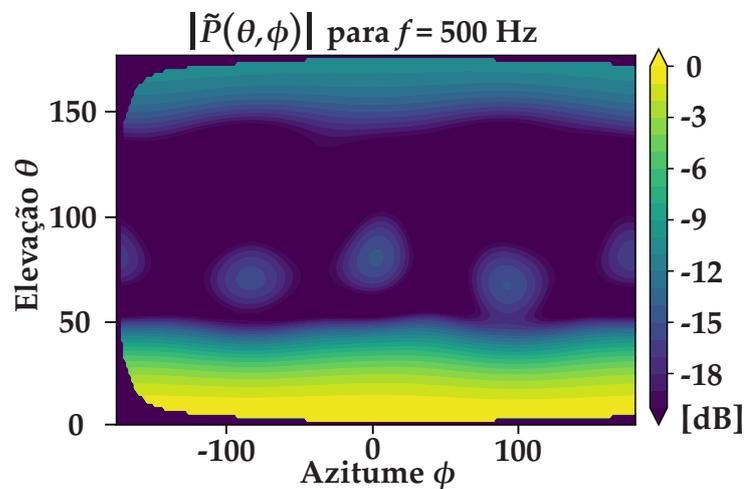
Para uma frequência  $f$ , o espectro do número de onda consiste na representação dos  $\mathcal{L}$  componentes de ondas planas – suas coordenadas normalizadas, no domínio  $k$ , são representadas por pontos, ao mesmo tempo que suas magnitudes são representadas pela cor destes pontos. A Figura 2.3 mostrou que estes pontos formam uma esfera de raio  $k_0$ . Para exemplificar, a Figura 3.16 mostra espectro do número de onda para  $f = 500$  [Hz], obtido a partir de um ensaio com a fonte sonora a  $0^\circ$  (incidência normal).

Figura 3.16 – Espectro  $\tilde{P}(k)$  para  $f = 500$  Hz.



A Figura 3.16 mostra a presença de dois lóbulos no espectro  $\tilde{P}(k)$ , os quais correspondem a incidência direta (magnitude maior) e refletida pelo material (magnitude menor). Para uma melhor visualização deste espectro, é possível plotar os componentes em função dos ângulos de elevação ( $\theta$ ) e azimute ( $\phi$ ), o que faz o gráfico tornar-se bidimensional, i.e.  $\tilde{P}(\theta, \phi)$ . Para o espectro  $\tilde{P}(\mathbf{k})$  mostrado na Figura 3.16, seu espectro  $\tilde{P}(\theta, \phi)$  está apresentado na Figura 3.17.

Figura 3.17 – Espectro  $\tilde{P}(\theta, \phi)$  de  $\tilde{P}(\mathbf{k})$  apresentado na Figura 3.16.



No Capítulo 4 serão mostradas as variações causadas no espectro  $\tilde{P}(\theta, \phi)$  a medida que diminui o comprimento de onda em função da frequência analisada.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados apresentados neste capítulo seguem a mesma ordem do que foi apresentado e discutido no Capítulo 3. Desta maneira, o texto a seguir começa com a apresentação do protótipo desenvolvido, incluindo detalhes de sua estrutura e funcionamento. Logo depois, os resultados da implementação das rotinas experimentais, detalhadas na Seção 3.3, serão apresentados e discutidos.

### 4.1 CONFECÇÃO DO PROTÓTIPO DE ESCANEAMENTO

O protótipo construído está apresentado na Figura 4.1. O Apêndice A contém outras fotos e algumas de suas partes ampliadas para uma melhor visualização.

Figura 4.1 – Resultado final da construção do protótipo.



O suporte do microfone é preso ao eixo retificado que, em seu envolto, colocou-se um material poroso. A garra do suporte é pressionada com um parafuso, o que garante estabilidade independente da inclinação do suporte no momento que é fixado. É possível utilizar dois tipos de “cachimbo” para microfone: O de modelo padrão da B&K para seus microfones de  $1/2$ ”, ou pode-se utilizar um cachimbo de garra. As dimensões principais do escâner, indicadas na Figura 4.2, podem ser consultadas na Tabela 4.1.

Figura 4.2 – Principais dimensões do tripé eletrônico. As principais dimensões,  $D_x$ ,  $D_y$ ,  $D_z$ , correspondem às indicadas em vermelho, enquanto as demais dimensões são as que estão em azul.

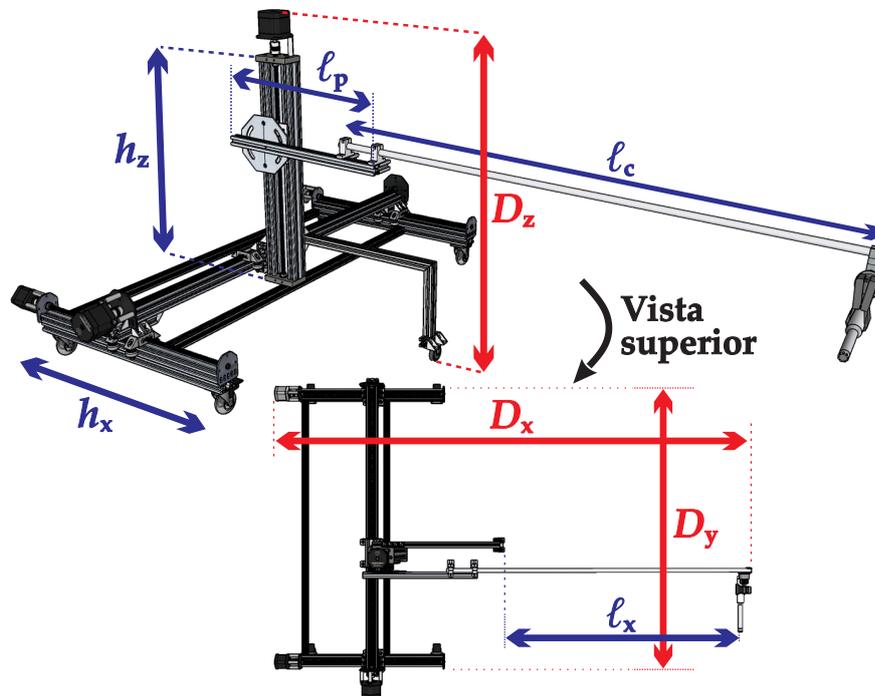


Tabela 4.1 – Valores das dimensões do protótipo indicadas na Figura 4.2.

| Principais dimensões do protótipo |                        |
|-----------------------------------|------------------------|
| $D_x \times D_y \times D_z$       | 1,64 × 1,03 × 0,74 [m] |
| $h_x, h_z$                        | 0,53 [m], 0,52 [m]     |
| $l_x$                             | 0,82 [m]               |
| $l_c$                             | 1,00 [m]               |
| $l_p$                             | 0,38 [m]               |

#### 4.1.1 Estrutura

Cada peça utilizada foi dimensionada na fase de modelagem 3D do projeto. As peças foram unidas para montar quatro atuadores lineares, que são dispositivos que movem uma carga em linha reta (vide Figura 4.3). Na Figura 4.4 é possível observar o posicionamento dos 4 atuadores. Dois atuadores idênticos (**A1** e **A2**) operam em conjunto para mover a base da Figura 4.3 no eixo  $x$ . O terceiro atuador (**A3**), movido pelos dois primeiros, é responsável por mover a base no eixo  $y$ . O quarto atuador (**A4**) completa a movimentação no eixo  $z$ . Dessa maneira, é possível movimentar a haste que contém o microfone com

três graus de liberdade. O escâner é totalmente desmontável e quatro rodízios giratórios permitem movê-lo de posição se necessário.

Figura 4.3 – Atuador linear.

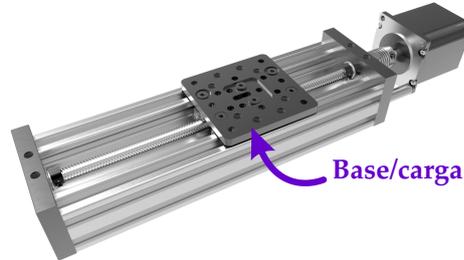
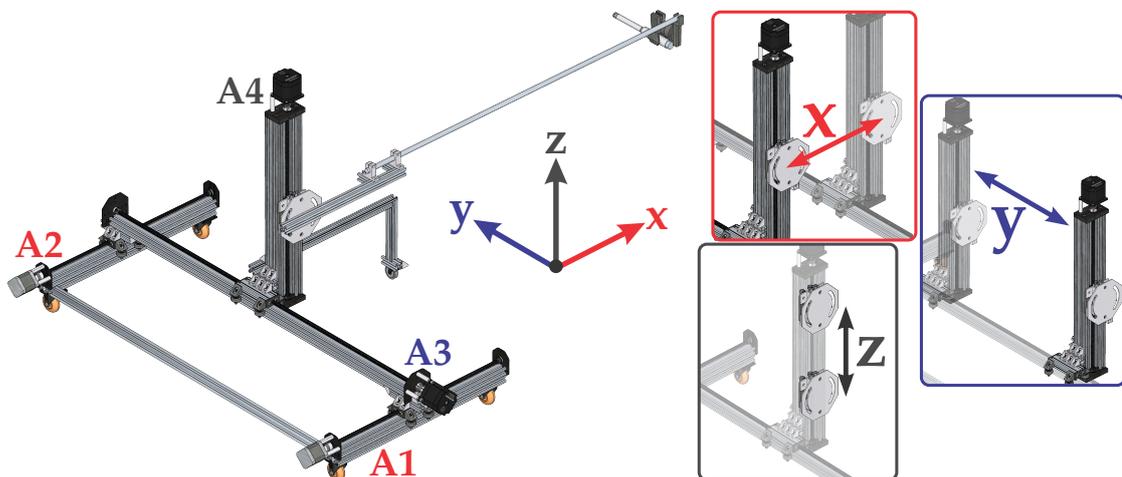


Figura 4.4 – Projeto final de escâner (esquerda) e o esquema de deslocamento nos três eixos.



A exatidão da posição do microfone depende da estabilidade mecânica do sistema formado pelos atuadores lineares interligados. Sendo assim, é importante salientar que a carga de cada atuador consiste num guia metálico com pequenos rodízios que se encaixam perfeitamente no sulco do perfil, o que impede movimentos de torção que o peso da haste com o microfone poderia gerar. O suporte em “L” (com rodízio), fixado no Atuador A4, foi adicionado para minimizar a torção em torno do eixo  $y$ . O microfone será deslocado corretamente pelos eixos  $x$ ,  $y$  e  $z$ , desde que o último Atuador A4 esteja perpendicular ao piso do ambiente. Isso pode ser verificado, por exemplo, com uma ferramenta de medição de nível todas as vezes antes de utilizar o escâner.

O comprimento dos atuadores limita o deslocamento nos eixos  $x$ ,  $y$  e  $z$ , de maneira que o maior volume espacial possível de ser escaneado é de  $0,48_{(x)} \times 1,10_{(y)} \times 0,45_{(z)} \text{ m}^3$ .

As principais partes/peças do escâner estão indicadas na Figura 4.5 e descritas na Tabela 4.2.

Figura 4.5 – Desenho digital do protótipo.

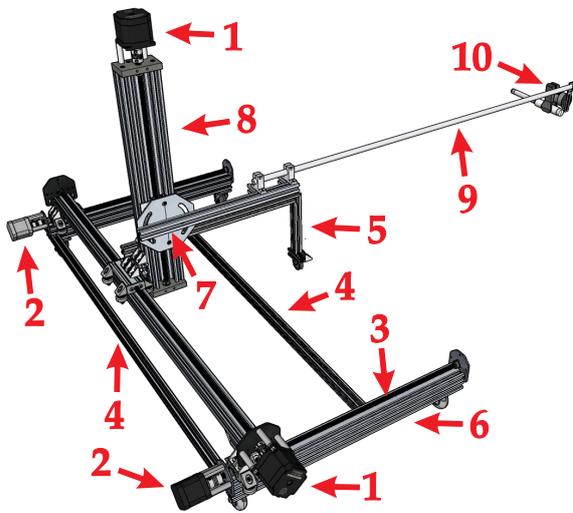


Tabela 4.2 – Componentes do protótipo.

| <i>n</i> | Descrição  |
|----------|--|
| 1        | Motores NEMA 23, com $i = 2,8$ A   |
| 2        | Motores NEMA 17, com $i = 1,7$ A   |
| 3        | Fuso trapezoidal TR8-8 mm  |
| 4        | Perfil <i>V-slot</i> 20 × 20 mm, canal 6                                     |
| 5        | Apoio do sistema linear do eixo Z, feito com perfis <i>V-slot</i> 20 × 20 mm |
| 6        | Perfil <i>V-slot</i> 20 × 40 mm  |
| 7        | Perfil <i>V-slot</i> 20 × 20 mm, canal 8                                     |
| 8        | Perfil <i>V-slot C-beam</i> , 40 × 80 mm                                     |
| 9        | Eixo de aço carbono  |
| 10       | Suporte B&K para microfone   |

#### 4.1.2 Funcionamento e validação

A utilização do escâner em um ensaio é dividido em duas fases: configuração e medição. Na fase de configuração, o escâner é manualmente posicionado de maneira que o microfone fique centralizado sobre a superfície do material, como mostra a Figura 4.6. A altura do microfone em relação à superfície do material,  $z_0$ , é medida com um paquímetro. Este ponto referencial é denominado  $\mathbf{r}_0 = (0, 0, z_0)$ . O valor de  $z_0$ , junto com arquivos do tipo "dict" com as informações de configuração das placas da NI e da placa Arduino, são os parâmetros de entrada do algoritmo que rege esta primeira fase, com sua lógica apresentada na Figura 4.7.

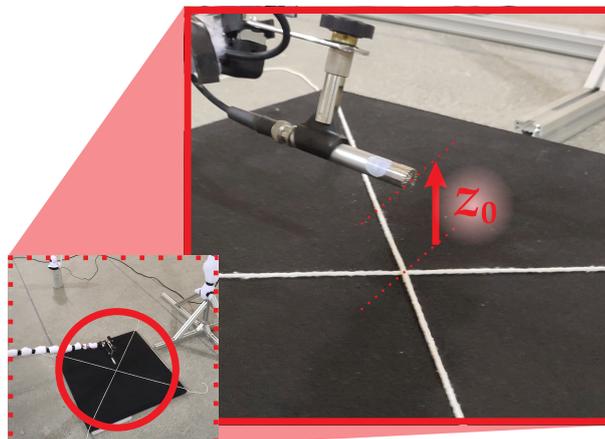
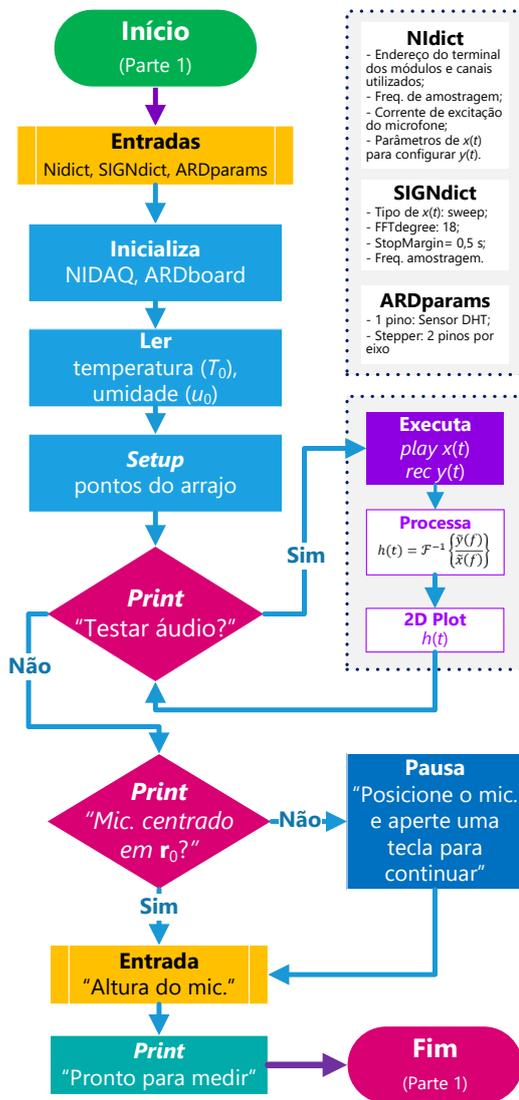
Figura 4.6 – O ensaio começa depois de centralizar o microfone e extrair sua altura  $z_0$ .

Figura 4.7 – Fluxograma da lógica da primeira fase do ensaio com o escâner.



após 1.600 micro-passos, o que equivale a um deslocamento linear de 0,8 cm, o número de micro-passos em função da distância,  $N(d)$ , é dado por

$$N_d = \frac{d \times 1.600}{0,008}, \quad \text{com } N_d \in \mathbb{Z}. \quad (4.2)$$

A execução de um micro-passo é conseguida por meio da aplicação de um pulso elétrico, que é gerado pelo Arduino e amplificado pelo *driver*. Assim, deve haver  $N_d \in \mathbb{N}$  pulsos para movimentar um dado eixo em uma dada distância. Valores não inteiros do resultado da Equação (4.2) são arredondados pelo algoritmo de controle. O erro gerado pelo arredondamento equivale à diferença entre o valor real e o aproximado de  $N_d$ , ou seja,

$$e_{N_d} = |N_d^{(\mathbb{R})} - N_d^{(\mathbb{N})}| \text{ micro-passo}. \quad (4.3)$$

Desta maneira, o erro máximo é de 0,5 micro-passo, que para a resolução selecio-

Depois de inserir  $z_0$  no código, a segunda fase de medição tem início. A partir de  $\mathbf{r}_0$  o escâner começa a varredura dos pontos  $\{\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \dots, \mathbf{r}_m\}$  que formam um arranjo pré-configurado. Considere a situação apresentada pela Figura 4.8, na qual os pontos representam posições de um microfone, que é deslocado do ponto  $\mathbf{r}_n$  ao ponto  $\mathbf{r}_{n+1}$  pelo escâner. O deslocamento  $d$  equivale à distância euclidiana entre  $\mathbf{r}_n$  e  $\mathbf{r}_{n+1}$ . O escâner é capaz de mover o microfone por um eixo de cada vez. Sendo assim, ele deslocará por  $d_{\hat{\mathbf{x}}}$ ,  $d_{\hat{\mathbf{y}}}$  e  $d_{\hat{\mathbf{z}}}$  para chegar ao ponto  $\mathbf{r}_{n+1}$ . Matematicamente tem-se:

$$d: \mathbf{r}_n \rightarrow \mathbf{r}_{n+1} \begin{cases} d_{\hat{\mathbf{x}}} = (r_{(n+1)} - r_n) \cdot \hat{\mathbf{x}} \\ d_{\hat{\mathbf{y}}} = (r_{(n+1)} - r_n) \cdot \hat{\mathbf{y}} \\ d_{\hat{\mathbf{z}}} = (r_{(n+1)} - r_n) \cdot \hat{\mathbf{z}} \end{cases} \quad (4.1)$$

A tomada sequencial de todos os pontos é feita pelo algoritmo de acordo com a lógica apresentada na Figura 4.9.

As coordenadas dos receptores são dadas em metros. Sabendo que uma rotação dos motores utilizados é completada

Figura 4.8 – Cenário hipotético no qual o escâner desloca um microfone do ponto  $r_n$  ao ponto  $r_{n+1}$ .

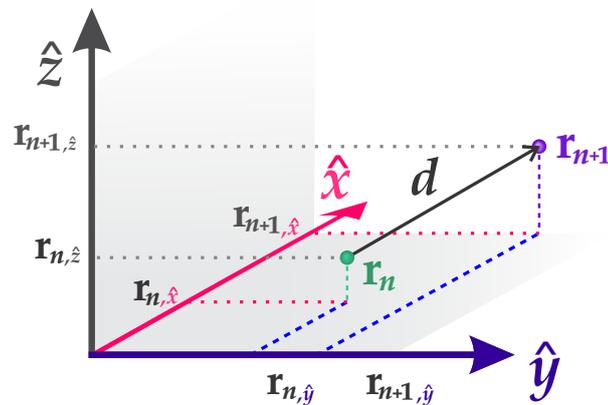
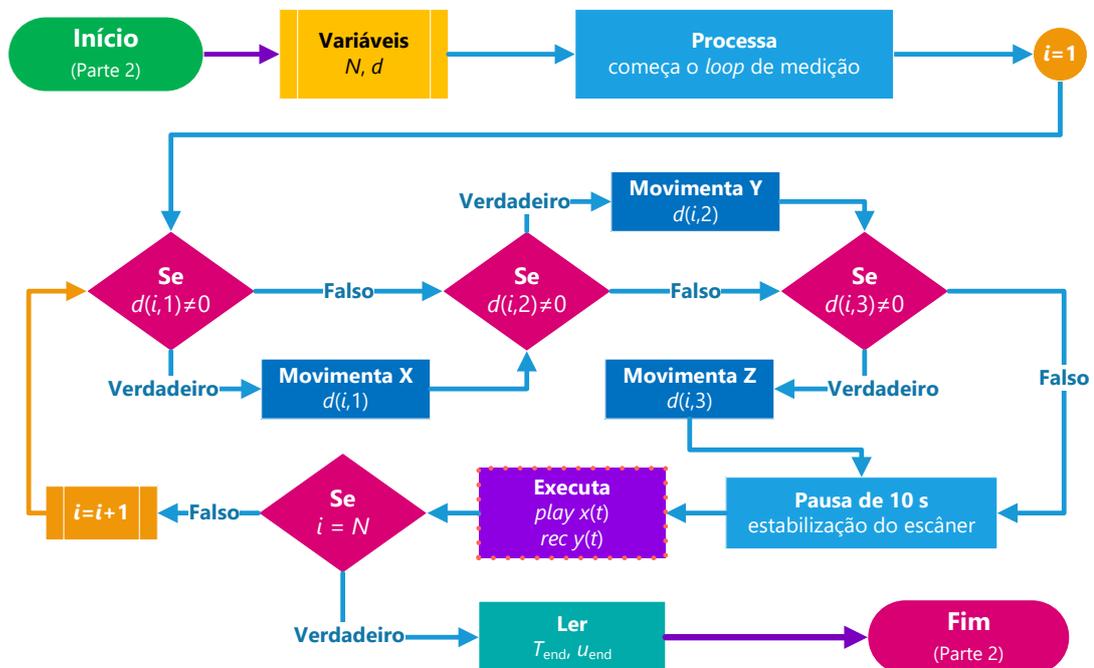


Figura 4.9 – Fluxograma da lógica da segunda fase do ensaio com o escâner.

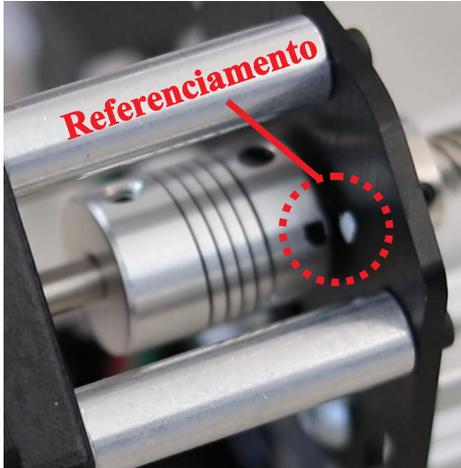


nada equivale a  $5 \mu\text{m}$  de erro no deslocamento linear, o que é tolerável.

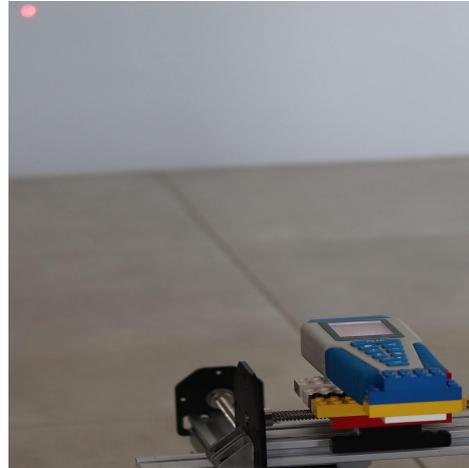
Para verificar e validar o funcionamento do escâner fixou-se uma trena digital em cada guia de maneira que fosse medido a distância perpendicular ao sentido de deslocamento da respectiva guia. A Figura 4.10b mostra este esquema aplicado na guia do eixo  $y$  para averiguar a precisão do deslocamento dos atuadores do eixo  $x$ .

Figura 4.10 – Cenários referentes à averiguação do deslocamento (do eixo X).

(a) Marca preta é rotacionada junto com o motor.



(b) Medição da distância até a parede.



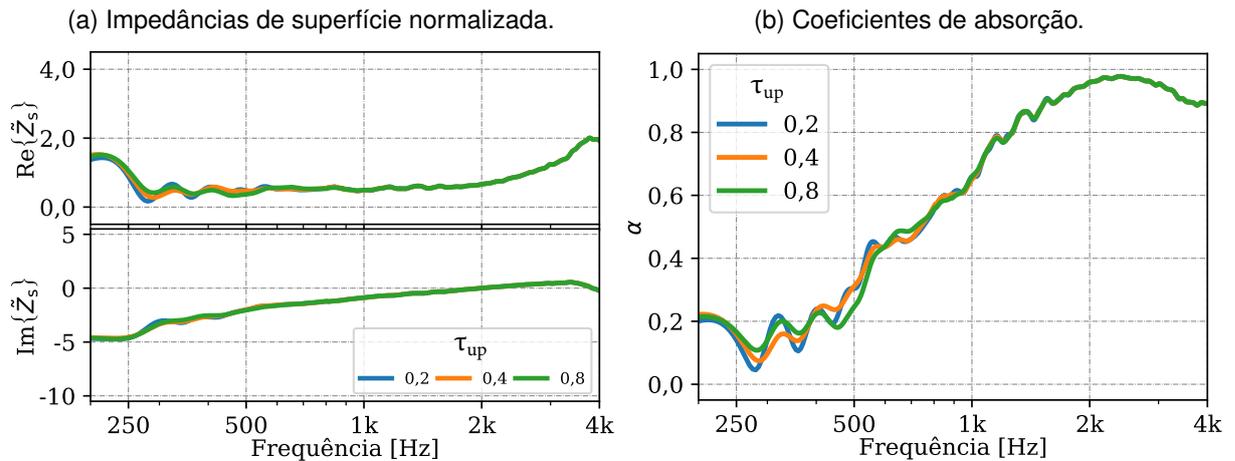
Todos os fusos trapezoidais são de passo de 8 mm, o que significa que uma revolução equivale a 8 mm de deslocamento linear. Ao mesmo tempo que a trena verificou a distância linear deslocada, a revolução completa do fuso era verificada observando a posição do traço riscado no acoplador e no suporte do motor (vide Figura 4.10a), os quais devem se reencontrar após uma rotação.

## 4.2 CONDICIONAMENTO DOS SINAIS

Como foi dito no capítulo anterior, o condicionamento das respostas ao impulso medidas começa com o janelamento temporal, para a remoção dos efeitos indesejados da sala onde a medição ocorre. Foram observados os efeitos da aproximação do início ascendente da janela ao instante  $t_d$ , i.e. variável  $\tau_{up}$ . Os resultados estão apresentados nas curvas de  $\tilde{Z}_s$  e de  $\alpha$ , nas Figuras 4.11a e 4.11b. As análises desta seção mediram a placa Sonex (Figura 3.12a).

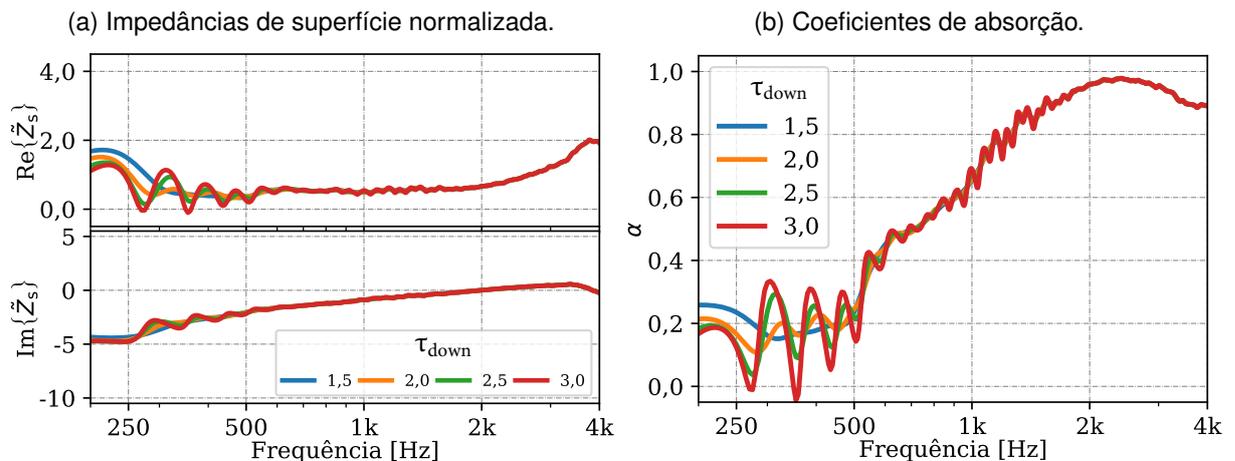
A variação de  $\tau_{up}$  mostrou pouca influência nas curvas de impedância e de absorção para a margem dos valores analisados ( $0,2 \leq \tau_{up} \leq 0,8$ ). Por outro lado, a variação de  $\tau_{down}$  e de  $l_{w_3}$  (que alteram, respectivamente, o comprimento da parte constante ( $w(t) = 1.0$ ) e da parte descendente da janela) tiveram impactos analisados a seguir. Os gráficos das Figuras 4.11a–4.13b mostram que o tempo de duração da fase linear,  $l_{w_2}$ , assim como a largura temporal do decaimento ( $l_{w_3}$ ) da janela Adrienne podem induzir comportamentos oscilatórios nas curvas de impedância e de absorção. Tais oscilações são maiores em baixas frequências, além de tornarem-se menores a medida que o valor do parâmetro em análise ( $\tau_{down}$  ou  $l_{w_3}$ ) se aproxima do valor escolhido como referência (este destacado em

Figura 4.11 – Flutuações em  $Z_s$  e em  $\alpha_{rec}$  devidos à variação de  $\tau_{up}$ .



cada gráfico). Essa foi a análise feita a respeito da influência do janelamento, tal qual foi utilizada para decidir quais valores utilizar no processamento dos ensaios discutidos a seguir.

Figura 4.12 – Flutuações em  $Z_s$  e em  $\alpha_{rec}$  devidos à variação de  $\tau_{down}$ .



Não menos importante, no processamento da decomposição<sup>1</sup> é a influência do método de solução da equação matricial – o qual estima as amplitudes dos componentes espectrais de  $\tilde{P}(\mathbf{k})$  –, nas curvas de impedância e de absorção. As Figuras 4.14a e 4.14b mostram resultados semelhantes para os 4 métodos processados. No entanto, o método direto gerou grandes variações quando  $800 \leq f \leq 870$  Hz. É importante lembrar que o método direto gera uma solução analítica, utilizando a matriz  $\mathbf{H}\mathbf{H}^H$ , que possui pior “Rank”, e portanto leva a soluções potencialmente instáveis. Com esta análise dos resultados em função dos métodos, além de outras considerações ligadas à “eficiência + precisão” do algoritmo, o método *Ridge* foi o escolhido no processamento dos demais resultados discutidos.

<sup>1</sup>Relativo ao mesmo ensaio.

Figura 4.13 – Flutuações em  $Z_s$  e em  $\alpha_{rec}$  devidos à variação de  $l_{w3}$ .

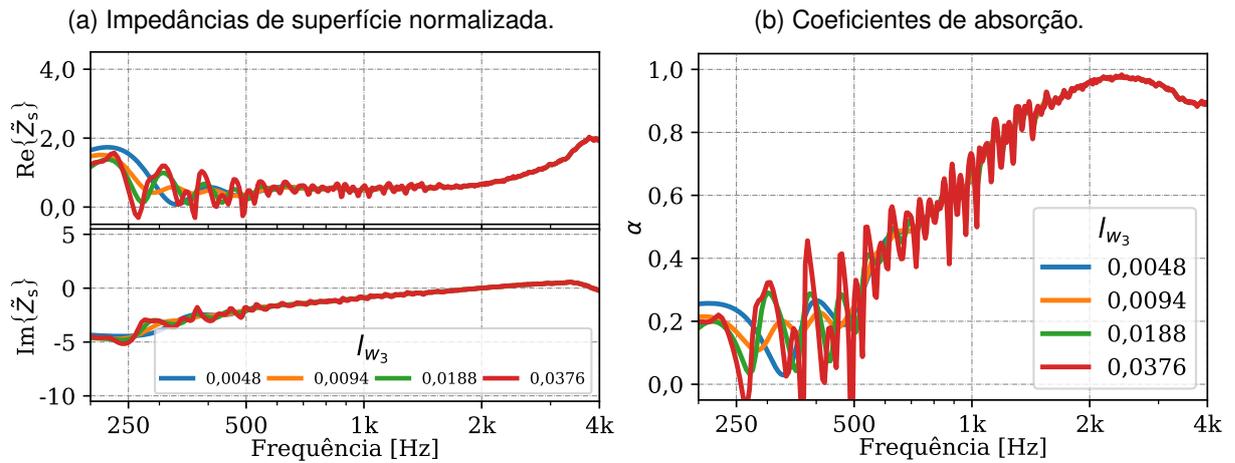
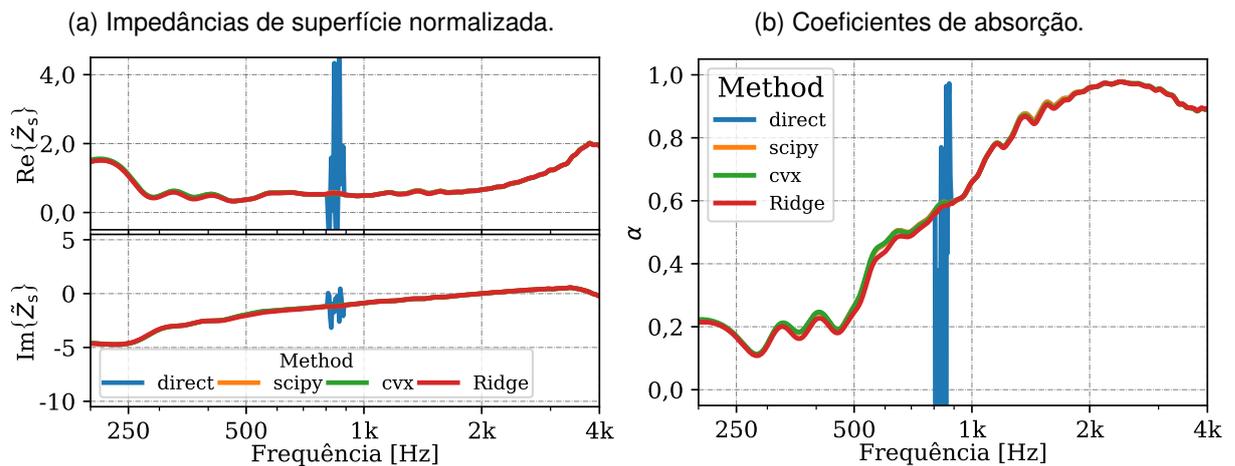


Figura 4.14 – Flutuações em  $Z_s$  e em  $\alpha_{rec}$  em função do método de cálculo da magnitude dos componentes  $\tilde{P}(\mathbf{k})$ .



### 4.3 ANÁLISES DOS MATERIAIS POROSOS

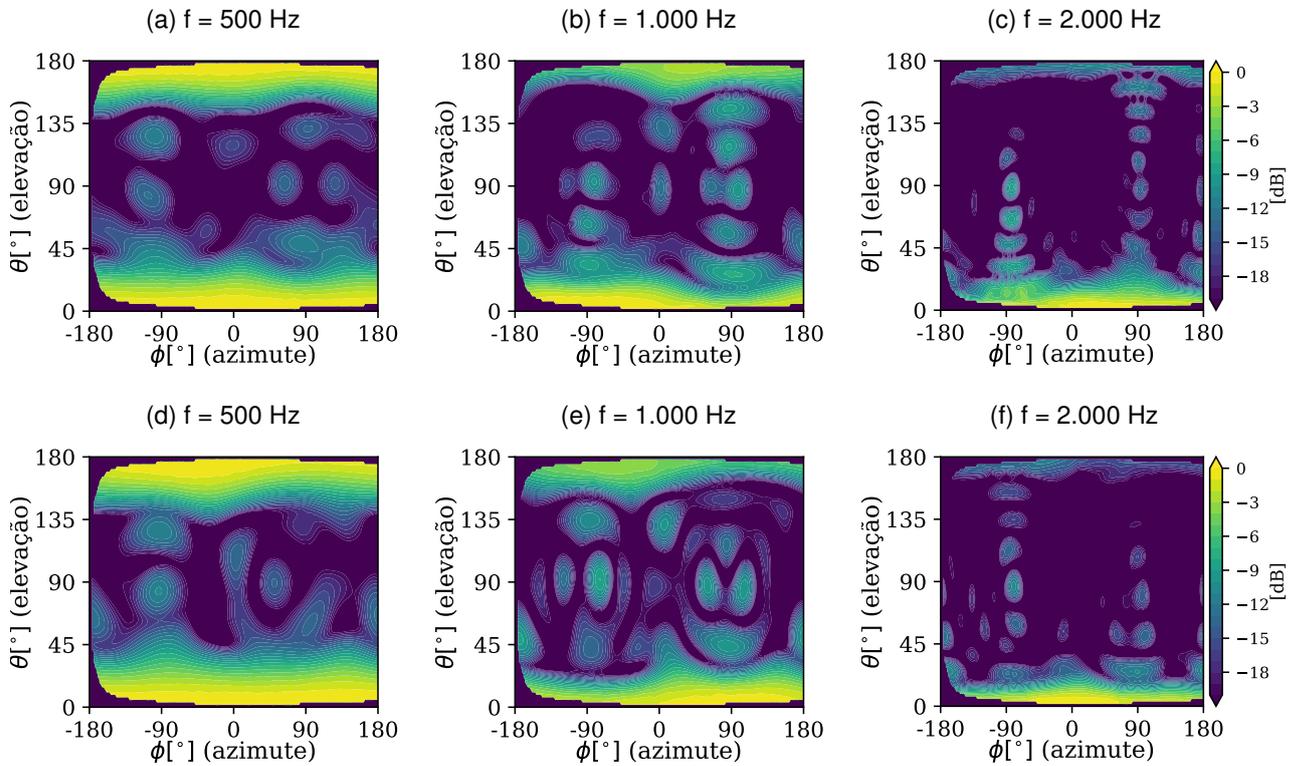
Nesta seção, os resultados e discussões focam no comportamento do espectro angular, na impedância  $\tilde{Z}_s$  e do coeficiente  $\alpha$  dos dois materiais.

#### 4.3.1 Espectros do número de onda (ou angular)

As Figuras 4.15a ~ 4.15f apresentam os espectros  $\tilde{P}(\theta, \phi)$  obtidos do ensaio com a placa Sonex – Figuras 4.15a ~ 4.15c são oriundas do ensaio com o DPA de  $36 \times 60 \text{ cm}^2$ ,

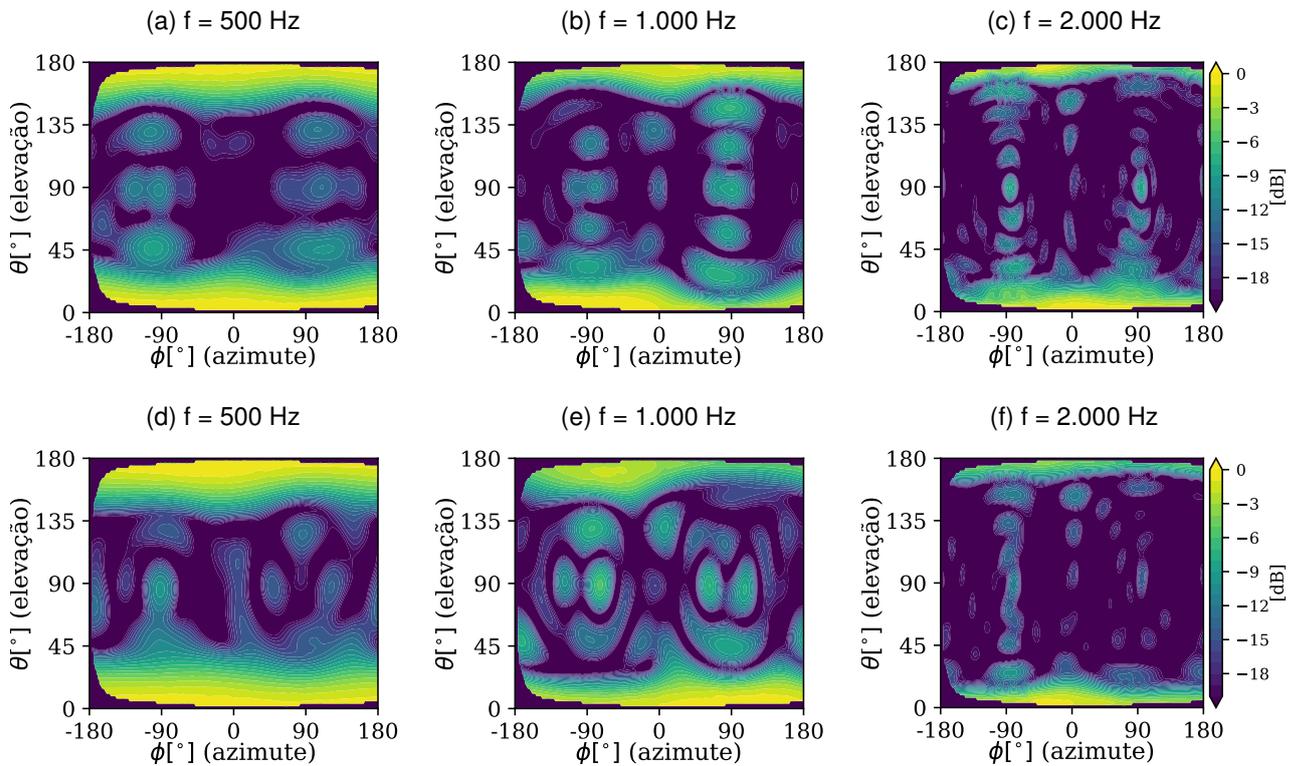
enquanto as Figuras 4.15d ~ 4.15f foram obtidas a partir do ensaio com o DPA de  $36 \times 44 \text{ cm}^2$ .

Figura 4.15 – Espectros  $\tilde{P}(\theta, \phi)$  (**Sonex**). Figs. (a)-(c): DPA  $36 \times 60 \text{ cm}^2$ ; (d)-(f): DPA  $36 \times 44 \text{ cm}^2$ .



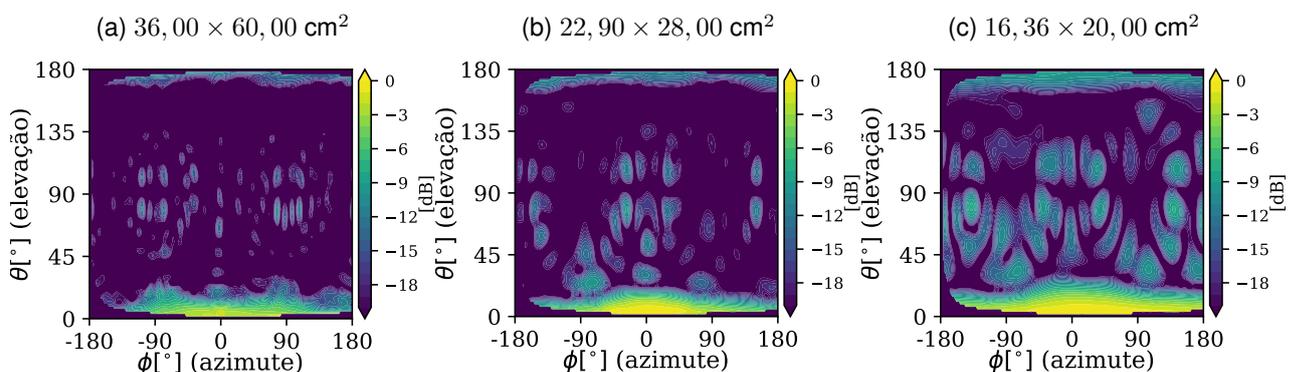
Os espectros tridimensionais ( $\tilde{P}(\mathbf{k})$ ) dos casos apresentados nas Figuras 4.15a~4.15f podem ser consultados no Apêndice B. Para a amostra de melamina, os espectros  $\tilde{P}(\theta, \phi)$  obtidos para os mesmos arranjos estão apresentados nas Figuras 4.16a ~ 4.16f, e, seus respectivos espectros  $\tilde{P}(\mathbf{k})$ , também estão constados no Apêndice B.

Figura 4.16 – Espectros  $\tilde{P}(\theta, \phi)$  (**Melamina**). Figs. (a)-(c): DPA  $36 \times 60 \text{ cm}^2$ ; (d)-(f): DPA  $36 \times 44 \text{ cm}^2$ .



Para ambos os materiais é possível notar a redução da largura dos lóbulos referentes à incidência direta, à medida que a frequência aumenta. A largura destes lóbulos está ligada ao comprimento de onda da frequência em questão, assim como do tamanho do arranjo utilizado – o comprimento de onda de altas frequências tem um tamanho menor, e portanto sua razão relativa ao tamanho do arranjo é menor. Para mostrar tal efeito, as Figuras 4.17a a 4.17c mostram os espectros  $\tilde{P}(\theta, \phi)$  para 4.000 Hz do ensaio com a placa Sonex a medida que o DPA de  $36 \times 60 \text{ cm}^2$  tem seu tamanho reduzido.

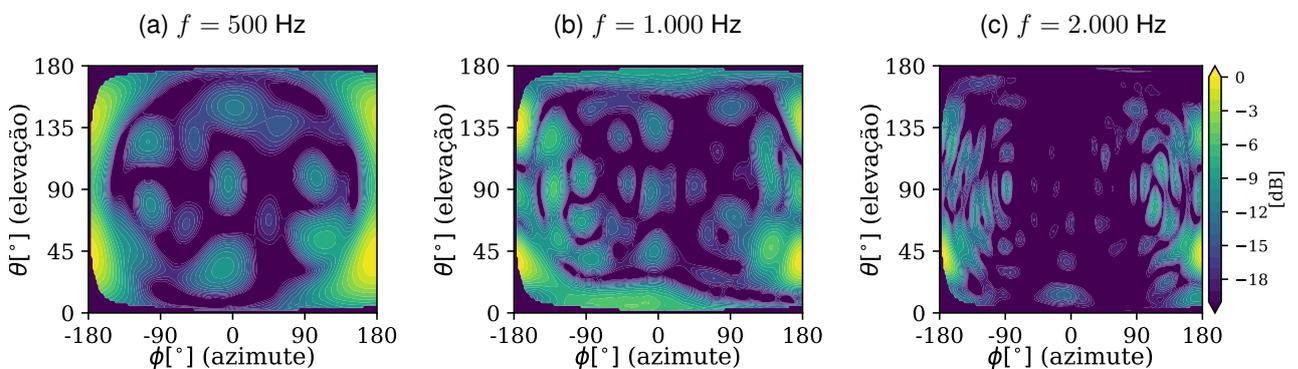
Figura 4.17 – Espectros  $\tilde{P}(\theta, \phi)$  (**Sonex**), para  $f = 4.000 \text{ Hz}$ , a medida que o DPA tem seu tamanho reduzido.



É preciso notar também que a magnitude do lóbulo associado a reflexão especular diminui com o aumento da frequência. Isso está relacionado ao aumento da absorção sonora com a frequência, o que ocorre para ambos os materiais medidos. Outra questão interessante é a presença de lóbulos laterais, não associados a incidência direta e reflexão especular. Em parte, estes estão associados aos fenômenos de difração causado pelo tamanho finito do material. Em parte, são o resultado de efeitos de ruído e resolução dos arranjos. É possível notar que tais lóbulos são resolvidos com maior resolução nos arranjos maiores. Sua magnitude tende a ser mais elevada para a amostra Melamina, que tem um tamanho menor. O estudo detalhado da difração, no entanto, é um fenômeno complexo (BRANDÃO; FERNANDEZ-GRANDE, 2022) e fora do escopo deste trabalho.

Utilizando apenas a placa Sonex, as Figuras 4.18a a 4.18c mostram os espectros  $\tilde{P}(\theta, \phi)$  obtidos a partir do ensaio com a fonte sonora a  $\theta = 45^\circ$  e  $\phi = 180^\circ$ , em relação ao material. Apesar do autor ter tido cautela no posicionamento (manual) da fonte sonora, os espectros  $\tilde{P}(\theta, \phi)$  mostram que a incidência direta atingiu o arranjo em um ângulo de até  $2^\circ$  inferiores a  $45^\circ$ . Novamente, é possível notar a presença do lóbulo associado a incidência direta ( $\theta \approx 45^\circ$ ), do lóbulo associado a reflexão especular ( $\theta \approx 135^\circ$ ), cuja magnitude diminui com o aumento da frequência, e dos lóbulos secundários. Os espectros  $\tilde{P}(\mathbf{k})$  relativos aos casos das Figuras 4.18a a 4.18c estão apresentadas no Apêndice B.

Figura 4.18 – Espectros  $\tilde{P}(\theta, \phi)$  (Sonex) para incidência oblíqua de 45 graus.



#### 4.4 RECONSTRUÇÃO DE $Z_s$ E DE $\alpha_{rec}$

As Figuras 4.19a e 4.19b mostram, respectivamente, as curvas de impedância de superfície e de absorção da placa Sonex, que foram obtidas com os DPA de  $36 \times 60 \text{ cm}^2$  e  $36 \times 44 \text{ cm}^2$ . Da mesma maneira, as Figuras 4.20a e 4.20b fazem as mesmas comparações para a Melamina. É possível notar que as curvas de impedância e absorção obtidas pelos dois arranjos são condizentes com o que se espera para ambos os materiais medidos (BRANDÃO, 2011). Note que o coeficiente de absorção da placa Sonex é mais

elevado que o da Melamina, o que está associado a sua maior espessura (ver Figura 3.12). No futuro se planeja uma comparação de tais resultados com outros métodos (e.g. tubo de impedância e/ou modelos de propagação em materiais porosos). Além disso, se almeja uma análise mais detalhada dos efeitos de difração na medição de amostras finitas.

Figura 4.19 – Impedância  $Z_s$  e coef. de absorção  $\alpha_{rec}$ , da placa **Sonex**, obtidas com os arranjos (DPA) de  $36 \times 60 \text{ cm}^2$  e de  $36 \times 44 \text{ cm}^2$ .

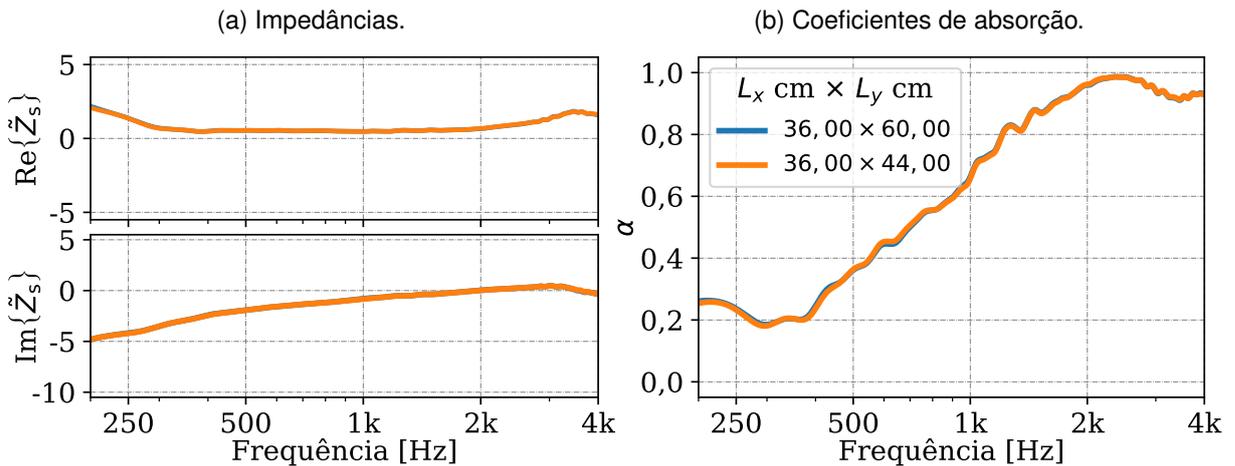
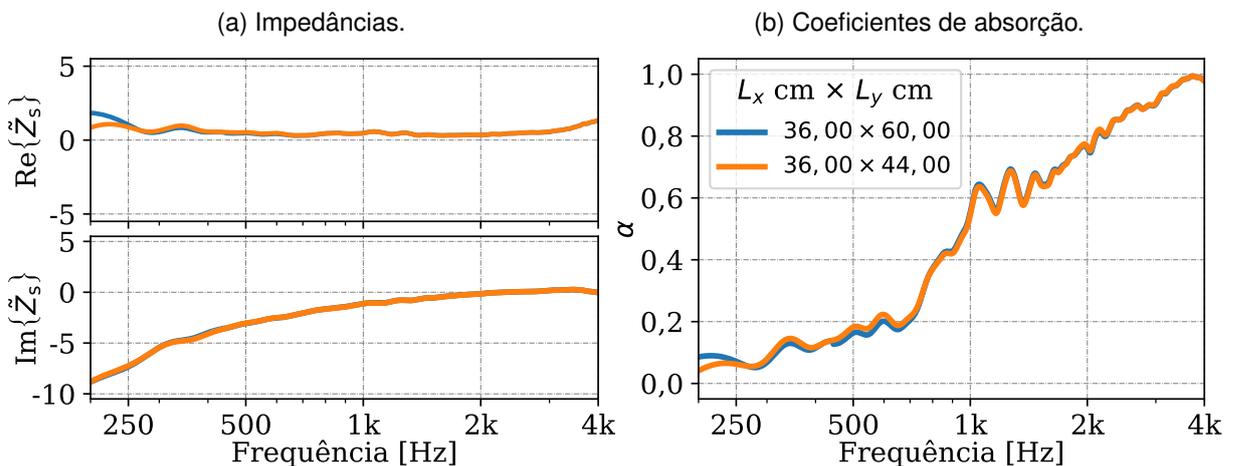
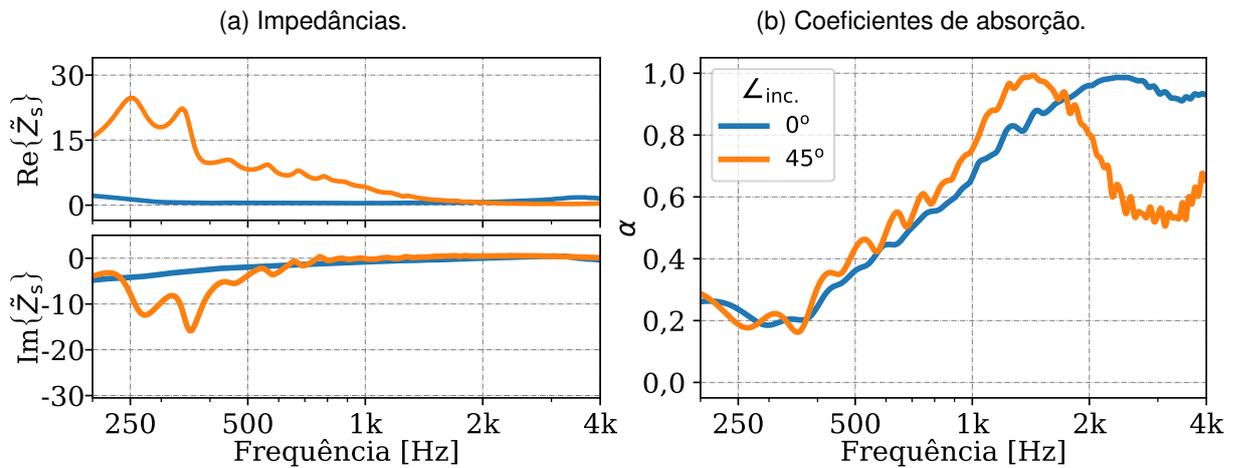


Figura 4.20 – Impedância  $Z_s$  e coef. de absorção  $\alpha_{rec}$  da **melamina**, obtidas com os arranjos (DPA) de  $36 \times 60 \text{ cm}^2$  e de  $36 \times 44 \text{ cm}^2$ .



As Figuras 4.21a e 4.21b comparam a impedância  $\tilde{Z}_s$  e o coeficiente  $\alpha_{rec}$  para os ângulos de incidência de  $0^\circ$  e  $45^\circ$ . A Figura 4.21b mostra que o coeficiente de absorção obtido para incidência oblíqua demonstrou um comportamento aparentemente incorreto, principalmente em altas frequências. Não menos importante, o tamanho finito do material causa deturpações na premissa dele ser localmente reativo, assim levando a maiores oscilações na impedância  $\tilde{Z}_s$  reconstruída para baixas frequências. No entanto, o viés presente na curva de absorção da Figura 4.21b não foi descoberto.

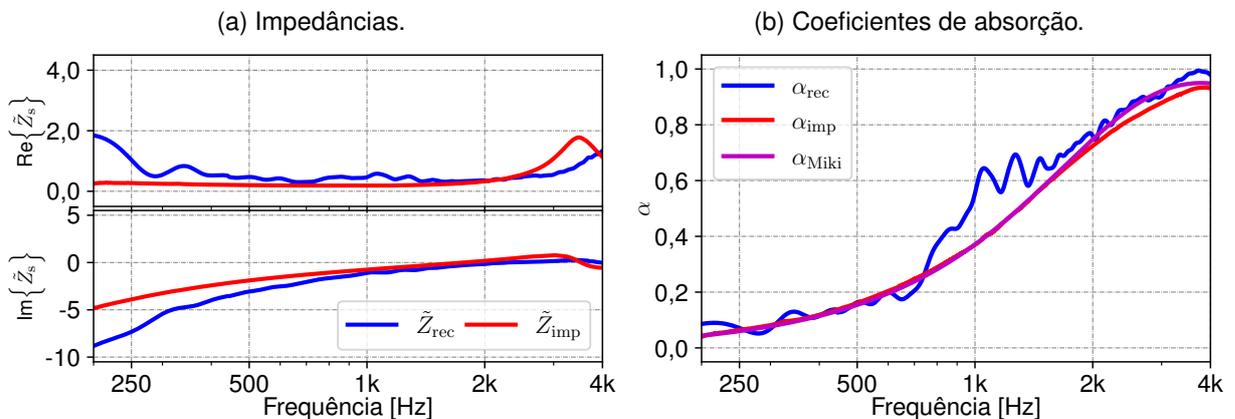
Figura 4.21 – Impedância  $Z_s$  e coef. de absorção  $\alpha_{rec}$  da placa **Sonex**, obtidas com os arranjos (DPA) de  $36 \times 60 \text{ cm}^2$ , para incidência normal (0 graus) e oblíqua (45 graus).



#### 4.4.1 Comparação com resultados obtidos com outras metodologias

As Figuras 4.22a e 4.22b comparam a impedância de superfície e o coeficiente de absorção da melamina, respectivamente, obtidos por este trabalho (i.e.  $\alpha_{rec}$ ) e pelo ensaio no tubo de impedância (i.e.  $\alpha_{imp}$ ). Utilizando a resistividade ao fluxo da melamina, i.e.  $\sigma = 10.998 \text{ rayl} \cdot \text{m}^{-1}$ , a Figura 4.22b também conta com a estimativa empírica calculada com o o modelo de Miki, Y., i.e.  $\alpha_{Miki}$ . Além disso,  $\alpha_{rec}$  foi obtido com o ensaio do DPA de  $36 \times 60 \text{ cm}^2$  ( $n_{x,y} = 12 \times 16$ ).

Figura 4.22 – Comparação entre as impedâncias e os coeficientes de absorção, da melamina, obtidas neste trabalho, pelo ensaio no tubo de impedância além da estimativa empírica pelo modelo de Miki.



Apesar da existência de diferenças intrínsecas entre as metodologias, os resultados de impedância e de absorção apresentados nas Figuras 4.22a e 4.22b mostraram curvas

com valores muito próximos ao longo de boa parte do espectro. No caso das impedâncias, diferenças maiores foram observadas para as frequências mais baixas do espectro, para as quais ambas as metodologias possuem uma confiança menor. Não menos importante, as curvas de absorção também convergiram para resultados próximos por boa parte do espectro, com exceção da região entre 800 ~ 1.200 Hz.

#### 4.4.2 Variação do tamanho do arranjo

A Tabela 3.4 indica que foram analisados os efeitos da redução da área de medição coberta pelo arranjo, mantendo sua resolução espacial. A partir do DPA de  $12 \times 12$  pontos (i.e.  $L_{x,y} = 36,00 \times 44,00 \text{ cm}^2$ ), uma redução foi aplicada para  $n_{x,y} = 10 \times 10$  pontos (i.e.  $L_{x,y} = 29,45 \times 36,00 \text{ cm}^2$ ), e depois para  $n_{x,y} = 8 \times 8$  (i.e.  $L_{x,y} = 22,90 \times 28,00 \text{ cm}^2$ ) e para  $n_{x,y} = 6 \times 6$  pontos (i.e.  $L_{x,y} = 16,36 \times 20,00 \text{ cm}^2$ ). Para estes casos, as respectivas impedâncias de superfície e coeficientes de absorção da placa Sonex, estão apresentados nas Figuras 4.23a e 4.23b, enquanto as Figuras 4.24a e 4.24b apresentam a mesma análise feita com a Melamina.

Figura 4.23 – Impedância  $Z_s$  e coef. de absorção  $\alpha_{rec}$ , da placa **Sonex**, obtidos na redução do tamanho do arranjo.

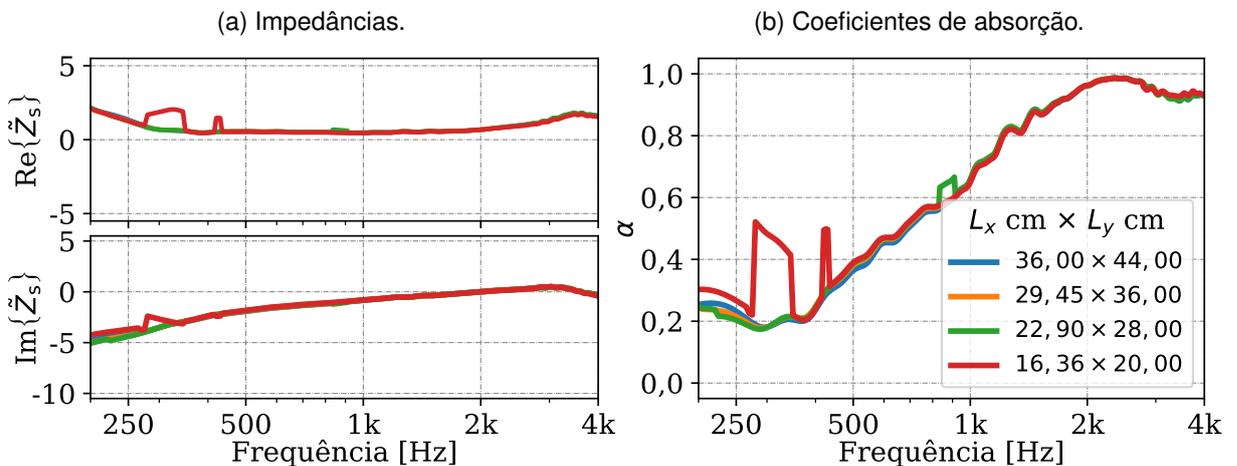
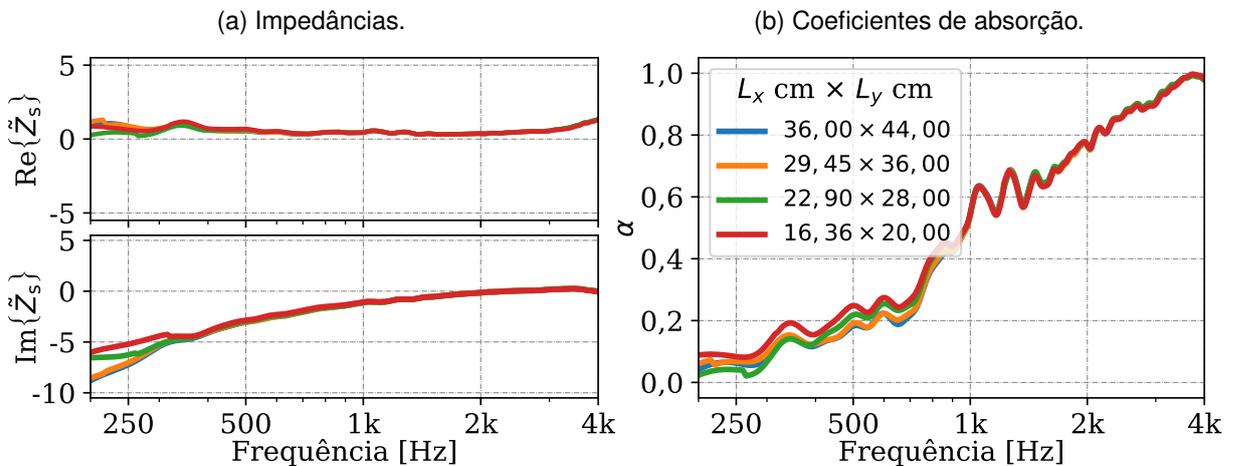


Figura 4.24 – Impedância  $Z_s$  e coef. de absorção  $\alpha_{rec}$  da **melamina**, obtidos na redução do tamanho do arranjo.



As Figuras 4.23a ~ 4.24a mostram que não há diferenças significativas dos parâmetros reconstruídos ( $\tilde{Z}_s$  e  $\alpha_{rec}$ ) quando reduz-se o tamanho do arranjo. Apenas o caso do menor DPA processado ( $16,36 \times 20,00 \text{ cm}^2$ ) gerou discrepâncias entre as frequências de 250 Hz e 500 Hz, o que está associado ao pequeno tamanho do arranjo relativo ao comprimento de onda. Considerando a velocidade do som  $c \approx 340 \text{ m.s}$ , para  $250 \text{ Hz} \leq f \leq 500 \text{ Hz}$  o comprimento de onda é de  $136 \text{ cm} \leq \lambda \leq 68 \text{ cm}$ , respectivamente, o que é consideravelmente maior que o DPA de  $16,36 \times 20,00 \text{ cm}^2$ . Isso significa que o arranjo cobre apenas uma fração pequena do comprimento de onda para baixas frequências, o que diminui a precisão dos resultados finais.

#### 4.4.3 Variação da resolução espacial do arranjo

A análise da variação da resolução espacial também foi realizada a partir do DPA de  $12 \times 12$  pontos (i.e.  $L_{x,y} = 36,00 \times 44,00 \text{ cm}^2$ ). Sem alterar o seu tamanho, primeiro foram desconsideradas fileiras (de pontos gravados) perpendiculares ao eixo Y (vide Figura 3.9a), de maneira que  $\delta_y$  é triplicado (vide Figura 3.8a), e os resultados estão representados pelas curvas "red. Y" nas Figuras 4.25a ~ 4.26b. A segunda remoção de pontos gravados foi realizada de maneira que  $\delta_x$  também fosse triplicado, e, nas Figuras 4.25a ~ 4.26b, tais resultados estão representados pelas curvas "red. Y e X". Uma outra análise foi realizada desconsiderando linhas retangulares de pontos (vide Figura 3.9a), e os resultados estão representados pelas curvas "red. XY" das Figuras 4.25a ~ 4.26b.

Figura 4.25 – Impedância  $Z_s$  e coef. de absorção  $\alpha_{rec}$  da placa **Sonex**, obtidos na redução do da resolução espacial do arranjo.

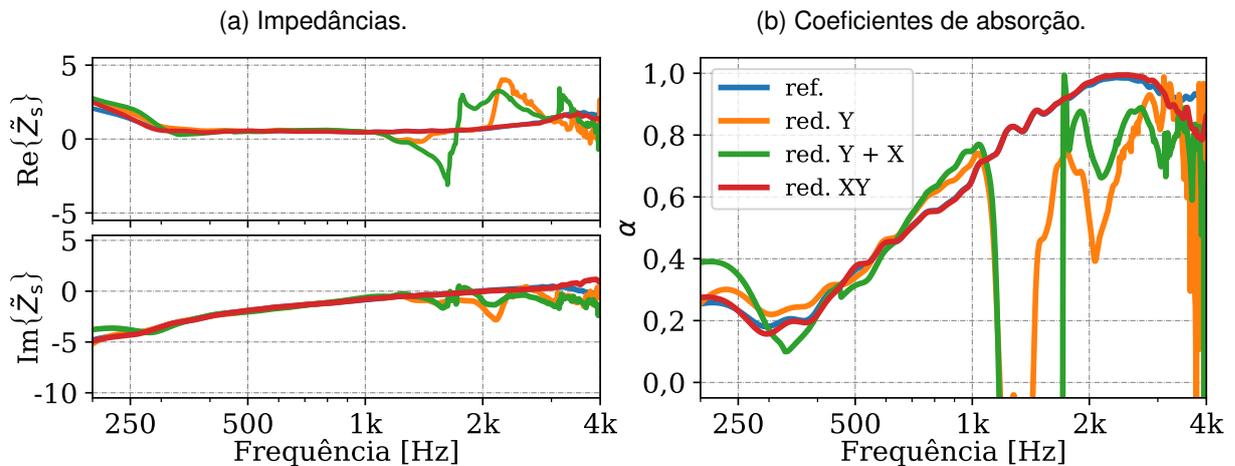
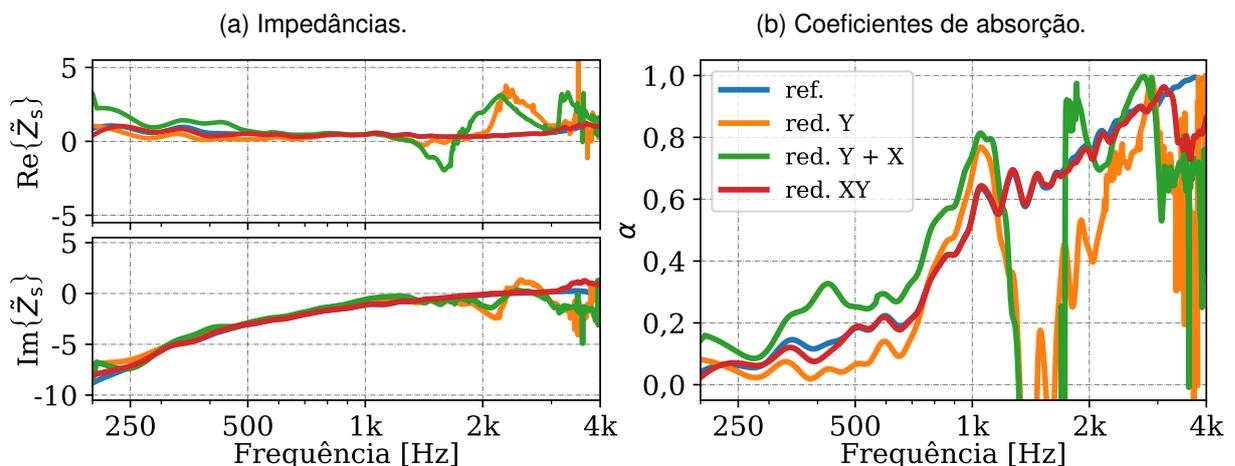


Figura 4.26 – Impedância  $Z_s$  e coef. de absorção  $\alpha_{rec}$  da **melamina**, obtidos na redução do da resolução espacial do arranjo.

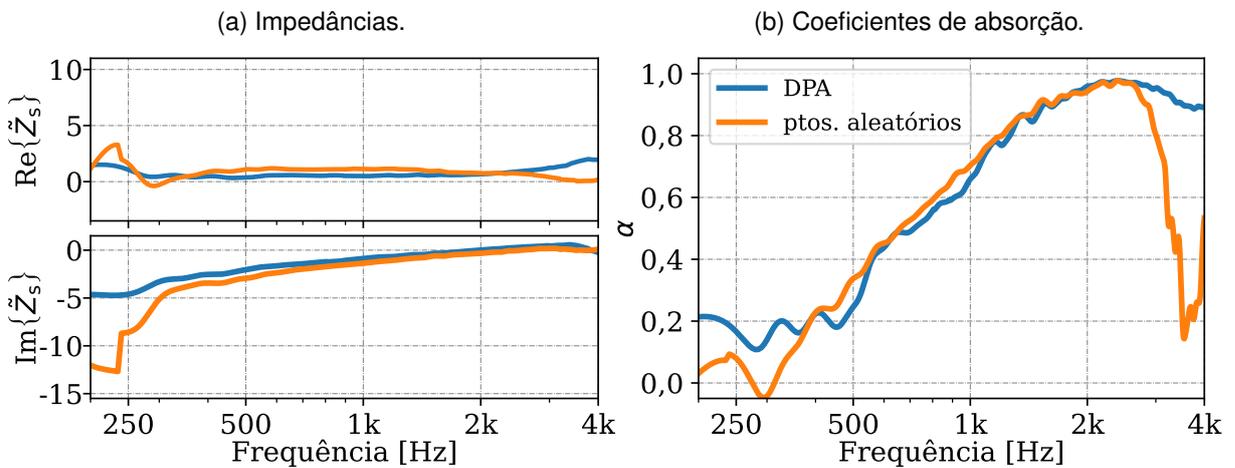


Os gráficos das Figuras 4.25a ~ 4.26b mostram que a resolução espacial do arranjo tem uma grande influência nos respectivos resultados, provocando flutuações, que são maiores com o aumento da frequência. Comparando com a curva de referência em azul, esta relativa à absorção obtida com o DPA de  $36 \times 60 \text{ cm}^2$ , o DPA da Figura 3.9b foi o caso de menor discrepância. Isso indica que se a resolução espacial é diminuída da maneira que foi esquematizada na Figura 3.9a, as variações nos resultados da reconstrução serão muito menores se comparadas com os outros casos que foram analisados. Em investigações futuras pretende-se averiguar se tais efeitos negativos são o resultado do mal condicionamento do problema inverso. Ademais, arranjos com diferentes geometrias podem levar a uma melhora no condicionamento do problema (RICHARD; FERNANDEZ-GRANDE, 2019), o que ainda carece de mais investigação.

#### 4.4.4 Variação do formato do arranjo

A última análise experimental foi realizada entre um arranjo DPA e um arranjo de pontos aleatórios, ambos com os pontos distribuídos por uma mesma área no espaço. O DPA é o mesmo utilizado na análise dos efeitos de condicionamento dos sinais, i.e.  $L_{x,y,z} = 28,0 \times 32,0 \times 2,9$  cm, e, dentro dessa mesma área, configurou-se 110 pontos aleatórios. O mesmo pós-processamento foi aplicado à ambos os casos, o que gerou as impedâncias e coeficientes de absorção que estão apresentados pelas Figuras 4.27a e 4.27b, respectivamente.

Figura 4.27 – Impedância  $Z_s$  e coef. de absorção  $\alpha_{rec}$  da amostra **Sonex** obtidos a partir do DPA de  $28 \times 32$  cm<sup>2</sup> e do arranjo de pontos randômicos.



A Figura 4.27b mostra que os resultados são coerentes entre si, ao longo de boa parte do espectro. No entanto, a geração das coordenadas aleatórias resultou, em algumas regiões do arranjo da Figura 3.10b, um distanciamento demasiado entre os pontos, o que faz o arranjo ter uma resolução espacial variável.

Ainda mais, na Figura 3.10b é possível observar a ausência de pontos em uma região significativa da área integrada pelo arranjo. A análise feita na Seção 4.4.3 mostrou que a alta resolução espacial do arranjo garante resultados mais estáveis para frequências altas (i.e. pequenos comprimentos de onda). A variação da resolução espacial envolvida no arranjo aleatório degrada a precisão dos resultados para frequências mais altas.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após a conclusão do desenvolvimento do protótipo e das análises feitas a partir dos ensaios, podem ser feitas algumas considerações finais a respeito dos resultados apresentados no Capítulo 4 e, também, sobre as próximas atividades em que o escâner será utilizado.

A análise das influências do janelamento temporal foi realizada no intuito de estabelecer os melhores valores para os parâmetros de sua configuração, os quais foram apresentados na Tabela 3.5. É importante salientar que não é obrigatório utilizar a janela Adrienne especificamente. A sua escolha foi feita em função do seu formato que, além de não apresentar comportamentos abruptos, possui uma configuração flexível que permitiu sintonizar a sua região linear (i.e.  $w(t) = 1, 0$ ) na estreita região da RI que contém o registro da incidência direta e difratada pelo material.

Durante a escolha dos arranjos e das análises que seriam discutidas neste trabalho, o autor baseou-se nas minúcias que elevam o tempo gasto para realizar o ensaio. O primeiro e óbvio fator é o número de pontos a serem gravados. Por exemplo, os ensaios com o DPA de  $36 \times 60 \text{ cm}^2$  que contém 384 pontos precisou de 4 horas e 27 minutos para ser executado. No entanto, as análises feitas com os materiais medidos (discutidas na Seção 4.4.2) mostraram que a curva de absorção dos materiais não sofreu alterações significativas mesmo reduzindo esse arranjo para 128 pontos (um terço do número de pontos medidos) e para uma área quase 7 vezes menor ( $16, 36 \times 20, 00 \text{ cm}^2$ ), sendo que sua resolução espacial permaneceu alta<sup>1</sup> e constante. Então, se o objetivo de um suposto ensaio com um DPA de  $N$  pontos for apenas medir a absorção de um material, ter-se-ão resultados mais confiantes configurando estes  $N$  pontos de maneira que ambos os espaçamentos  $\delta_x$  e  $\delta_y$  sejam minimizados, mas com a devida atenção para não deixar o DPA com dimensões muito menores em relação ao comprimento de onda da menor frequência analisada.

No Capítulo 3 foi discutido que o espectro  $\tilde{P}(\mathbf{k})$  é utilizado para reconstruir a pressão sonora na superfície do material. Mais do que isso, alguns traços do seu comportamento para diferentes frequências podem ser considerados como indícios de que a decomposição do campo foi feita de maneira correta. Considerando os ensaios que analisaram os materiais porosos, três desses traços dizem respeito à **posição**, **magnitude** e ao **tamanho** do lóbulo decomposto da incidência direta. O ângulo de elevação precisa estar de acordo com a posição da fonte sonora no cenário. Por exemplo, para incidência normal esse lóbulo precisa estar localizado em  $\theta = 0^\circ$ , o que foi constatado no espectro  $\tilde{P}(\theta, \phi)$  dos resultados apresentados no Capítulo 4. Ademais, com o aumento da frequência observou-se a redução do tamanho lóbulo da incidência direta, ao mesmo tempo que a magnitude

---

<sup>1</sup>O que é função da frequência máxima de análise.

do lóbulo da pressão refletida reduziu drasticamente. Ambos esses comportamentos de  $\tilde{P}(\theta, \phi)$  condizem com o que era esperado, já que o tamanho do lóbulo está ligado ao encurtamento do comprimento de onda, enquanto a magnitude do lóbulo da pressão refletida reduziu com a atenuação do material poroso.

As curvas de impedância e de absorção apresentadas no Capítulo 4 também condizem com o que se espera de um material poroso, com exceção do caso da incidência oblíqua (Figuras 4.21a e 4.21b). Os possíveis vieses de processamento foram verificados pelo autor. É importante salientar que, momentos anteriores à realização do ensaio com incidência oblíqua, uma das roldanas do guia de atuador vertical quebrou, o que obrigou o autor a dividir o ensaio em duas partes – na primeira, foram gravados os pontos do plano inferior do DPA e, depois de mudar manualmente a altura do microfone, os pontos do plano superior do DPA foram gravados na segunda parte. Esta mudança manual pode ter afetado a precisão da posição do microfone.

Desconsiderando o caso de incidência oblíqua, todos os demais casos apresentados no Capítulo 4 foram condizentes com o que era esperado – considerando desde as características do espectro  $\tilde{P}(\mathbf{k})$  para diferentes frequências, até o comportamento da impedância e do coeficiente de absorção reconstruídos.

## 5.1 DIFICULDADES E TRABALHOS FUTUROS

A pandemia do vírus Sars-CoV-2 começou 3 semanas depois do início do programa de pós-graduação do autor. Por causa disso, a construção e os testes iniciais do protótipo foram realizados em sua cidade natal, no interior do estado de São Paulo. Além disso, a pandemia impediu o acesso ao laboratório por vários meses, o que inevitavelmente atrasou o progresso da pesquisa feita por este trabalho.

No mês de setembro de 2022 serão realizadas algumas melhorias na estrutura do escâner. Sua capacidade de varredura ao longo do eixo  $x$  será estendida. Isso permitirá que a área escaneada extrapole todas as bordas de uma amostra porosa, o que possibilitará uma análise mais precisa de suas influências. Além dessa investigação, os ensaios futuros pretendem executar uma análise de incertezas ligadas à precisão do posicionamento do microfone, com o intuito de observar os efeitos da mudança das coordenadas consideradas na decomposição.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRANDÃO, E. **Análise teórica e experimental do processo de medição in situ da impedância acústica**. 2011. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2011. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/95225>>.

BRANDÃO, E. **Acústica de Salas: Projeto e Modelagem**. 1. ed. São Paulo: Blucher, 2016. ISBN 978-8521210061.

BRANDÃO, E.; FERNANDEZ-GRANDE, E. Analysis of the sound field above finite absorbers in the wave-number domain. **The Journal of the Acoustical Society of America**, Acoustical Society of America, v. 151, n. 5, p. 3019–3030, 2022.

FERNANDEZ-GRANDE, E. Sound field reconstruction using a spherical microphone array. **The Journal of the Acoustical Society of America**, Acoustical Society of America, v. 139, n. 3, p. 1168–1178, 2016.

FONSECA, W. D'A.. **Beamforming considerando difração acústica em superfícies cilíndricas**. 2013. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2013. ISBN 978-8591677405. Disponível em: <<http://www.bu.ufsc.br/teses/PEMC1445-T.pdf>>.

FONSECA, W. D'A. et al. Pytta: Open source toolbox for acoustic measurement and signal processing. In: **Proceedings of the 23rd International Congress on Acoustics (ICA)**. Aachen, Germany: [s.n.], 2019. p. 1–8. ISBN 978-3939296157.

GARAI, M.; GUIDORZI, P. European methodology for testing the airborne sound insulation characteristics of noise barriers in situ: Experimental verification and comparison with laboratory data. **The Journal of the Acoustical Society of America**, Acoustical Society of America, v. 108, n. 3, p. 1054–1067, 2000.

GOVER, B.; RYAN, J.; STINSON, M. Microphone array measurement system for analysis of directional and spatial variations of sound fields. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 112, p. 1980–1991, 2002.

HALD, J. Basic theory and properties of statistically optimized near-field acoustical holography. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 125, n. 4, p. 2105–2120, 2009.

HALD, J. et al. In-situ impedance and absorption coefficient measurements using a double-layer microphone array. **Applied Acoustics**, v. 143, p. 74–83, 2018.

HANSEN, C. P. **Rank-Deficient and Discrete Ill-Posed Problems**. 1. ed. Society for Industrial and Applied Mathematics, 1998. ISBN 0898714036. Disponível em: <<https://orbit.dtu.dk/en/publications/rank-deficient-and-discrete-ill-posed-problems-numerical-aspects->>>.

HANSEN, P. C. **Discrete inverse problems. Insight and algorithms**. 1. ed. [S.l.]: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2010. ISBN 978-0898716962.

JOHNSON, D. H.; DUDGEON, D. E. **Array Signal Processing: Concepts and Techniques**. [S.l.]: Prentice Hall PTR, 1993. 512 p. ISBN 978-0130485137.

KLEINER, M.; GUSTAFSSON, H.; BACKMAN, J. Measurement of directional scattering coefficients using near-field acoustic holography and spatial transformation of sound fi-

elds. In: AUDIO ENGINEERING SOCIETY. **Proceedings of the 99th Audio Engineering Society Convention, New York, USA**. 1995. p. 331–346. Disponível em: <<https://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=7857>>.

MAYNARD, J. D.; WILLIAMS, E. G.; LEE, Y. Nearfield acoustic holography: I. Theory of generalized holography and the development of NAH. **The Journal of the Acoustical Society of America**, Acoustical Society of America, v. 78, n. 4, p. 1395–1413, 1985.

MIKI, Y. Acoustical properties of porous materials - modifications of delany-bazley models -. **Journal of the Acoustical Society of Japan (E)**, v. 11, n. 1, p. 19–24, 1990.

NOLAN, M. Estimation of angle-dependent absorption coefficients from spatially distributed in situ measurements. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 147, n. 2, p. EL119–EL124, 2020.

NOLAN, M. et al. Experimental characterization of the sound field in a reverberation room. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 145, p. 2237–2246, 2019.

OTTINK, M. et al. Finite surface method to measure the sound absorption coefficient at oblique incidence. In: . [S.l.: s.n.], 2015. p. 5.

PARK, M.; RAFAELY, B. Sound-field analysis by plane-wave decomposition using spherical microphone array. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 118, p. 3094–3103, 2005.

PHILIPS, D. L. A technique for the numerical solution of certain integral equations of the first kind. **Association for Computing Machinery**, v. 9, n. 1, p. 84–97, 1962.

RICHARD, A. et al. Characterization of sound scattering using near-field pressure and particle velocity measurements. **The Journal of the Acoustical Society of America**, ASA, v. 146, n. 4, p. 2404–2414, 2019.

RICHARD, A.; FERNANDEZ-GRANDE, E. Comparison of two microphone array geometries for surface impedance estimation. **The Journal of the Acoustical Society of America**, ASA, v. 146, n. 1, p. 501 – 504, 2019.

RICHARD, A. et al. Estimation of surface impedance at oblique incidence based on sparse array processing. **The Journal of the Acoustical Society of America**, ASA, v. 141, n. 6, p. 4115–4125, 2017. ISSN 0001-4966.

SCHUHMACHER, A. et al. Sound source reconstruction using inverse boundary element calculations. **The Journal of the Acoustical Society of America**, Acoustical Society of America, v. 113, n. 1, p. 114–127, 2003.

SIJTSMAN, P. Experimental techniques for identification and characterisation of noise sources. In: **Advances in Aeronautics & Applications – VKI Lecture Series**. Rhode-Saint-Genèse, Belgium: [s.n.], 2004. Also in Netherlands Aerospace Centre (NLR) Technical Reports (NLR-TP-2004-165). Disponível em: <<https://bit.ly/NLR-TP-2004-165>>.

TAMURA, M. Spatial Fourier transform method of measuring reflection coefficients at oblique incidence. I: Theory and numerical examples. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 88, n. 5, p. 2259–2264, 1990.

TAMURA, M.; ALLARD, J.; LAFARGE, D. Spatial Fourier-transform method for measuring reflection coefficients at oblique incidence. II: Experimental results. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 97, n. 4, p. 2255–2262, 1995.

TERRA, F. A. **Aplicação da Curva L em Problemas Inversos: Metodologias de Extração do Parâmetro Ótimo de Regularização**. 2007. Dissertação (Bachelor's Thesis) — Universidade Federal da Bahia, Salvador, BA, Brazil, 2007.

TIKHONOV, A. N. Solution of incorrectly formulated problems and the regularization method. **Soviet Mathematics Doklady**, v. 4, n. 1, p. 1035–1038, 1963.

VELHO, H. F. C. **Problemas Inversos: Conceitos Básicos e Aplicações**. [S.l.], 2001.

ZEA, E. **Sound field separation with microphone arrays**. 2017. Tese (Doutorado) — KTH Engineering Sciences, Stockholm, Sweden, 2017. ISBN 1651-7660. Disponível em: <<https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1157713/FULLTEXT01.pdf>>.

## APÊNDICE A – IMAGENS DO ESCÂNER

Figura A.1 – Imagens ampliadas de algumas partes do escâner.

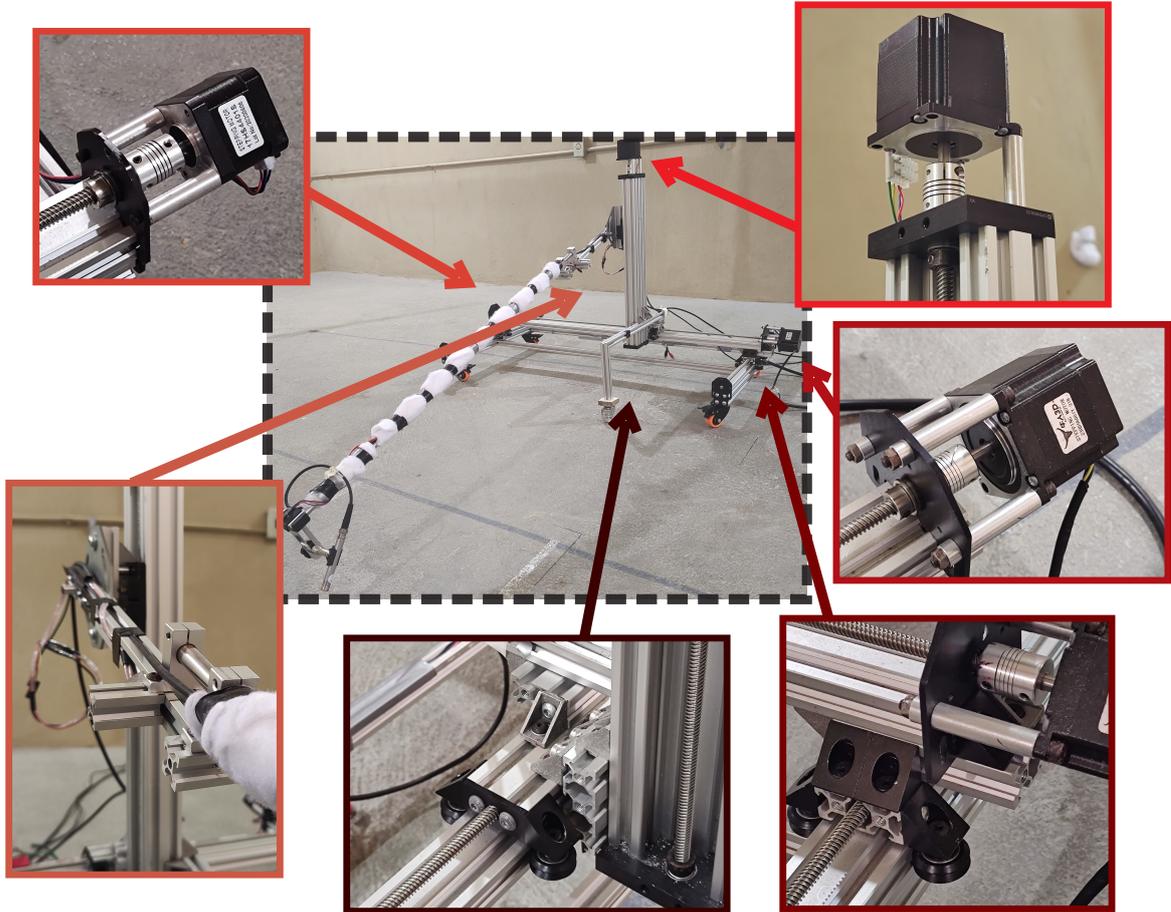


Figura A.2 – Fotos tiradas do escâner logo depois que foi montado pela primeira vez.

(a) Foto 1.



(b) Foto 2.



Figura A.3 – Foto do estado atual do escâner.



## APÊNDICE B – ESPECTROS $\tilde{P}(\mathbf{k})$

Figura B.1 – Espectros  $\tilde{P}(\mathbf{k})$  (Sonex). Figs. (a)-(c): DPA  $36 \times 60 \text{ cm}^2$ ; (d)-(f): DPA  $36 \times 44 \text{ cm}^2$ .

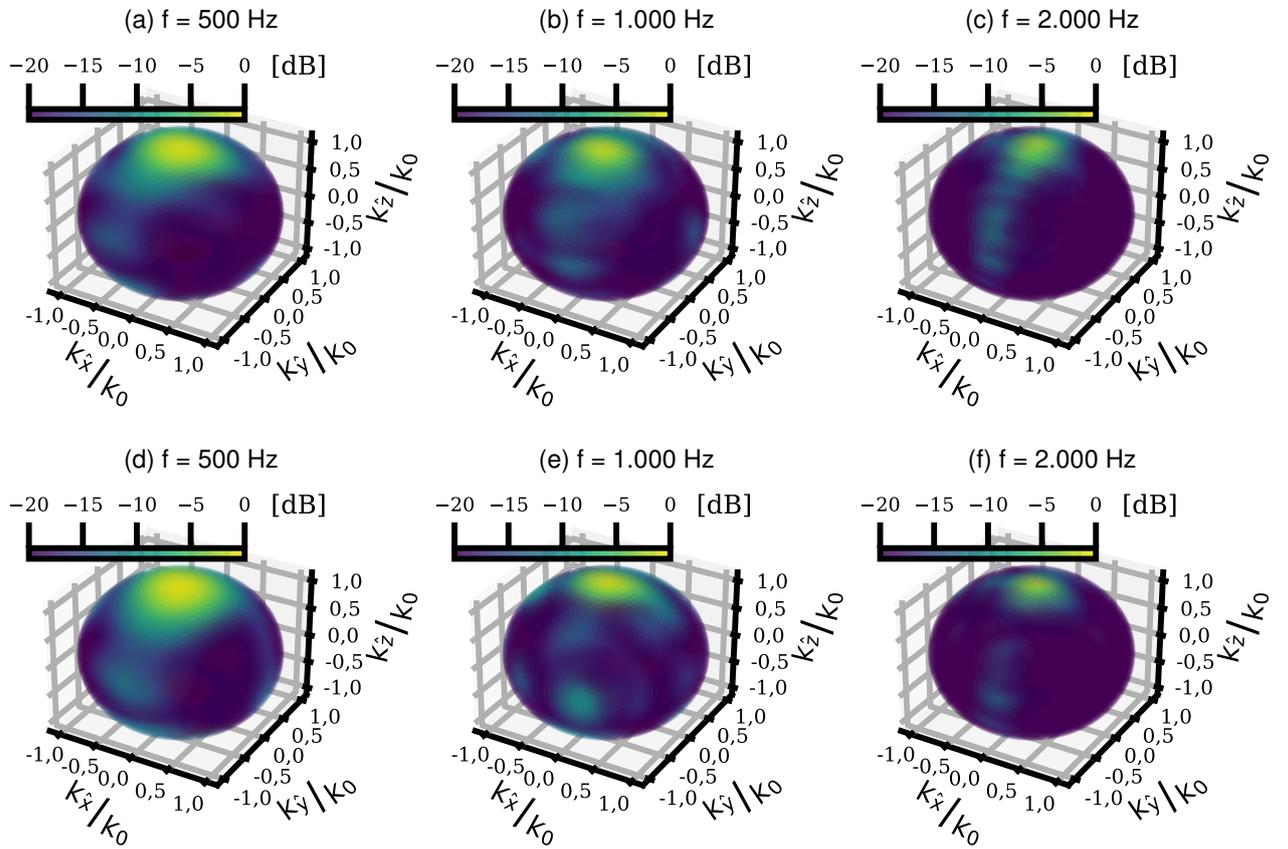


Figura B.2 – Espectros  $\tilde{P}(\mathbf{k})$  (**Melamina**). Figs. (a)-(c): DPA  $36 \times 60 \text{ cm}^2$ ; (d)-(f): DPA  $36 \times 44 \text{ cm}^2$ .

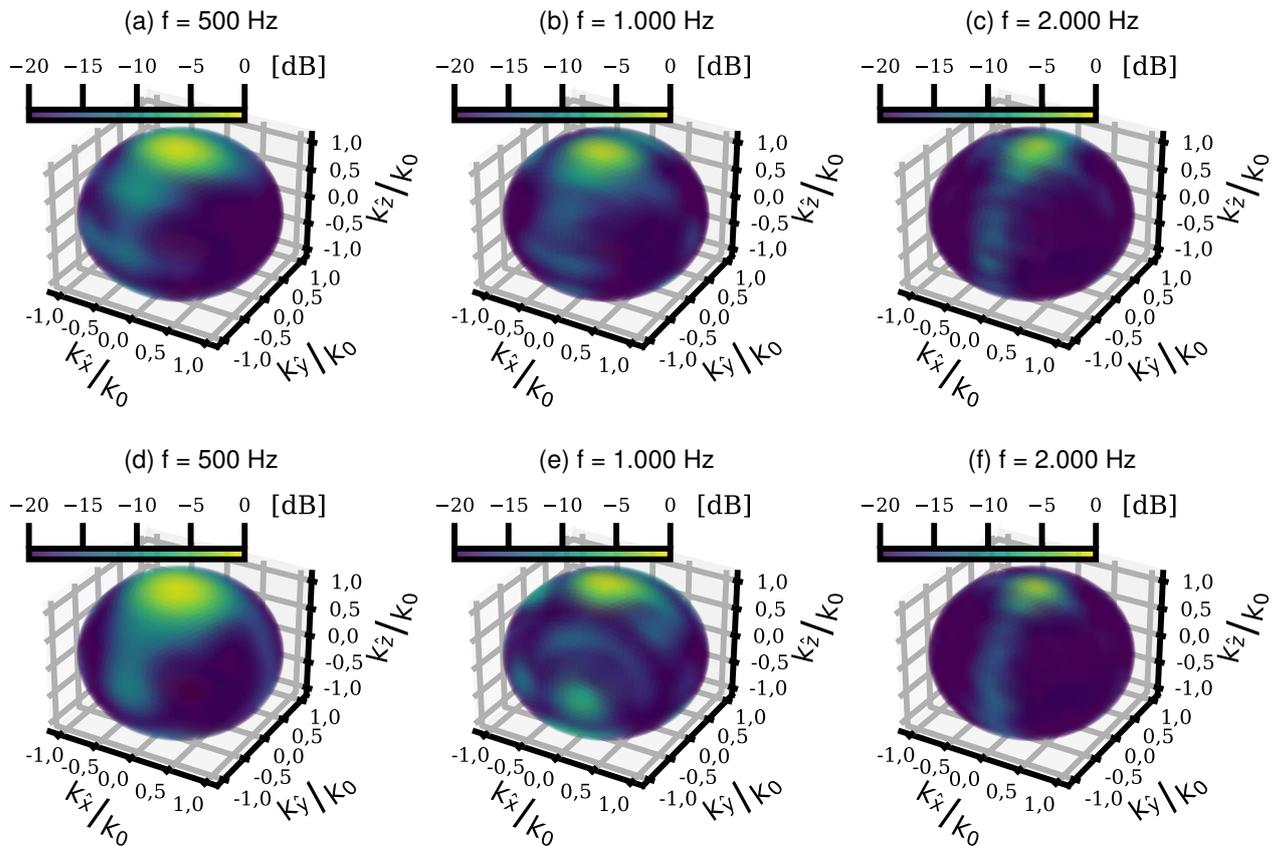


Figura B.3 – Espectros  $\tilde{P}(\mathbf{k})$  (**Sonex**) para incidência oblíqua ( $45^\circ$ ) no DPA de  $36 \times 60 \text{ cm}^2$ .

