

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia

Departamento de Engenharia Elétrica

METODOLOGIA PARA O TRATAMENTO ACÚSTICO
DE SALAS E ESTUDO DE CASO

Aluno: Bruno Zin Almas

São Carlos - SP

BRUNO ZIN ALMAS

METODOLOGIA PARA O TRATAMENTO ACÚSTICO
DE SALAS E ESTUDO DE CASO

Trabalho de conclusão de curso apresentado
como requisito parcial para a obtenção do
título de bacharel em Engenharia Elétrica
pela Universidade Federal de São Carlos.

Orientador: Carlos Alberto De Francisco.

São Carlos - SP

Fevereiro de 2025

ALMAS, Bruno Zin

Metodologia para o tratamento acústico de salas e estudo de caso / Bruno Zin Almas. — 2025.

97 f.

Trabalho de Conclusão de Curso
Bacharelado em Engenharia Elétrica – UFSCar,
São Carlos, 2025

1. Acústica. 2.Tratamento. 3. Absorvedor.
Metodologia para o tratamento acústico de salas e estudo de caso.

Metodologia para o tratamento acústico de salas e estudo de caso.

Bruno Zin Almas

Trabalho de conclusão de curso apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de São Carlos.

Aprovado em: 21/02/2025.

BANCA EXAMINADORA

Orientador

Carlos Alberto De Francisco
UFSCar

Membro da banca (1)

José Carlos Pizolato Junior
UFSCar

Membro da banca (2)

Robson Barcellos
UFSCar

Dedico este trabalho à minha família: a todo o suporte e amor que me foi dado ao longo de todos esses anos de graduação pelos meus pais Fabio e Flaviane e à amizade da minha irmã Luíza, que sem dúvida me incentivaram em minha jornada acadêmica, e ao carinho e contato próximo dos meus avós Vera e Osmar.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à orientação do professor Carlos Alberto De Francisco pela orientação e instrução ao longo de todo o desenvolvimento do trabalho, ao suporte financeiro dele e do grupo de áudio e acústica da UFSCar por custear os materiais para o tratamento acústico realizado ao longo deste trabalho, como espumas, materiais para o ressoador, microfone e caixa de som, e por encontrar um ambiente disponível para o estudo de caso e tratamento proposto. Também agradeço ao professor, membro da banca avaliadora e do grupo de áudio e acústica da UFSCar, José Carlos Pizolato Junior, pelo suporte ao construir o Ressoador de Helmholtz utilizado neste trabalho, e pela Casa Espírita Sementinhas de Jesus, por ceder o lugar para o estudo e a realização deste trabalho.

RESUMO

ALMAS, Bruno Zin. **Metodologia para o tratamento acústico de salas e estudo de caso**. 2025. 107 folhas. Trabalho de conclusão de curso (bacharelado em Engenharia Elétrica) - UFSCar, São Carlos, 2025.

Este trabalho descreve uma metodologia para tratamento acústico de salas, bem como uma introdução teórica relevante para a atividade em questão, através de estudo bibliográfico da área. Para aplicação do conhecimento adquirido, foi realizado um tratamento de uma sala com perceptível baixa qualidade acústica, através de simulações, testes *in-loco*, e aplicação de diferentes soluções, com uma solução específica que foi a produção e teste de um Ressonador de Helmholtz. Para tanto, foram utilizados hardware como microfone e caixa de som, e softwares para a realização de varreduras, tratamento dos dados, e visualização dos resultados obtidos. Como solução, foram aplicadas medidas e ferramentas para o tratamento acústico, e uma verificação dos resultados obtidos com tais medidas.

Palavras-chave: Acústica. Tratamento. Som. Absorvedor.

ABSTRACT

ALMAS, Bruno Zin. **Metodologia para o tratamento acústico de salas e estudo de caso.** 2025. 107 pages. Degree (course) conclusion work (bachelor's degree in Electrical Engineering) - Ufscar, São Carlos, 2025.

This paper describes a methodology for acoustic treatment of rooms, as well as a relevant theoretical introduction to the activity in question, through a bibliographic study of the area. To apply the acquired knowledge, a treatment of a room with perceptibly low acoustic quality was carried out, through simulations, on-site tests, and application of different solutions, with a specific solution being the production and testing of a Helmholtz Absorber. For this purpose, hardware such as a microphone and speaker were used, and software for performing scans, data processing, and visualization of the obtained results. As a solution, measures and tools for acoustic treatment were applied, and a verification of the results obtained with such measures.

Keywords: Acoustics. Treatment. Sound. Absorber.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Gráfico de tempo de reverberação	16
Figura 2 - Tempo de reverberação ótimo (500Hz)	19
Figura 3 - Modos de ressonância em um tubo	23
Figura 4 - Modos de sala: axial, tangencial e oblíquo	24
Figura 5 - Modos acústicos e zonas de pressão em uma sala	25
Figura 6 - Absorção em um absorvedor	26
Figura 7 - Visão macroscópica, microscópica, e estrutura dos absorvedores	27
Figura 8 - Modelo de absorvedor de membrana	28
Figura 9 - Absorvedor de placa perfurada	29
Figura 10 - Exemplo de frequências absorvidas pelo Ressonador de Helmholtz ...	30
Figura 11 - Modelos típicos para absorvedores de membrana (a) e Helmholtz (b) .	32
Figura 12 - Exemplo de gráfico de cascata gerado pelo REW	37
Figura 13 - Interface do AMROC	38
Figura 14 - Interface do Acoustic Modelling	39
Figura 15 - Modos acústicos na sala, amcoustics	41
Figura 16 - Modos acústicos na sala, REW	41
Figura 17 - Legenda de cores dos modos do REW	42
Figura 18 - Modo 4-0-0 de 124,6Hz no sentido do comprimento	43
Figura 19 - Modo 0-0-2 de 124,6Hz no sentido do da altura	43
Figura 20 - Modo 2-0-0 de 62,3Hz no sentido do comprimento	43
Figura 21 - Modo 0-0-1 de 62,3Hz no sentido do da altura	44
Figura 22 - Sala trabalhada e distribuição dos absorvedores, microfone ao centro	45
Figura 23 - RT60 (s) vs Frequência (Hz), painéis lado a lado ou sobrepostos	46
Figura 24 - C50 (dB) vs Frequência (Hz), painéis lado a lado ou sobrepostos	46
Figura 25 - D50 (%) vs Frequência (Hz), painéis lado a lado ou sobrepostos	47
Figura 26 - RT60 (s) vs Frequência (Hz), adicionando absorvedores	48
Figura 27 - C50 (dB) vs Frequência (Hz), adicionando absorvedores	49
Figura 28 - D50 (%) vs Frequência (Hz), adicionando absorvedores	50
Figura 29 - Corte lateral do Absorvedor de Helmholtz (altura, 62,4Hz)	51
Figura 30 - Interface do Acoustic Modelling com parâmetros reais utilizados	52
Figura 31 - Gráfico com as absorções previstas do Ressoador previsto	53
Figura 32 - Desenho da parte externa do absorvedor	53
Figura 33 - Interface do Acoustic Modelling com parâmetros reais utilizados	54

Figura 34 - Gráfico com as absorções previstas do Ressorador feito	55
Figura 35 - Ressorador de Helmholtz pronto	56
Figura 36 - Frequências de pico de absorção vs Resistividade ao fluxo de ar	59
Figura 37 - Amortecimento vs Resistividade ao fluxo de ar	59
Figura 38 - Frequências de pico de absorção vs Resistividade ao fluxo de ar (semi-log)	60
Figura 39 - Amortecimento vs Resistividade ao fluxo de ar (semi-log)	60
Figura 40 - Frequência de pico de absorção vs Espessura da espuma	63
Figura 41 - Amortecimento vs Espessura da espuma	63
Figura 42 - Frequências de Pico vs Espaçamento 1	65
Figura 43 - Amortecimento vs Espaçamento 1	65
Figura 44 - Frequências de Pico vs Espaçamento 2	66
Figura 45 - Amortecimento vs Espaçamento 2	66
Figura 46 - RT60 (s) vs Frequência (Hz), diferentes posições do Ressorador	69
Figura 47 - C50 (dB) vs Frequência (Hz), diferentes posições do Ressorador	69
Figura 48 - D50 (%) vs Frequência (Hz), diferentes posições do Ressorador	70
Figura 49 - RT60 (s) vs Frequência (Hz), comparação geral	71
Figura 50 - C50 (dB) vs Frequência (Hz), comparação geral	71
Figura 51 - D50 (%) vs Frequência (Hz), comparação geral	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores comuns de RT60	18
Tabela 2 - Valores qualitativos para o D50	21
Tabela 3 - Valores estimados dos coeficientes de absorção	75
Tabela 4 - Absorção necessária, quantidade e custo	77

LISTA DE SIGLAS

AD - Atrás Direita;

C50 - Claridade (ou Clareza);

D50 - Definição;

FE - Frente Esquerda;

NPS - Nível de Pressão Sonora;

REW - Room EQ Wizard;

RT60 - Reverberation Time;

SPL - Sound Pressure Level (Nível de Pressão Sonora).

LISTA DE SÍMBOLOS

λ = comprimento de onda;

s = dimensão do obstáculo, ou irregularidades do aparador acústico;

$h(t)$ = resposta impulsiva ou pressão sonora da sala em determinado ponto;

L_x = dimensão da sala;

c = velocidade do som no ar (m/s);

P = porcentagem da área aberta do painel;

L = profundidade da caixa formada pelo painel (m);

e = espessura do painel (m);

d = diâmetro do furo (m);

q = espaçamento entre furos (m);

Δf = Largura de banda;

f_0 = Frequência específica;

ζ = Fator de amortecimento;

S = área total de superfície da sala em m^2 ;

V = volume da sala em m^3 ;

$\bar{\alpha}$ = coeficiente de absorção médio da sala;

S_i = i -ésima área de uma superfície cujo coeficiente de absorção é α_i ;

α_i = i -ésimo coeficiente de absorção;

$\overline{\alpha_{Tv}}$ = Absorção acústica total do ambiente antes do tratamento acústico considerado;

$\overline{\alpha_{Tn}}$ = Absorção acústica total do ambiente após o tratamento acústico considerado;

$S_{\text{painéis}}$ = superfície dos 3 painéis;

α_{material} = absorção específica do material;

$\alpha_{\text{necessário}}$ = absorção média necessária na sala.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	13
1.2 JUSTIFICATIVA PARA O TRATAMENTO ACÚSTICO.....	15
1.3 PARÂMETRO RT60.....	16
1.4 CLARIDADE E DEFINIÇÃO.....	20
1.5 MODOS ACÚSTICOS.....	22
1.6 ABSORÇÃO E ABSORVEDORES.....	25
1.7 RESSOADOR / ABSORVEDOR DE HELMHOLTZ.....	29
2 OBJETIVOS.....	33
2.1 GERAL.....	33
2.2 ESPECÍFICO.....	33
3 METODOLOGIA.....	33
3.1 HARDWARE E MATERIAIS.....	33
3.1.1 Microfone MiniDSP UMIK-1.....	34
3.1.2 Caixa de Som.....	35
3.1.3 Materiais para tratamento acústico.....	35
3.2 SOFTWARES.....	36
3.2.1 Room EQ Wizard (REW).....	36
3.2.2 Amroc.....	37
3.2.3 Acoustic Modelling.....	38
3.2.4 MATLAB Online.....	40
4 DESENVOLVIMENTO.....	40
4.2 VARREDURAS INICIAIS NA SALA.....	44
4.3 PRODUÇÃO DO ABSORVEDOR DE HELMHOLTZ, E TESTES.....	51
4.3.1 Sensibilidade do Ressonador a variações na resistividade ao fluxo de ar da espuma.....	57
4.3.2 Sensibilidade do Ressonador a variações na espessura da espuma.....	62
4.3.3 Sensibilidade do Ressonador a variações no espaçamento entre os furos.....	64
4.4 VARREDURAS FINAIS NA SALA.....	67
4.5 ESTIMATIVA DE CUSTO PARA TRATAMENTO ADEQUADO.....	74
5 CONCLUSÃO.....	78
5.1 PARÂMETROS RT60, C50 E D50.....	78
5.2 CUSTO, EFICIÊNCIA, E PROPOSTAS FUTURAS.....	80

1 INTRODUÇÃO

Acústica é a ciência que lida com a produção, controle, transmissão, recepção e efeitos do som. O termo é derivado do grego “*akoustos*”, que significa “ouvido”, relativo à audição. [1]

O desenvolvimento histórico da área de acústica de salas é fortemente atrelado ao desenvolvimento cultural de uma região, e idealmente, ao propósito de uso desse ambiente, por exemplo: teatros antigos, igrejas, cinema, salas de aula etc. [2]

Por muito tempo, o tratamento acústico era feito de forma empírica, não havendo o conhecimento dos fenômenos e porquês das soluções propostas, ou até mesmo, com suposições físicas incorretas [1]. Apenas em meados do séc. XIX que houve o surgimento de obras importantes para a acústica moderna, com nomes como Helmholtz, Reyleigh, George Stokes, Alexander Graham Bell, Thomas Edison, entre outros [3], e posteriormente o surgimento de microfones, alto-falantes, e finalmente computadores no séc. XX [2].

Mas para tanto, é necessário o conhecimento das características do som, como intensidade e altura (as mais importantes para o tema) e de alguns de seus fenômenos, tais como reflexão, absorção, interferência, ressonância, refração, difração e tempo de reverberação, que podem gerar efeitos indesejáveis na acústica do ambiente, ou serem gerados para o tratamento do ambiente, além de normas ABNT ISO pertinentes a esse tipo de trabalho [4] [5] [6].

Com a orientação do professor Carlos Alberto De Francisco e a exemplo do trabalho realizado pelo grupo de som e acústica da UFSCar, será realizado um tratamento acústico em uma sala de eventos / culto religioso, com notória baixa qualidade acústica ou problema perceptível, como uma reverberação indesejada, ou pontos em que a intensidade sonora é aquém ou além da desejada. O tratamento visa significativamente atenuar os problemas encontrados na sala, sem que acabem sendo criados outros, melhorando, assim, o conforto dos usuários no ambiente e tornando-o mais adequado ao uso.

Para abordar de forma abrangente o problema de acústica de salas, é adequado representar e compreender o som nas dimensões tempo-espaço-frequência no interior de um ambiente [7] [8].

Quanto ao tempo, é analisada a energia ou pressão sonora em função do tempo, fortemente ligado às propriedades de reflexão, absorção e reverberação do ambiente.

Na frequência, algumas faixas podem ser atenuadas ou acentuadas por ressonâncias que acontecem por conta da geometria do ambiente e dos corpos que habitam seu interior. [7]

Já no espaço, é importante saber as características acústicas do ambiente e como o som se comporta nas três dimensões espaciais, como o tempo de reverberação (que será explicado na seção 1.3 deste trabalho) variando conforme se muda a posição da fonte sonora, ou pontos e faixas de interferência construtiva ou destrutiva das ondas sonoras. Para isso, é necessário conhecer como o som interage com as diferentes superfícies presentes na sala, tais como refletores, absorvedores, difusores, que podem ser painéis, cortinas, plateia e quaisquer outros corpos presentes, cada um com uma propriedade e efeito diferente sobre o som. Ainda, essa análise é separada em duas abordagens: em alta e baixa frequência, uma vez que nas baixas frequências, as ondas podem ter comprimentos não desprezíveis em relação às dimensões da sala e muitas vezes até maiores do que as do próprio ambiente. Levando isso em conta, e o fato de que a audição humana capta sons nas frequências de 20Hz até 20kHz (comprimento de onda $\lambda = 17\text{m}$ a $\lambda = 17\text{mm}$), os comprimentos de onda são divididos em 3 faixas qualitativas, sendo elas: $\lambda \gg s$, $\lambda \approx s$, $\lambda \ll s$, sendo “s” a dimensão do obstáculo (área e perímetro), ou profundidade das irregularidades da superfície ou aparador acústico. [7]

Para que ocorra a reflexão especular, em contraste com a reflexão difusa, é necessário que o aparato seja bem maior que o comprimento de onda [9] (idealmente infinito) e que a profundidade das suas irregularidades seja insignificante em relação ao tamanho da onda: $s \gg \lambda$ (idealmente, superfície lisa), e rígido [10]. A onda refletida terá, na prática, amplitude ligeiramente menor (levemente amortecida) uma vez que parte da energia será espalhada, ou seja,

refletida de forma difusa [11], ou absorvida pela conversão de energia acústica em calor. [12]

É importante lembrar que, por mais que os parâmetros e dados sejam exatos, a experiência do ouvinte é subjetiva, sendo assim, a acústica de salas deve se moldar às necessidades e gostos humanos para que eles experienciem agradavelmente o ambiente. Assim, a psicoacústica é justamente uma subdisciplina que lida com aspectos subjetivos do som, tais como volume, altura e timbre, e como eles se relacionam com quantidades fisicamente mensuráveis, como nível de som, frequência e espectro do estímulo [3].

1.2 JUSTIFICATIVA PARA O TRATAMENTO ACÚSTICO

Um bom tratamento acústico é relevante para uma melhor experiência em diversas atividades: em atividades religiosas para um bom entendimento da palavra dita em um grande salão e dos cantos entoados [13], pedagógicas para clareza de entendimento por parte dos alunos e conforto do professor, profissionais como em estúdios de gravação de música ou escritórios em que o silêncio é prezado, ou de lazer, como em uma sala de cinema com riqueza sonora ou o aconchego de um quarto.

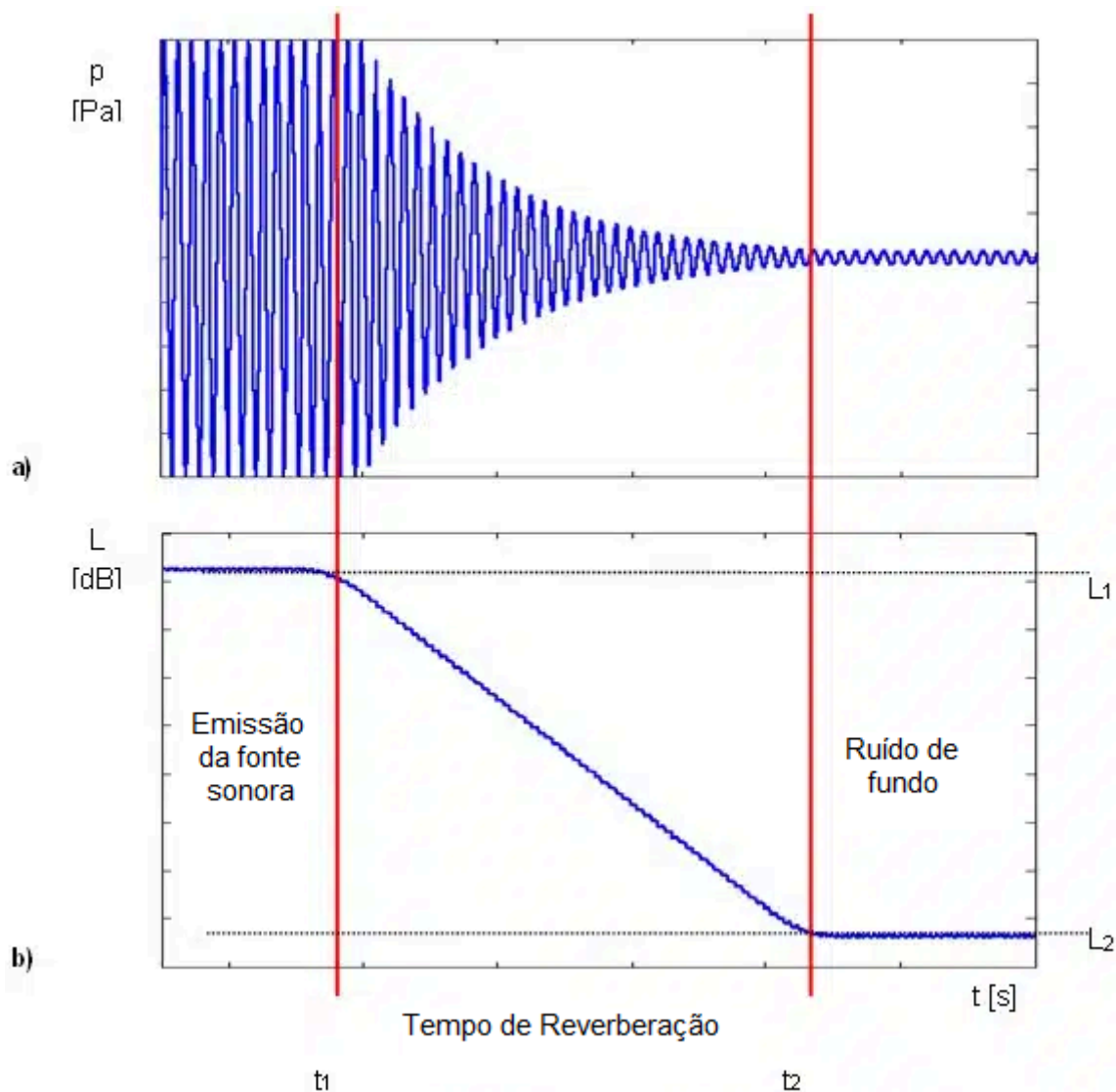
Existem estudos que mostram que condições acústicas desfavoráveis em salas de aula resultam no comprometimento da comunicação verbal entre professores e estudantes, atrapalhando o desenvolvimento dos alunos e a fala dos professores. [13], [14].

Assim sendo, o trabalho de melhorar a qualidade acústica de uma sala é uma atividade que recupera e aprofunda conceitos vistos ao longo da graduação, e os dá uma aplicação, de fato, prática. Porém, além de conceitos vistos ao longo da graduação, se mostram necessários alguns outros conceitos acústicos para o entendimento do caso, desde os mais simples como absorção e reflexão até os menos usuais, como o Parâmetro RT60, Clareza e Definição acústica, modos acústicos, além do conhecimento de corpos absorvedores e ressonadores acústicos, que serão melhor explicados adiante nas seções 1.3 a 1.7.

1.3 PARÂMETRO RT60

Um dos principais parâmetros acústicos de uma sala (no caso deste trabalho, o principal) é o RT60. Seguindo a norma ISO 3382 [4], [5], [6], o tempo de reverberação (RT60), do inglês “Reverberation Time”, é a duração necessária para que a energia sonora num ambiente diminua em 60dB a sua intensidade após a fonte emissora ser interrompida [4]. Esse tempo pode variar grandemente, de frações de segundo a até poucos segundos, a depender das dimensões da sala e dos materiais em seu interior e na sua construção. Uma ideia geral pode ser observada na Figura 1:

Figura 1: Gráfico de tempo de reverberação.



Fonte: [15].

As ondas de pressão sonora colidem com paredes, teto, chão e quaisquer objetos da sala, e gradualmente perdem energia ao longo do tempo, e o tempo de reverberação é justamente o tempo que o som toma, a partir do momento em que não é mais emitido, para ser absorvido num ambiente [13].

A princípio, a queda de 60dB pode parecer aleatória, mas tem origem no intervalo de tempo em que a pressão do som mais alto em uma apresentação orquestral padrão (100dB) decai à intensidade do som de ruído de fundo da situação citada (40dB). Assim, esses 60dB são uma faixa típica de níveis dinâmicos para música orquestral. É importante ressaltar que, para um mesmo ambiente, diferentes frequências de som apresentam valores diferentes de tempo de RT60, pois diferentes frequências são absorvidas ou refletidas de formas distintas nele [16].

É importante notar que o final do decaimento da pressão sonora deve estar pelo menos 15dB acima do ruído de fundo, e a medição do tempo de reverberação se inicia a -5[dB] em relação ao máximo da resposta ao impulso, ou zona de estado estacionário [7]. Desta forma, se em uma sala o Nível de Pressão Sonora (NPS) do ruído de fundo for de 35[dB], para a medição do tempo RT60, o NPS máximo da fonte deve ser de $35+15+60+5=115$ [dB], o que pode ser problemático caso seja um NPS muito alto. Para casos em que o NPS requerido for impraticável, podem ser usados RT30 ou RT20 para se obter o RT60, o que é melhor explicado no capítulo 7.3.1 da referência [7].

Quanto ao melhor nível de RT60, é necessário analisar qual é o propósito do ambiente trabalhado, embora salas com $RT60 > 2s$ sejam geralmente consideradas com eco demais e com boa aplicação apenas em alguns cenários específicos, e salas com $RT60 < 0.3s$ costumem ser consideradas acusticamente mortas. Algumas referências de RT60 para alguns ambientes comuns são:

RT60 < 1s: ideal para salas de aula e áreas de trabalho [15], [16], [17], [18] ;

RT60 ≈ 1s: ideal para clareza na comunicação, museus, cinemas [16];

1.5s < RT60 < 2.5s: Uma faixa agradável para fala e música [16];

RT60 = 3.5s: Ideal para música, e peças teatrais [16].

Faixas anormalmente altas de RT60 podem ser encontradas em situações muito específicas, como em igrejas medievais apropriadas para a reverberação do instrumento órgão, com valores que variam de 8s a 11s, tornando o ambiente “vibrante” [13], [15].

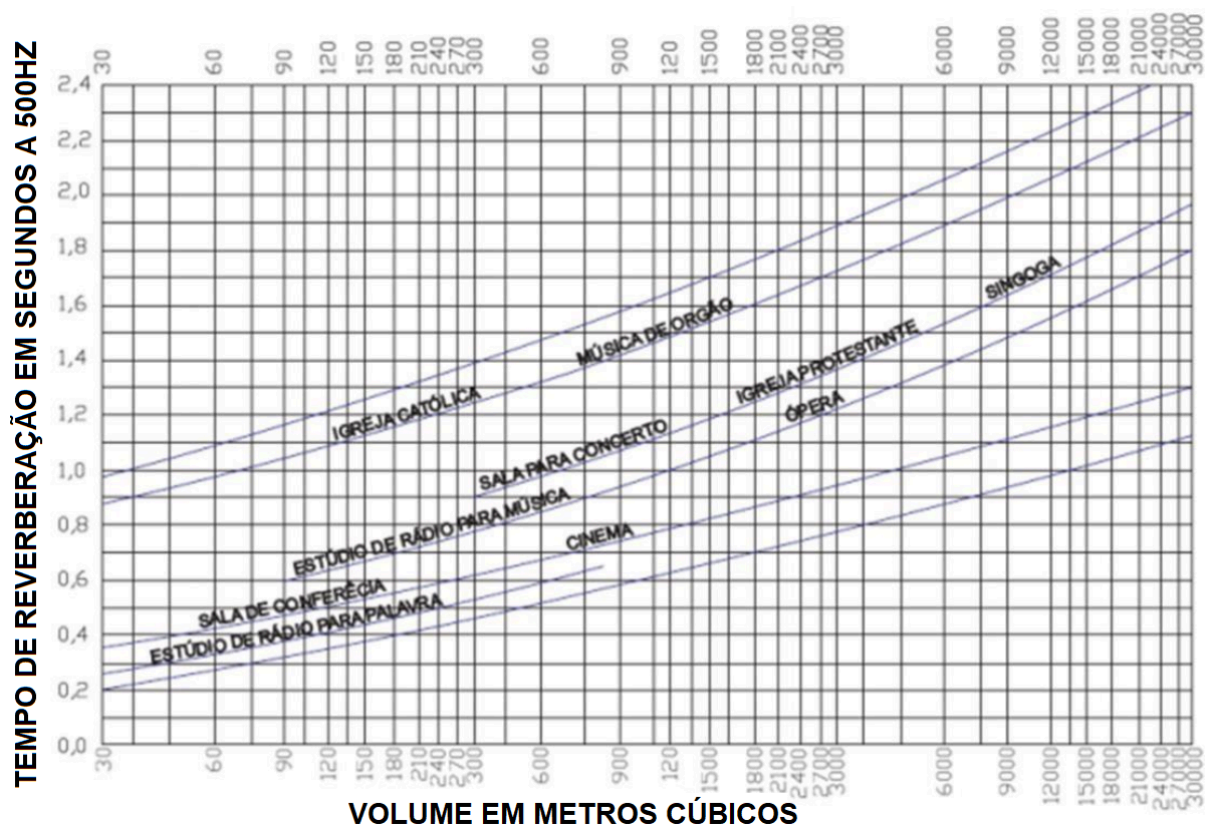
É importante ressaltar que os valores não são estritamente fixos para cada ambiente, lembrando que essas medidas remetem à percepção e ao gosto subjetivo dos usuários do ambiente, e também podem variar conforme as dimensões do ambiente, e também com a faixa de frequência do som, embora seja utilizada a referência de 500Hz como padrão para essa medição [13] por ser uma faixa em que a sensibilidade da audição humana é maior, e por ser central na faixa da audição humana, é bastante representativa da resposta acústica geral de um ambiente. Assim sendo, seguem organizados faixas de valores comuns de tempo de reverberação para mais tipos de ambientes e situações na Tabela 1, e valores considerados ótimos para alguns tipos de ambientes em função de seus volumes na Figura 2:

Tabela 1: Valores comuns de RT60.

Ambiente	RT60 (s)
Estúdio	0,3 < RT60 < 0,7 [18]
Sala de aula / trabalho	0,4 < RT60 < 0,7 [17]
Escritório	0,5 < RT60 < 1,1 [15]
Restaurante	0,7 (intimista) < RT60 < 1,1 (vivo) [18]
Clareza / museu / cinema	≈ 1 [16]
Misto: Fala / Música	1,5 < RT60 < 2,5 [16]
Música (mais adequado) / Teatro	3,5 [16]
Igrejas (padrão)	2 < RT60 < 10 [15]
Igrejas (órgãos)	8 < RT60 < 11 [16]

Fonte: descritas na tabela.

Figura 2: Tempo de reverberação ótimo (500Hz).



Fonte: adaptado de [13] e [19].

Alguns dos fatores mais importantes que influenciam no RT60 são as dimensões da sala, podendo fazer com que o som seja refletido ou absorvido mais vezes e mais rapidamente, ou gerar modos acústicos (que serão explicados mais adiante), e a composição das superfícies e corpos com os quais as ondas sonoras incidem, que podem ser lisas (mais refletoras) ou porosas (mais absorvedoras).

Por ser um parâmetro fundamental para o trabalho de tratamento acústico, é de grande importância que ele seja medido para diferentes frequências, em especial, para as frequências que podem ser incômodas ao ouvido do usuário, e que o tempo de reverberação do ambiente tratado seja controlado para as frequências investigadas e encontradas como problemáticas. Apesar do RT60 ser um dos principais parâmetros a serem tratados, se não o principal, outros como Claridade e Definição também são levados em consideração.

1.4 CLARIDADE E DEFINIÇÃO

Clareza (ou Clareza), C80 ou C50 (a depender se a sala é destinada a música ou a fala), e definição, D50, são parâmetros que são ligados à capacidade subjetiva de se distinguir sons em sequência. Desta forma, esses parâmetros são relacionados à inteligibilidade da música (Clareza) e à inteligibilidade da fala (Definição) [3], [7], [20]. Uma sala com bom grau de clareza faz músicas e vozes soarem límpidas, exatas e bem articuladas. Em outras palavras, clareza mede o grau de percepção de todos os detalhes musicais ou o grau de definição com que os sons são percebidos como distintos [21].

Isso se deve ao fato de que as primeiras reflexões, que devem ocorrer entre 50ms (salas de fala) a 80ms (salas de música), tendem a se integrar ao som direto pela percepção auditiva humana [7], [22]. Assim, com as primeiras reflexões com boa intensidade, o som experimentado tende a ser amplificado por essas primeiras reflexões. Caso as primeiras reflexões sejam fracas ou em especial, a cauda reverberante (que nada mais é que a parcela das reflexões finais) for longa demais, o próximo som direto ouvido tenderá a ser mascarado por ela. Portanto, a reverberação se mostra como o atributo decisivo para o parâmetro clareza [22].

Fisicamente, clareza é a razão da energia que chega nos primeiros 50ms (ou 80ms, para C80) pela energia remanescente do respectivo sinal. Assim, “clareza” é um termo que descreve o quanto os detalhes de uma performance são percebidos, em relação ao mascaramento deles pela cauda reverberante (ou reflexões tardias) [7].

A definição matemática de Clareza (em dB) é vista na Equação 1:

$$C50 = 10 \log \left[\frac{\int_0^{50ms} h^2(t) dt}{\int_{50ms}^{tf} h^2(t) dt} \right]; \quad (1)$$

Sendo:

- $h(t)$ a resposta impulsiva ou pressão sonora da sala em um determinado ponto;
- O numerador representa a energia sonora que chega nos primeiros 50ms (ou 80 ms para C80).
- O denominador representa a energia sonora que chega após esses intervalos, com t_f sendo o tempo final.

E a Definição (linear), na Equação 2:

$$D50 = \frac{\int_0^{50ms} h^2(t) dt}{\int_0^{t_f} h^2(t) dt} \quad (2), [7]$$

Sendo:

- $h(t)$ é a pressão sonora no tempo t ;
- O numerador representa a energia sonora que chega nos primeiros 50ms;
- O denominador representa a energia sonora total recebida.

A Tabela 2 apresenta algumas faixas qualitativas de Inteligibilidade em função de valores quantitativos de Definição:

Tabela 2 - Valores qualitativos para o D50.

INTELIGIBILIDADE	D50
Excelente	0,86 até 1
Bom	0,67 até 0,86
Razoável	0,39 até 0,67
Pobre	0,17 até 0,39
Ruim	0,06 até 0,17

Fonte: [23].

Os parâmetros vistos até agora: tempo de reverberação, clareza e definição, são parâmetros que, por mais que sejam objetivos, possuem uma parcela de

subjetividade na sua percepção e julgamento. Outros fenômenos, porém, são mais objetivos, como a interferência de modos acústicos.

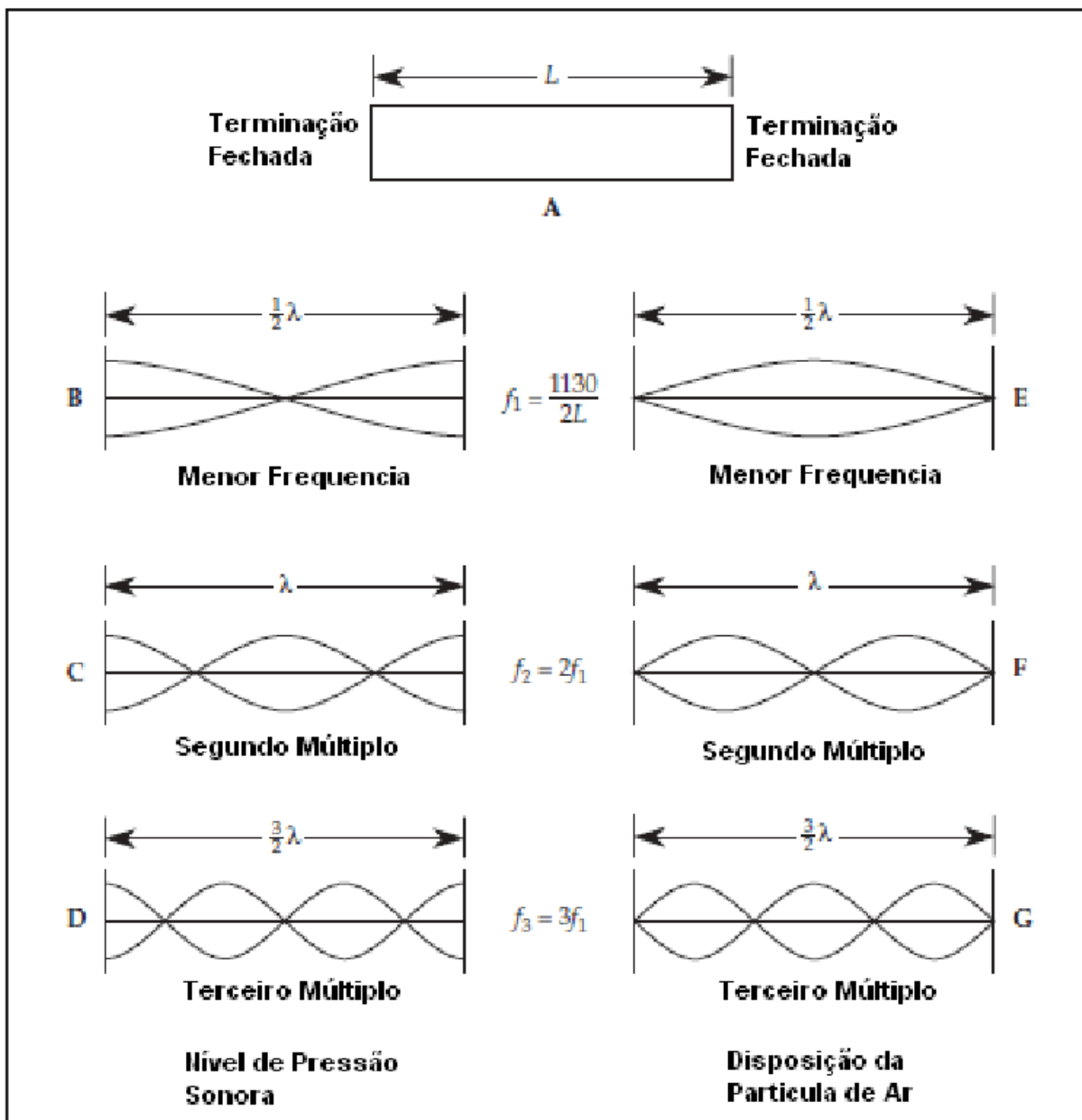
1.5 MODOS ACÚSTICOS

Como já comentado, o problema de acústica de salas pode ser dividido em faixas de frequência, e nas baixas frequências (com comprimentos de onda possivelmente maiores que alguns ambiente) e médias frequências (onda com comprimento comparável ao da sala ou dos objetos no seu interior) [7], podem surgir problemas bem característicos.

Para comprimentos de onda maiores que o dobro da maior dimensão da sala, $\lambda > 2L_x$, a sala não dá suporte para a propagação da energia sonora, não sendo capaz de sustentar sequer meio comprimento dessa onda estacionária, e a intensidade sonora decai rapidamente [24]. Uma consequência negativa desse fenômeno, seria um estúdio musical sobrecompensar eletronicamente o áudio em baixa frequência, pois não são capazes de ouvir satisfatoriamente essa faixa por conta das limitações da sala, ou ter o produto final da gravação afetado por elas. [7] [25].

Como a sala é um ambiente tridimensional, comprimentos L_x , L_y e L_z (melhor enxergados na Figura 4) podem acomodar uma série de múltiplos inteiros de $\lambda/2$, gerando ressonâncias em certas frequências: os modos acústicos, que podem ser observados na Figura 3 no caso de um tubo fechado. Assim, em certas regiões da sala é possível notar grandes alterações da pressão sonora (nos picos e vales de uma onda), enquanto que em outras (nos nós da onda), quase não há variação, ou seja, não se ouve determinada frequência. Vale ressaltar que o número de modos acústicos em uma sala cresce com o cubo da frequência, o que faz com que os modos acústicos passem a ser praticamente imperceptíveis ao ouvido humano, e eventualmente ao equipamento profissional, conforme eles se sobrepõem, e nesse ponto, em alta frequência, passam a ser tratados da forma de acústica estatística. Essa é a chamada frequência de Schroeder, que é melhor explicada e visualizada na seção 4.1, em que se é impossível separar a contribuição individual de cada modo [7], [26].

Figura 3: Modos de ressonância em um tubo



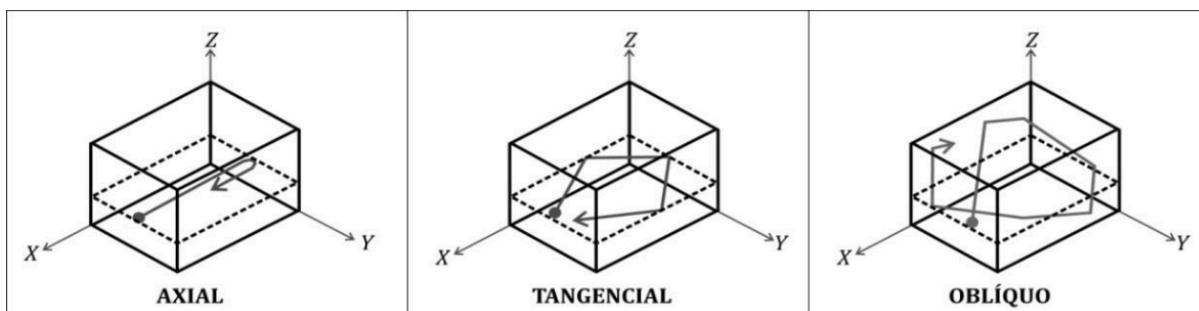
Fonte: [27] e [28].

Relacionado ao fenômeno apresentado na Figura 3, há dois fatores que podem interferir na qualidade sonora ambiente. Um é a capacidade do ouvinte em localizar a fonte (instrumento musical) dentro de uma sala devido às diferenças de tempo e de intensidade sonora ou amplitude interaurais (diferenças de tempo e intensidade entre os dois ouvidos do músico). Outro fator é a interferência dos modos acústicos da sala [29], [30]. Resumindo, os fatores são a medida da diferença causada pela posição da fonte sonora em relação aos ouvidos esquerdo e direito do ouvinte, ou pela posição dos modos na sala.

Conforme a frequência da fonte sonora aumenta, passam a prevalecer fenômenos como difração, melhor analisados pela acústica estatística. Quanto maior for a absorção, menor vai ser o Tempo de Reverberação de determinada frequência em uma sala, pois mais rapidamente ela é absorvida pelo ambiente e corpos no seu interior. Um RT60 alto torna a presença e os efeitos dos modos de ressonância (ou ondas estacionárias) ainda mais marcantes e perceptíveis.

Três modos de ressonância podem ser gerados pelas ondas estacionárias em uma sala retangular: axial, tangencial, e oblíquo, como observado na Figura 4. No primeiro modo, são envolvidas duas superfícies paralelas na propagação da onda, que se propaga paralela a um dos eixos X, Y ou Z. No modo tangencial, a propagação da onda acontece com a reflexão em três ou mais paredes, formando um plano. E por último, no modo oblíquo, todas as superfícies do ambiente são envolvidas na propagação da onda, que se move na direção dos três eixos [31].

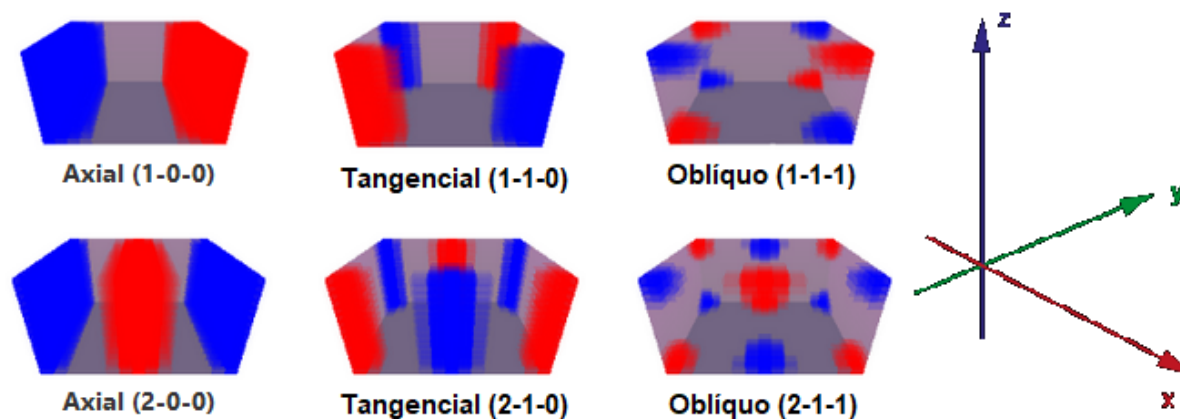
Figura 4 - Modos de sala: axial, tangencial e oblíquo.



Fonte: [28], [31].

Os modos acústicos em três dimensões podem ser variados em uma sala, e de visualização um pouco mais complexa do que o caso da Figura 3. Outro exemplo pode ser observado na Figura 5, com as diferentes pressões dos modos acústicos (representados pelas diferentes cores) distribuídos pela sala:

Figura 5 - Modos acústicos e zonas de pressão em uma sala.



Fonte: adaptado de [32].

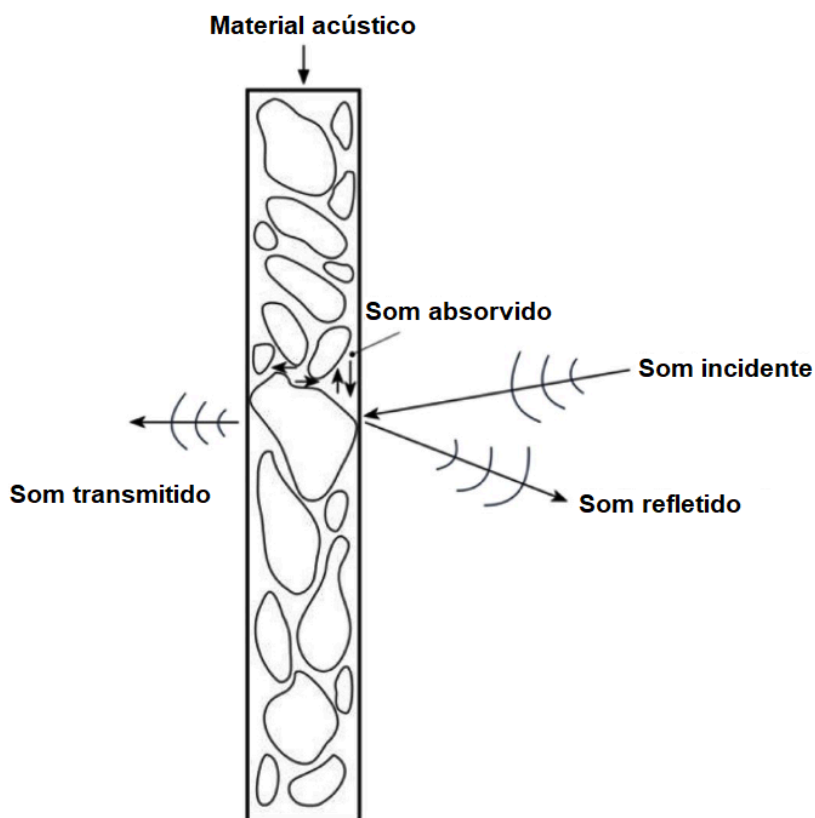
Para que esse fenômeno indesejado seja mitigado, surge a possibilidade de uso de corpos absorvedores ou refletores no ambiente

1.6 ABSORÇÃO E ABSORVEDORES

A absorção acústica é definida como a quantidade de energia sonora que é transformada em calor ou transcende do local onde se está investigando a energia sonora e sua repartição [33], [34].

Sendo assim, o som pode ser absorvido de duas maneiras: uma quando ele ultrapassa um anteparo, sendo transmitido para fora do ambiente, e outra quando ele é transformado em calor durante a ultrapassagem do anteparo, sendo dissipado, conforme Figura 6.

Figura 6 - Absorção em um absorvedor.



Fonte: adaptado de [35]

Os materiais absorvedores absorvem todos os espectros de frequências, mas a depender do material de fabricação e desenho do absorvedor, ele pode agir bem mais eficientemente atenuando uma faixa de frequências em específico.

Materiais porosos, via de regra, são mais eficientes para mitigar as baixas frequências, enquanto que um corpo de placas perfuradas atua mais em médias frequências, e um absorvedor de membranas, em baixas frequências. [7].

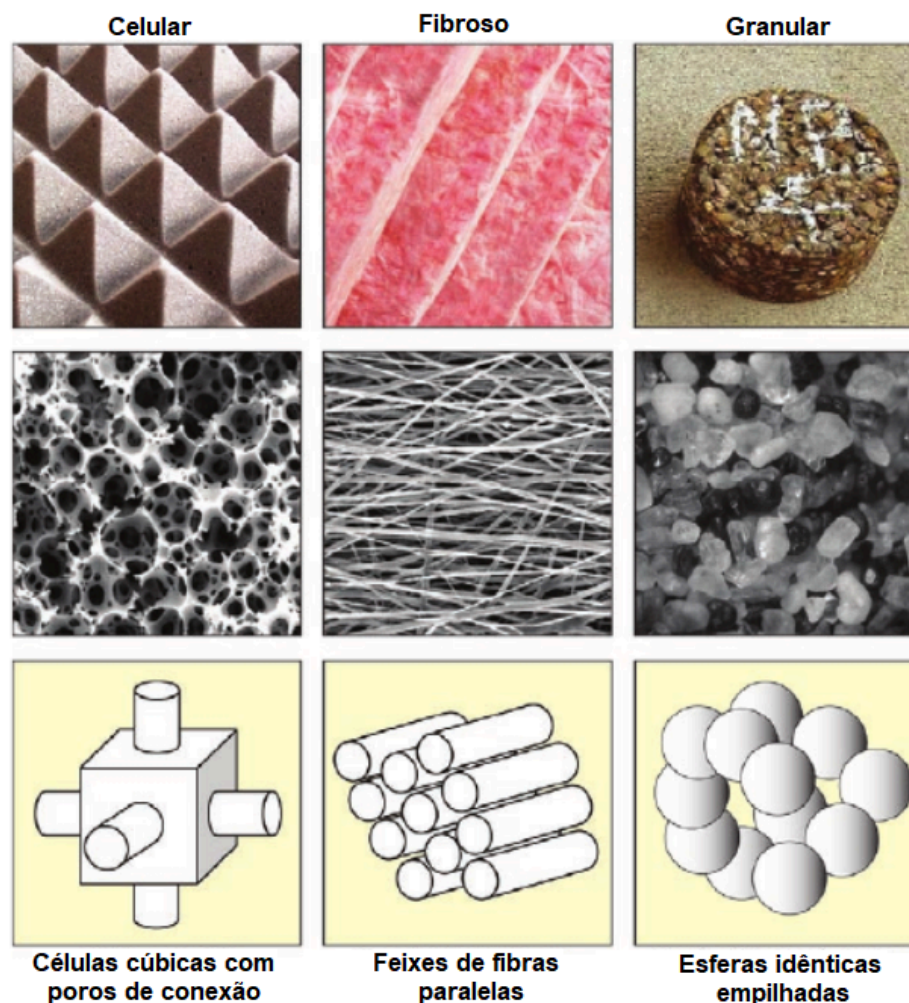
Os materiais porosos são compostos por duas fases: uma sólida e outra fluida. A primeira é o esqueleto do material, feito de fibra, grânulos, ou materiais semelhantes interconectados. Exemplos são lãs minerais (vidro, pet, rocha...), espumas e materiais reciclados, ou absorvedores de pneus triturados e colados. O fluido é geralmente o ar que permeia o seu interior. A dissipação de energia ocorre pela interação entre esses dois componentes, através de perdas associadas à viscosidade entre o ar e o material poroso, pelo cisalhamento do fluido próximo do esqueleto, perdas térmicas devido às múltiplas reflexões, e perdas por conta da vibração do esqueleto. Absorvedores porosos e granulares possuem características

um pouco diferentes, sendo que o coeficiente de absorção em relação à frequência cresce em materiais fibrosos, e apresenta variações (vales e picos) nos materiais granulares [7].

Diferentes materiais podem apresentar diferentes características: podem ser mais ou menos fáceis de manipular, podem ter custos diferentes, diferentes velocidade de deterioração com o uso ou sob o efeito de maresia, favorecer ou não a proliferação de fungos e bactérias, podem também servir de isolante térmico, podem ser nocivos à saúde ou mais inertes, facilidade de reaproveitamento ou reciclagem, dentre outras [6].

Uma visão microscópica, e da estrutura desses diferentes materiais absorvedores, pode ser vista na Figura 7:

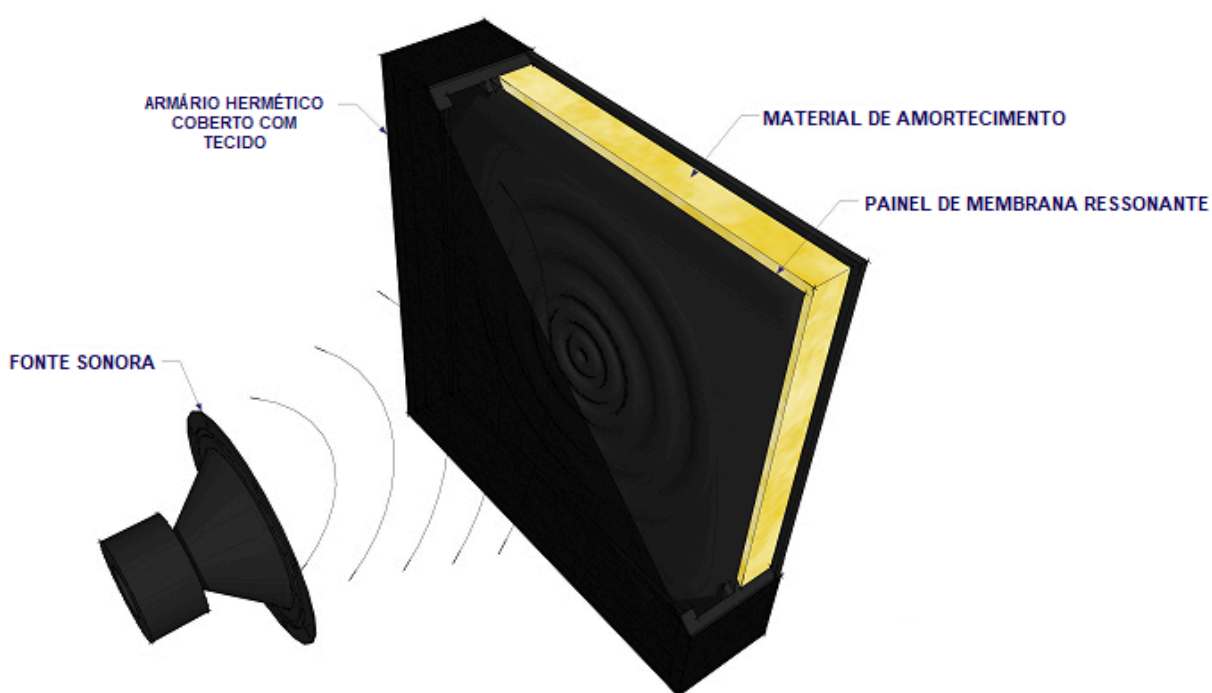
Figura 7 - Visão macroscópica, microscópica, e estrutura dos absorvedores.



Fonte: adaptado de [36]

Já os absorvedores de membrana, possuem uma camada vibratória, que ao ressoar, transfere a energia para uma mola e amortecedor. Após a incidência da onda sonora, a membrana vibra sobre uma camada de ar vedada, que transfere a energia para um material subjacente [7]. Esse tipo de absorvedor atua melhor na frequência em que seus parâmetros o fazem melhor ressoar (geralmente o grave), sendo assim, mais utilizados em contextos em que se deseja atenuar uma faixa de frequência em específico. Na Figura 8 é possível observar a disposição do material absorvedor, membrana ressonante, e da câmara de ar interna.

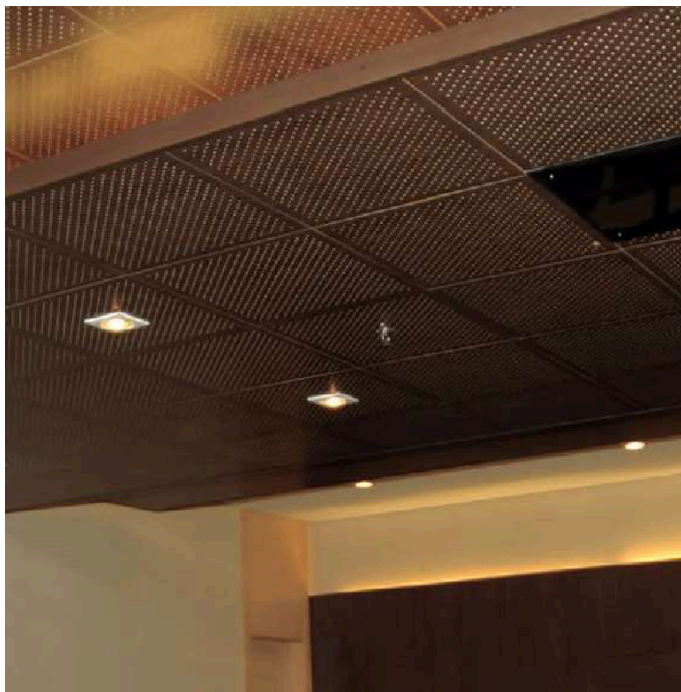
Figura 8 - Modelo de absorvedor de membrana.



Fonte: adaptado de [37]

Os absorvedores de placa perfurada são compostos por uma cavidade preenchida com ar e material poroso, com uma placa perfurada no topo, como mostra a Figura 9. São uma alternativa esteticamente agradável, e com uma variedade de atuações a depender das suas especificações (tamanho dos furos, distância, distribuição... [38]). As placas microperfuradas também são bem práticas e simples, pois a resistência acústica é provida pelo efeito viscoso do escoamento do ar nos furos, sem a necessidade de um material poroso interior [7].

Figura 9 - Absorvedor de placa perfurada.



Fonte: [38]

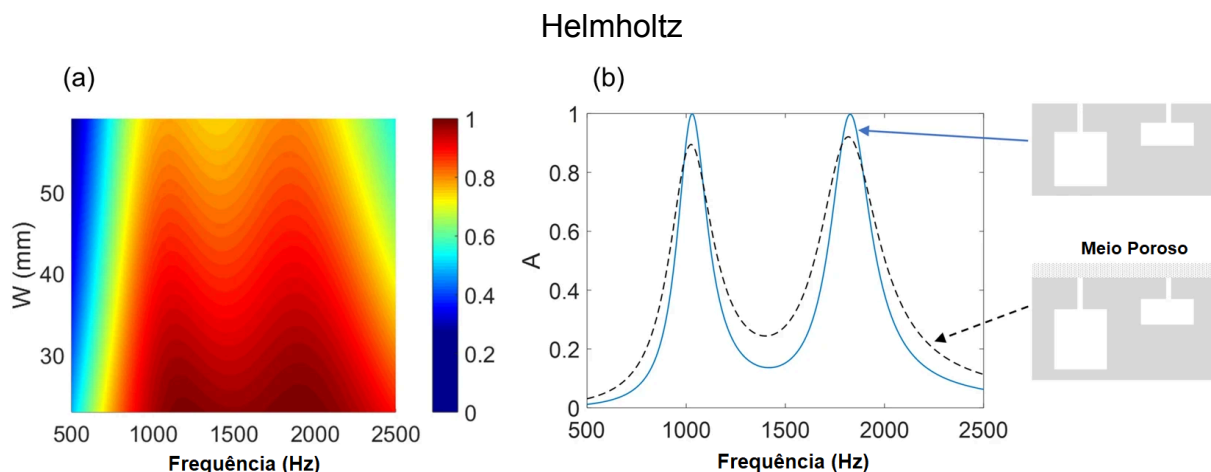
Se apenas uma célula (abertura) for considerada, há um absorvedor de Helmholtz simples.

1.7 RESSOADOR / ABSORVEDOR DE HELMHOLTZ

Os Ressonadores ou Absorvedores de Helmholtz são uma solução um pouco mais específica para a questão do tratamento acústico abordada neste trabalho. São compostos por cavidades que contém ar em seu interior, conectadas ao ambiente por pequenas aberturas. A absorção é de médias e baixas frequências, ou em uma única frequência [38], agindo, assim, como um filtro.

Na Figura 10 podem ser vistos um gráfico mostrando a intensidade (de acordo com cores) da absorção da energia sonora em função da frequência da onda, e um gráfico mostrando a curva de absorção de duas diferentes aberturas de Absorvedores de Helmholtz em função da frequência:

Figura 10 - Exemplo de frequências absorvidas pelo Ressonador de



Fonte: adaptado de [39]

A Frequência de Ressonância depende de alguns parâmetros do Ressonador, como as especificações do painel perfurado (pode ser observado na Figura 10) por onde as ondas sonoras vão sofrer perdas na sua intensidade por viscosidade, e essa Frequência de Ressonância F_r [Hz] do dispositivo é expressada pela Equação 3:

$$F_r = \frac{c}{2\pi} * \sqrt{\left(\frac{P/100}{L(e+0,85*d(1-0,22d/q))}\right)} \quad (3), [38].$$

Sendo:

c = velocidade do som no ar (m/s);

$P/100$ = porcentagem da área aberta do painel;

L = profundidade da caixa formada pelo painel (m);

e = espessura do painel (m);

d = diâmetro do furo (m);

q = espaçamento entre furos (m).

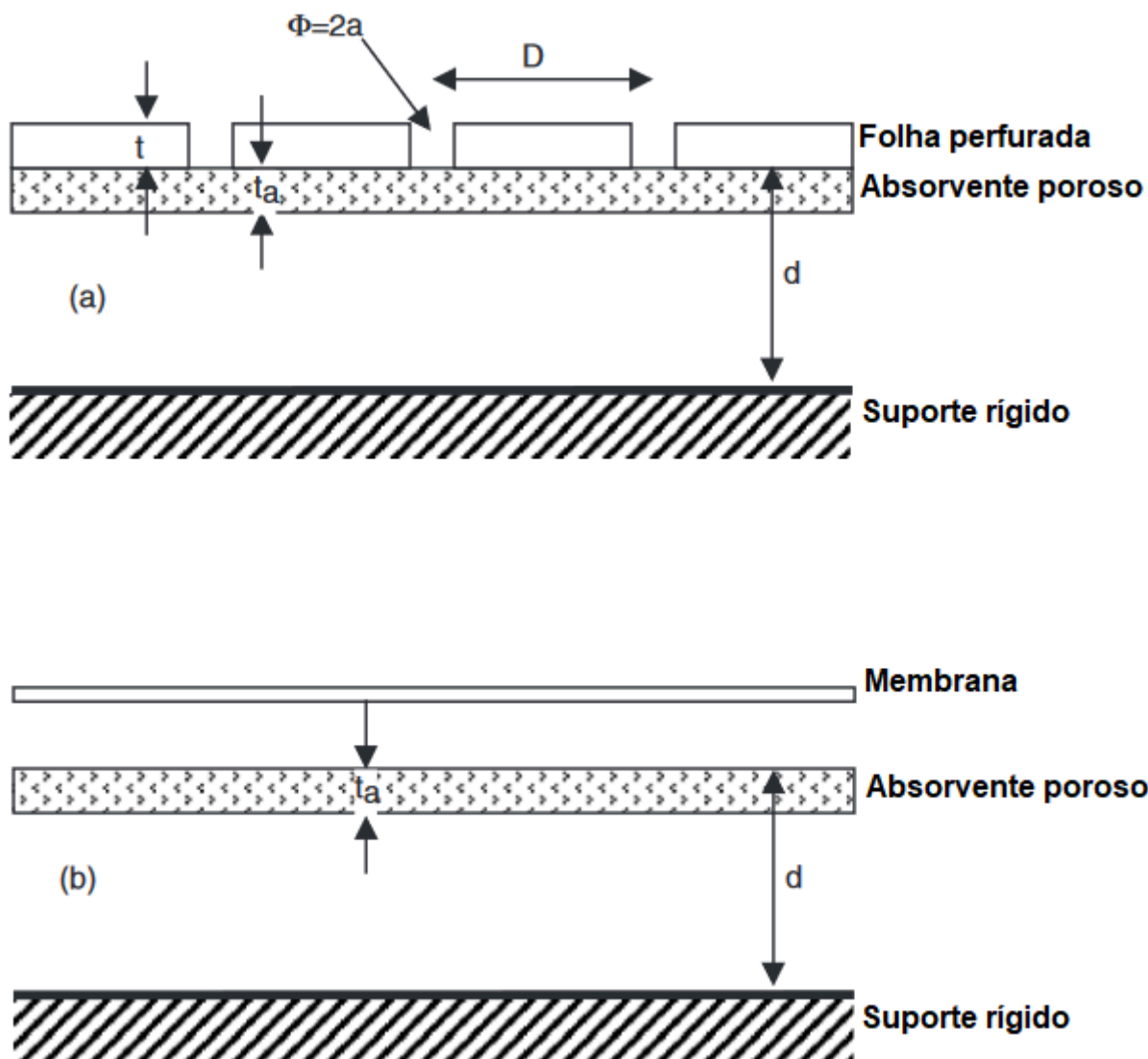
Nas baixas e médias frequências, os absorvedores porosos são ineficientes por conta da espessura requerida do material, sem contar que esses corpos possuem características de absorção únicas, com um pico acentuado, e não uma larga banda de absorção, o que seria difícil de recriar com apenas um dispositivo ou corpo.

Muitos desses dispositivos atualmente são projetados com grande precisão, embora, uns mais que outros, ainda são dimensionados com uma grande “carga” de tentativa e erro através da experimentação, como os absorvedores de membrana, por exemplo [40].

O mecanismo dos absorvedores de membrana consiste no princípio de massa-mola, sendo que neste caso, o ar atua como mola, e a membrana como massa.

Já em um ressoador de Helmholtz, a ressonância acontece pelo mesmo fenômeno que ocorre ao se assoprar na entrada de uma garrafa. Em seguida, para haver o amortecimento da energia, é necessário um absorvedor interno, que pode ser uma lã mineral ou absorvedores microperfurados, por exemplo, a depender do caso. Já para a membrana ou painel do ressoador, o material pode ser borracha, ou madeira. A mola também é o ar no interior da cavidade. Ao mudar a massa, dureza dos materiais, e espessura da camada de ar, ou das aberturas, a frequência de ressonância pode ser alterada e refinada de acordo com o que se deseja. O absorvedor poroso deve ser posicionado a uma certa distância da membrana ou do painel (que podem ser melhor visualizados na Figura 11), para que esta possa se movimentar livremente. Além disso, para Ressonadores de Helmholtz com aberturas menores, perdas por viscosidade nas aberturas são mais bem aproveitadas para a absorção da energia sonora, o que pode tornar a utilização de um absorvedor interno desnecessária, como um microperfurado [40]. Na Figura 11, é possível visualizar o esquema de construção desses corpos.

Figura 11 - Modelos típicos para absorvedores de membrana (a) e Helmholtz (b)



Fonte: adaptado de [40]

Como salas pequenas podem ter um baixo desempenho para as baixas frequências, dando muita ênfase nas frequências que geram ondas estacionárias (modos acústicos), e não permitindo uma propagação adequada das baixas frequências cuja excitação modal é pequena, os Ressonadores de Helmholtz são úteis para amortecer e diminuir o RT60 dessa frequência indesejada [40].

E por último, por já existirem programas rápidos, fáceis e gratuitos para se trabalhar e manipular esses parâmetros, serão usados esses meios computacionais para encontrar as características do Ressonador de Helmholtz para a frequência que se deseja absorver.

2 OBJETIVOS

2.1 GERAL

Retomando um pouco da seção de justificativas, um tratamento acústico planejado traz uma melhor experiência para os ouvintes e falantes em uma sala. Ademais, o exercício de melhorar a qualidade acústica de uma sala é uma atividade que recupera e aprofunda conceitos físicos, matemáticos e elétricos vistos ao longo da graduação, dando a vários deles uma aplicação, de fato, prática, consolidando o aprendizado e trazendo uma abordagem possivelmente profissional ao conteúdo.

2.2 ESPECÍFICO

Quanto aos fins específicos, com o tratamento da sala escolhida, além do cumprimento de um trabalho de grande valor à formação do aluno e da fixação de aprendizado, o trabalho também visa trazer algo que agregue à comunidade e ao conforto dos usuários do ambiente escolhido, com um trabalho que realmente contribua com a sociedade.

3 METODOLOGIA

Para a análise da sala que será trabalhada, bem como a avaliação dos resultados, e projeto de possíveis posteriores soluções, foram utilizados e integrados diversos programas e simuladores, bem como equipamentos físicos. Eles serão discutidos nas seções a seguir.

3.1 HARDWARE E MATERIAIS

Evidentemente, para se trabalhar com acústica, é necessário equipamentos para geração e captação de áudio e som. Para tanto, dispositivos como caixa de som e microfone foram disponibilizados pelo grupo de áudio e acústica da UFSCar

(bem como outras formas de suporte, como a montagem e disponibilização dos materiais necessários para o Ressonador de Helmholtz).

3.1.1 Microfone MiniDSP UMIK-1

O UMIK-1 é um microfone de medição USB omnidirecional que fornece medição acústica Plug & Play. Desde a medição acústica do alto-falante e sala até a gravação, este microfone oferece baixo ruído e resultados precisos e confiáveis.

Não é necessária a instalação de drivers. O Umik-1 é um dispositivo USB Audio classe 1 reconhecido automaticamente por todos os Sistemas Operacionais (Windows/Mac) e Ipad com Kit de Conexão de Câmera.

Combinado com nosso software de medição acústica recomendado, é a combinação perfeita para um sistema de medição Plug & Play.

Características e especificações:

- Compatível com sistemas operacionais Windows, Mac e Linux e todos os softwares de medição;
- Recursos especiais, como medição SPL calibrada, habilitada no software gratuito Room EQ Wizard;
- Resposta de frequência: 20Hz - 20kHz, +/-1dB com calibração carregada;
- Áudio USB: Interface USB Audio classe 1.0 sem driver para Windows, Mac e Linux;
- Tipo de cápsula e padrão polar Eletreto de 6 mm, omnidirecional;
- Classe de áudio USB Classe de áudio USB 1.0, interface sem driver para Windows, Mac e Linux;
- Conector miniUSB;
- Resolução e taxa de amostragem ADC de 24 bits a 48kHz SPL máximo para 1% TDH @ 1kHz;
- Configuração de ganho de 133dB SPL @0dB;
- Nível de ruído de saída em IGPA máximo -74dBFS;
- Peso 120g para microfone, kit completo de 600g com acessórios;

- Alimentação Alimentada por USB (5V) - LED azul indica unidade sob alimentação;
- Tamanho da rosca de fixação 3/8"-16.

A possibilidade de utilização desse microfone é de grande conveniência pela sua qualidade, e compatibilidade e reconhecimento com o REW [41].

3.1.2 Caixa de Som

Item indispensável para a realização de testes, para varreduras em frequência na sala para identificar quais tem um tempo de reverberação (RT60) maior, testes a impulso, para medir com mais precisão tempo de decaimento da pressão sonora, e sendo um equipamento móvel, para que diferentes configurações espaciais entre fonte de emissão sonora, semelhante às simulações, e os diversos móveis e objetos que compõem a sala.

3.1.3 Materiais para tratamento acústico

Para o tratamento acústico de um ambiente, podem ser usados, para cada problema, uma solução com materiais diferentes. Para o tratamento da sala deste trabalho, foram usados corpos absorvedores, tais como cortinas, painéis absorvedores de lã de pet (placas lã de pet de 120x60x5cm e 30kg/m³ [42]), e o Ressorador de Helmholtz, que neste trabalho, é o principal foco de atenção, em termos de aquisição de materiais de tratamento acústico. Os materiais utilizados para o Ressorador de Helmholtz serão discutidos mais adiante na seção de Desenvolvimento.

Quanto aos painéis acústicos utilizados, as especificações delas são relativamente padronizadas, e um exemplo do modelo (que foi utilizado neste trabalho), bem como suas especificações, podem ser encontradas na referência bibliográfica [42]

3.2 SOFTWARES

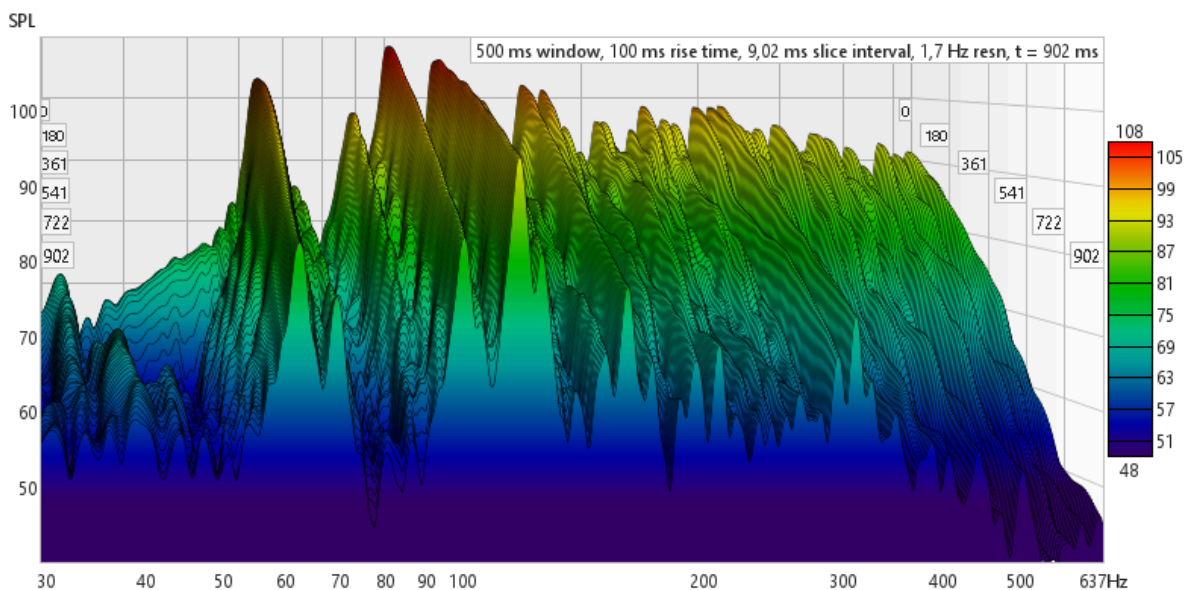
3.2.1 *Room EQ Wizard (REW)*

O REW é um software gratuito para medição e análise acústica de salas, medição de alto-falantes e medição de dispositivos de áudio.

Os recursos de medição e análise de áudio do programa ajudam a otimizar a acústica do ambiente, e a encontrar os melhores locais para suas caixas de som e posições de audição.

Inclui ferramentas para geração de sinais de teste de áudio, medições de SPL (*Sound Pressure Level*), impedância, respostas de frequência e impulso, medição de distorção, geração de gráficos de fase, atraso de grupo e decaimento espectral, cascatas, espectrogramas e curvas energia-tempo, geração de gráficos (como na Figura 12, com a intensidade no eixo y e em cores, frequência no eixo x, e tempo no eixo z) de analisador em tempo real (RTA) e outros, cálculo de tempos de reverberação, cálculo de parâmetros Thiele-Small, determinação das frequências e tempos de decaimento das ressonâncias modais, exibindo respostas do equalizador e ajustando automaticamente as configurações dos equalizadores paramétricos para neutralizar os efeitos dos modos de ambiente e ajustar as respostas para corresponder a uma curva alvo [43].

Figura 12 - Exemplo de gráfico de cascata gerado pelo REW



Fonte: autoria própria

Para o uso das funcionalidades desse programa, é requerido que o usuário tenha em mãos hardware para geração e aquisição de som, equipamentos como: caixa de som, placa de som, microfone, e um computador para conectar o hardware ao software apresentado, e trena laser para conseguir medir com exatidão as dimensões da sala para posterior simulação. A caixa de som, em conjunto com este programa, foi usada para gerar pulsos sonoros ou varreduras em frequência para que o microfone captasse a reverberação do ambiente ou frequências específicas cujo comportamento é indesejado.

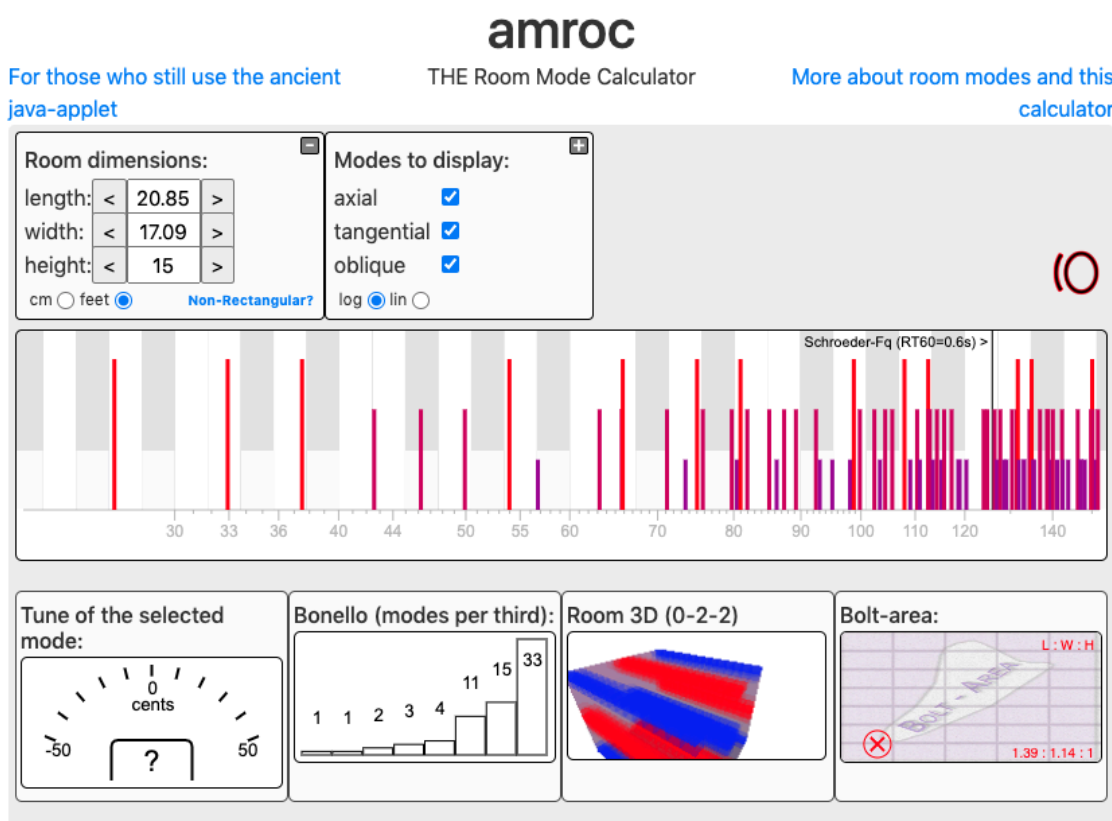
3.2.2 Amroc

A ferramenta Amroc, da Amcoustics é utilizada para uma simulação mais completa da sala, especificamente para simular a ressonância em 1, 2 e 3 dimensões (modos) do ambiente [44]. É válido notar que essa ferramenta não é 100% condizente com a realidade, uma vez que não simula a riqueza de detalhes de uma sala, como imperfeições e ondulações no piso, ou a influência de pequenos objetos, como uma maçaneta, nas ondas estacionárias da sala.

Esse programa é útil para dar uma expectativa de onde os modos do ambiente estarão localizados, bem como as frequências potencialmente

problemáticas, em que pode haver um acúmulo de modos acústicos. Como é uma expectativa, ela deve ser confirmada na prática, com o uso de microfone e caixa de som, para medir os pontos de alta e baixa intensidade sonora. Na Figura 13 é possível observar a interface do programa.

Figura 13 - Interface do AMROC

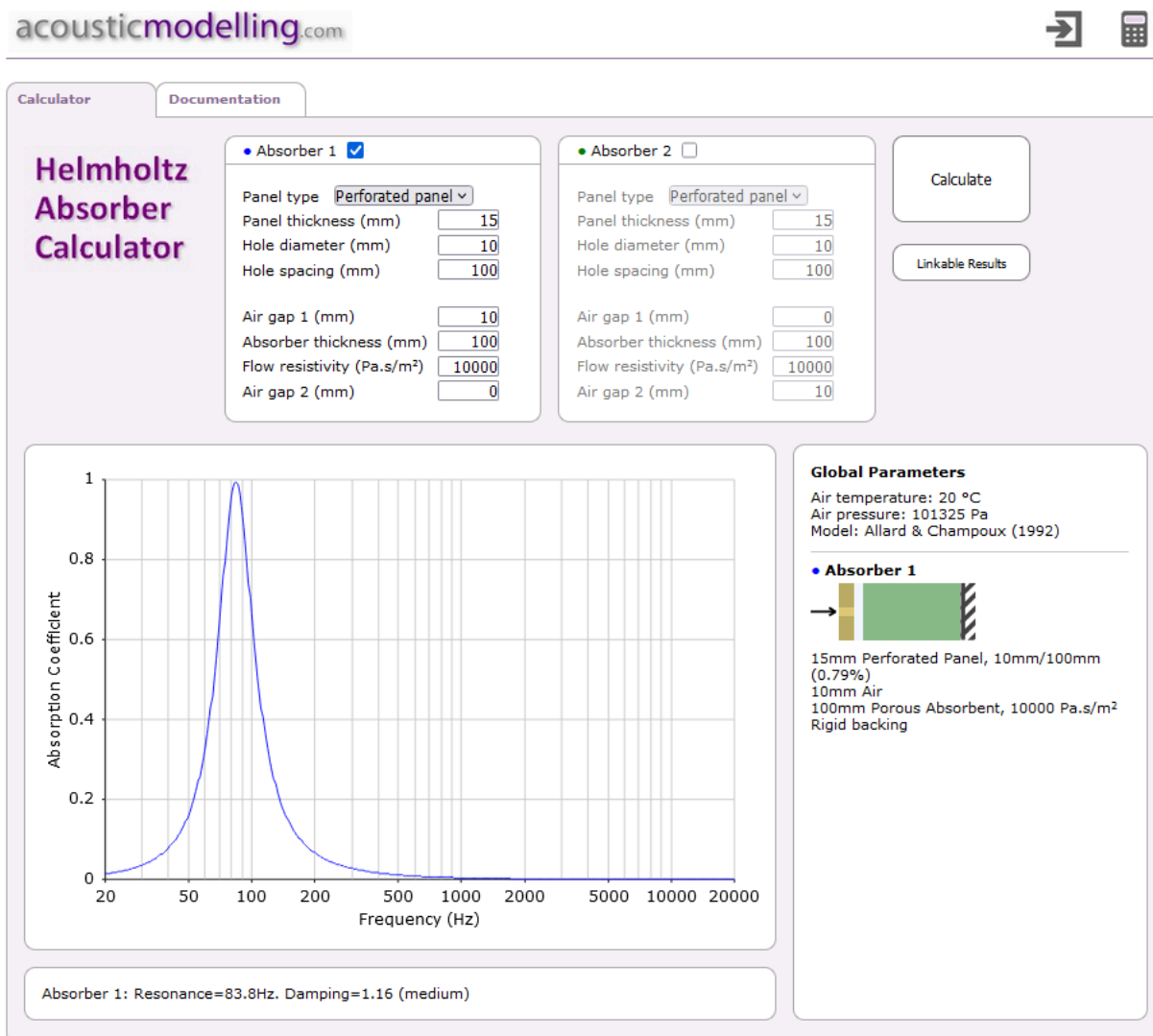


Fonte: [45]

3.2.3 Acoustic Modelling

Esse site permite facilmente, ao inserir os parâmetros e dimensões de um Absorvedor de Helmholtz, ver qual é a frequência que está sendo amortecida pelo instrumento, como mostra a Figura 14.

Figura 14 - Interface do Acoustic Modelling



Fonte: [46]

Com a sala escolhida simulada no amroc, e feitas as varreduras em frequência, testes de tempo de decaimento do som no ambiente, e demais testes necessários para se encontrar os problemas da sala, uma solução específica que pode muito bem ser utilizada, o Absorvedor de Helmholtz, projetado neste programa gratuito, tem sua faixa de frequência de ressonância prevista através da inserção dos parâmetros desejados.

3.2.4 MATLAB Online

O MATLAB Online é uma plataforma de programação e computação numérica de uso comum entre engenheiros e cientistas para analisar dados, desenvolver algoritmos e criar modelos.

Essa ferramenta gratuita é de grande serventia para eventuais problemas matemáticos que surgem ao longo do desenvolvimento do trabalho, como para análise e tratamento dos dados coletados, e para plotar gráficos.

4 DESENVOLVIMENTO

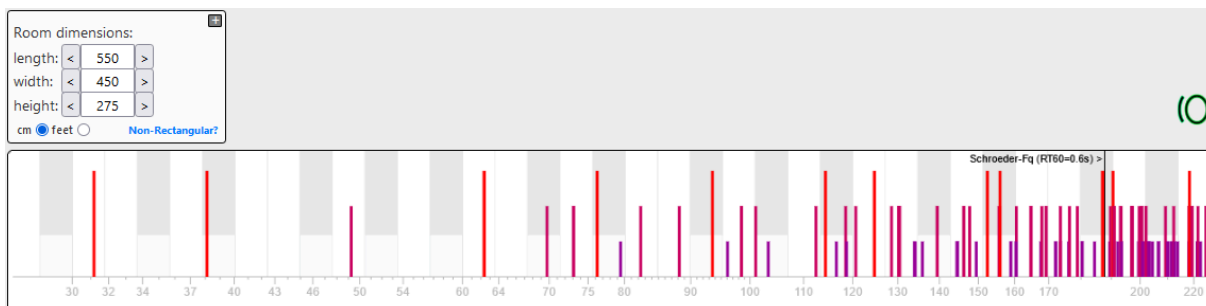
Primeiramente, foram realizadas simulações do ambiente a ser tratado, mas é importante levar em consideração as limitações do software utilizado, onde não foram simulados os detalhes do ambiente, como portas de material diferente da parede, maçanetas, estantes e cadeiras. Assim, o programa foi importante para a compreensão da acústica na geometria do ambiente, mas de uma forma mais genérica, como um guia de onde se deve partir para as medições *in-loco* feitas posteriormente.

4.1 SIMULAÇÃO DA SALA

Para se ter uma noção prévia do que esperar nas varreduras a serem realizadas, é interessante realizar simulações da geometria da sala, levando em conta a altura da sala de 275cm, largura de 450cm, e comprimento de 550cm, em softwares como o REW na ferramenta Room Simulator, e a ferramenta amroc da amcoustics, para a localização de prováveis picos de tempo de ressonância causados por modos presentes dentro da sala. Em análises preliminares pelo grupo de acústica, a faixa de frequência de aproximadamente 124Hz se mostrou perceptivelmente desconfortável.

Nas Figuras 15 e 16, estão os modos acústicos mostrados pelo amcoustics, e pelo REW, respectivamente, sendo a Figura 17 uma legenda para interpretação das cores dos modos da Figura 16.

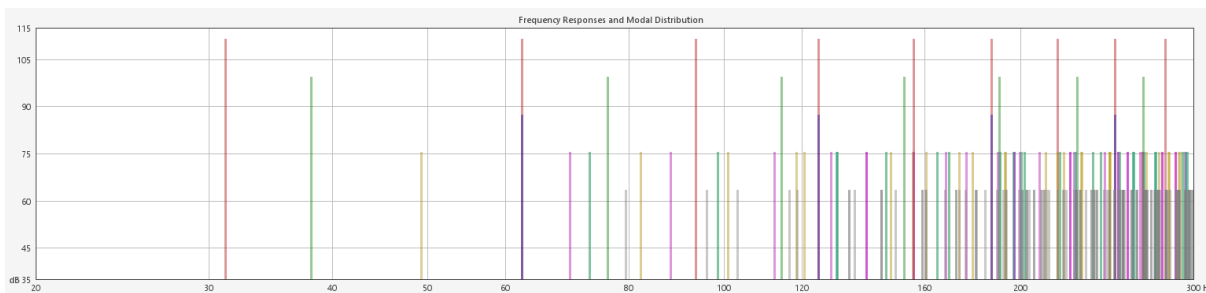
Figura 15: Modos acústicos na sala, amcoustics.



Fonte: autoria própria.

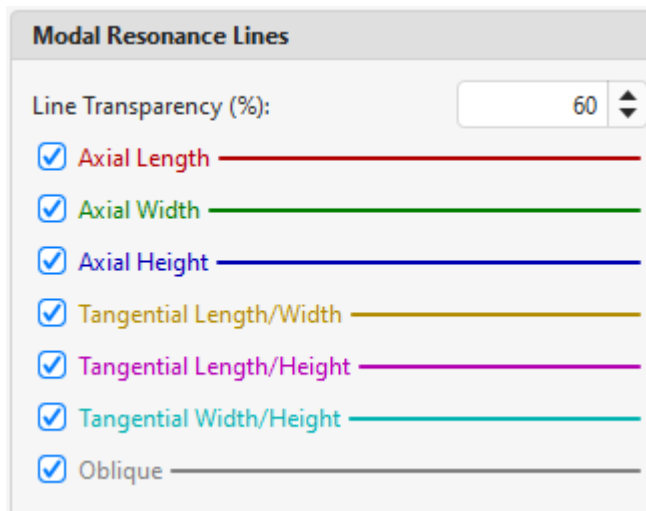
Na Figura 15 é possível ver os modos acústicos da sala, e a Frequência de Schroeder em 188Hz para um RT60 ideal de 0,6s, em que se passa a não mais separar a adição individual de cada modo.

Figura 16: Modos acústicos na sala, REW.



Fonte: autoria própria.

Figura 17: Legenda de cores dos modos do REW.



Fonte: autoria própria.

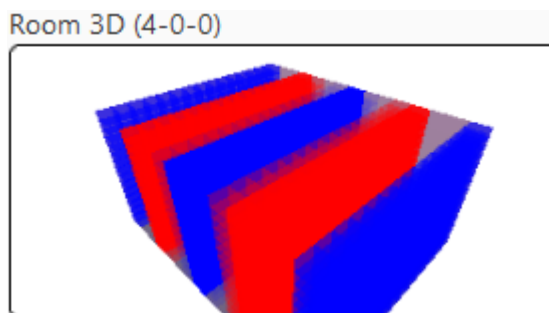
Na Figura 16 está um gráfico equivalente ao anterior, mas dessa vez, gerado pelo REW, onde é possível ver a contribuição dos modos em cada uma das direções possíveis dentro de uma sala, de acordo com as Figuras 4 e 5 mostradas anteriormente.

Como é possível perceber, nas frequências de 62,3Hz e 124,6Hz (uma múltipla da outra), existem dois modos sobrepostos (em cada uma das frequências), nos sentidos da altura e comprimento da sala, decorrente do fato da dimensão da altura ser exatamente metade do comprimento, o que gera múltiplos modos em eixos diferentes dentro da sala. Essa característica da construção da sala a torna muito mais propensa a gerar essas ondas estacionárias nessas frequências específicas, e como elas são sustentadas em dois sentidos dentro da sala, seu tempo de decaimento acaba sendo inadequadamente maior que o desejado, o que pode ser investigado (e posteriormente comprovado) pelo pico nesta região nos gráficos de RT60, mesmo com todos os absorvedores posicionados.

A frequência de 124,6Hz é especialmente desconfortável para os frequentadores da sala, pois essa é aproximadamente a frequência sonora de vários veículos que circulam pela região, como motocicletas, o que acaba gerando um grande reverberação no interior do ambiente. Nas Figuras 18 e 19, podem ser observados os modos nos eixos do comprimento e da altura da sala, com pontos de

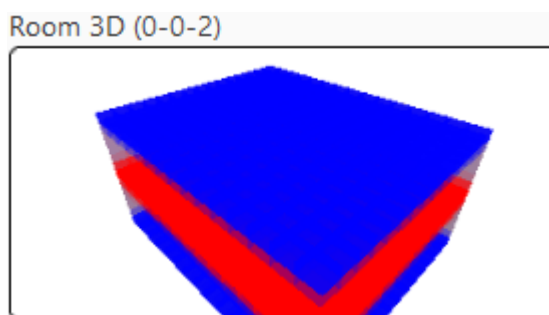
alta e baixa pressão representados por cores, para a mesma frequência de 124,6Hz, o que gera o desconforto característico nessa frequência, e nas Figuras 20 e 21, os modos da frequência de 62,3Hz.

Figura 18: Modo 4-0-0 de 124,6Hz no sentido do comprimento.



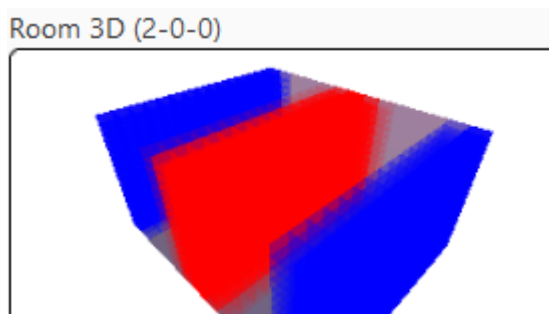
Fonte: autoria própria.

Figura 19: Modo 0-0-2 de 124,6Hz no sentido do da altura.



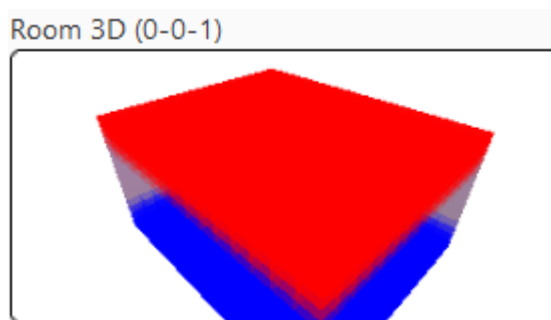
Fonte: autoria própria.

Figura 20: Modo 2-0-0 de 62,3Hz no sentido do comprimento.



Fonte: autoria própria.

Figura 21: Modo 0-0-1 de 62,3Hz no sentido do da altura.



Fonte: autoria própria.

As frequências empiricamente percebidas como sendo desconfortáveis no ambiente, bem como os modos que podem ser problemáticos com um tempo de reverberação acima do ideal, foram investigados nas varreduras posteriores *in-loco*, para comparar e comprovar a teoria prevista por essas simulações.

4.2 VARREDURAS INICIAIS NA SALA

Para a análise da sala em relação à frequência no tempo (RT60), seja em seu tempo de decaimento de intensidade, ou da clareza e definição, foi utilizado o software REW, na ferramenta de medidas, e método de varredura.

Foram testadas 5 diferentes configurações com materiais absorvedores posicionados ao redor da sala, sendo cada configuração seguinte uma adição à configuração anterior, sendo elas: sem nenhum aparato, com cortina, cortina e painel traseiro, cortina com painéis traseiro e lateral, e cortina com um painel traseiro e 2 laterais. E para a medição da sala em cada uma dessas configurações, foram utilizadas 5 posições do microfone para captação de áudio, todas a 70cm de altura, sendo uma no meio da sala, e as 4 restantes em cada um dos cantos da sala, a 90cm de distância das paredes próximas. E para cada cada posicionamento de microfone, e cada configuração da sala, foram realizadas 5 varreduras, ou seja, 125 medidas, excluindo as medidas com claros efeitos de interferência externa ruidosa da média calculada para cada configuração de absorvedores na sala em questão. A sala, bem como o posicionamento de painéis e cortina, e microfone no centro, podem ser observados na Figura 22.

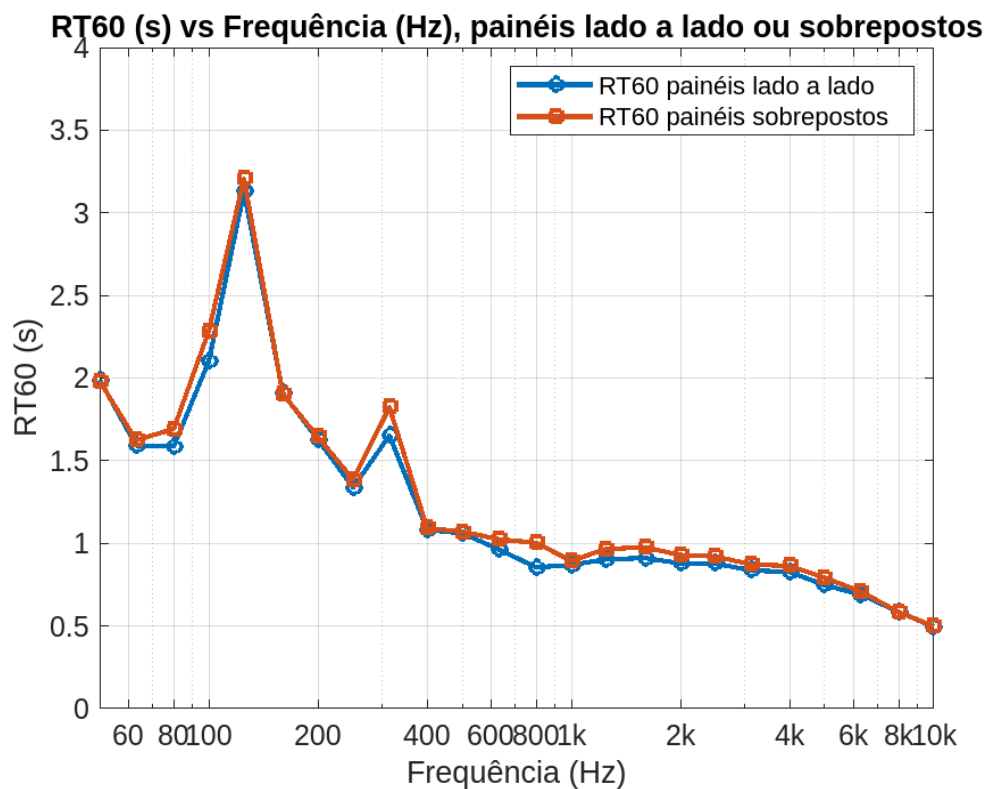
Figura 22: Sala trabalhada e distribuição dos absorvedores, microfone ao centro.



Fonte: autoria própria.

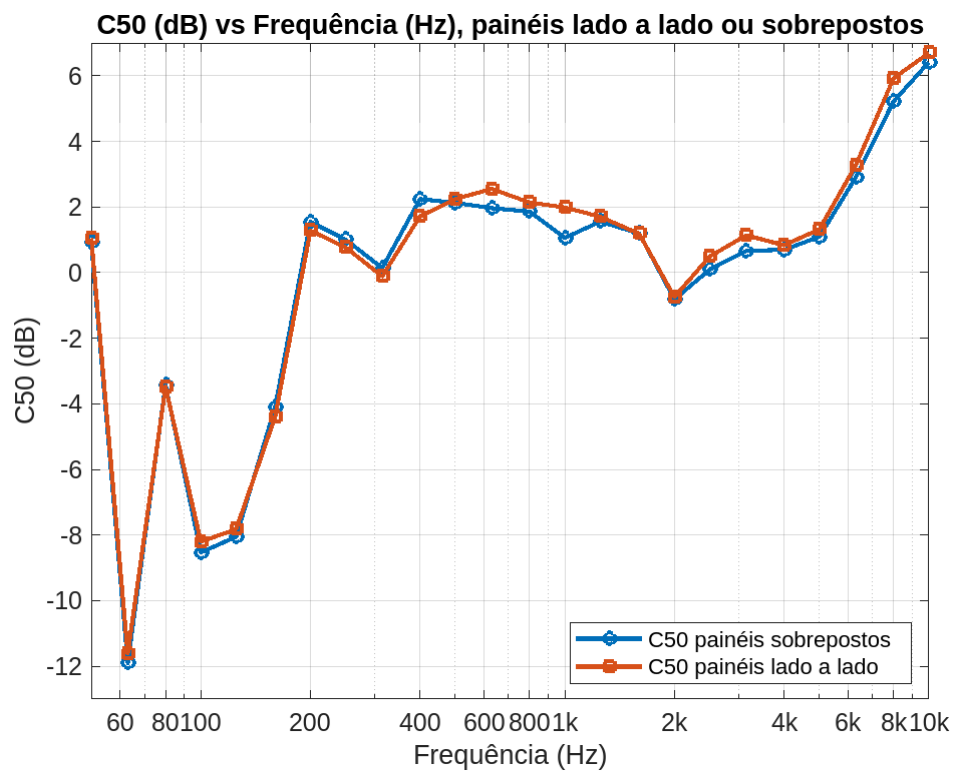
Além da configuração com 2 painéis laterais lado a lado, foi também testada inicialmente uma configuração com 2 painéis laterais sobrepostos um no outro, com o microfone no centro da sala. Os valores de RT60, C50 e D50 para painel de espessura dupla (sobrepostos) ou dois painéis lado a lado (como na Figura 22) podem ser observados nas Figuras de 23, 24 e 25, respectivamente.

Figura 23: RT60 (s) vs Frequência (Hz), painéis lado a lado ou sobrepostos.



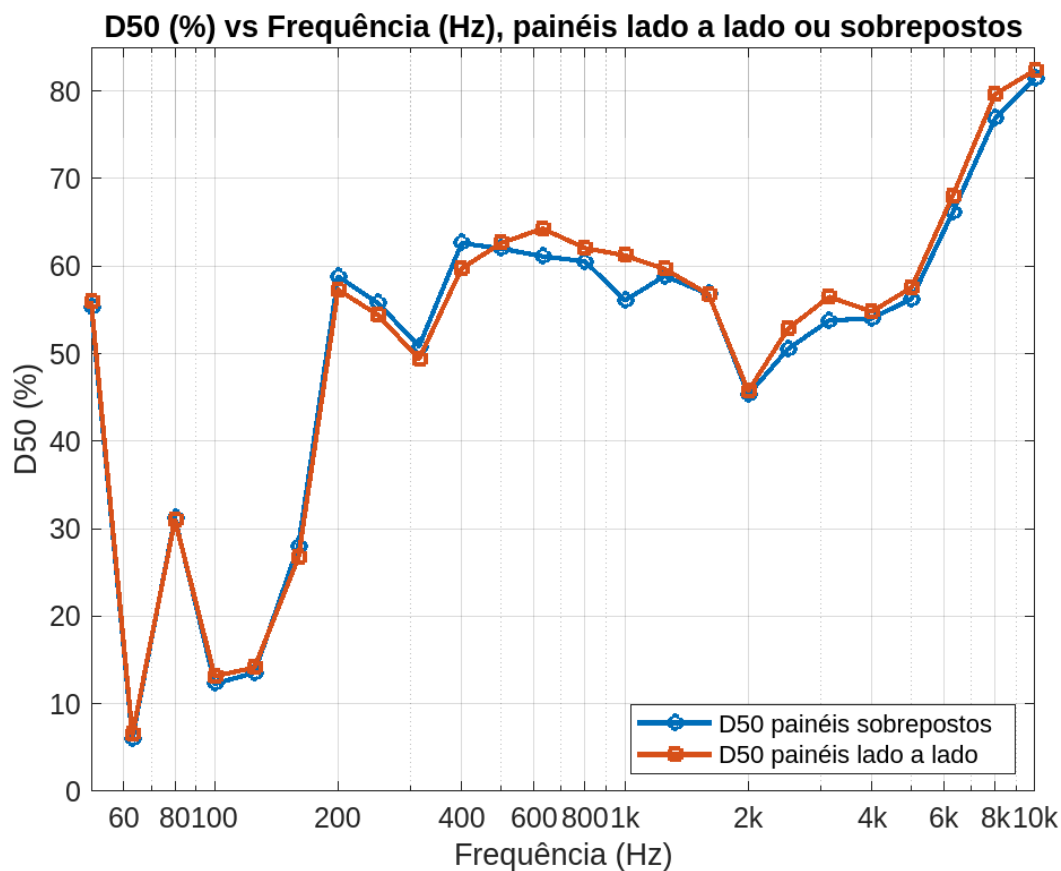
Fonte: autoria própria.

Figura 24: C50 (dB) vs Frequência (Hz), painéis lado a lado ou sobrepostos.



Fonte: autoria própria.

Figura 25: D50 (%) vs Frequência (Hz), painéis lado a lado ou sobrepostos.

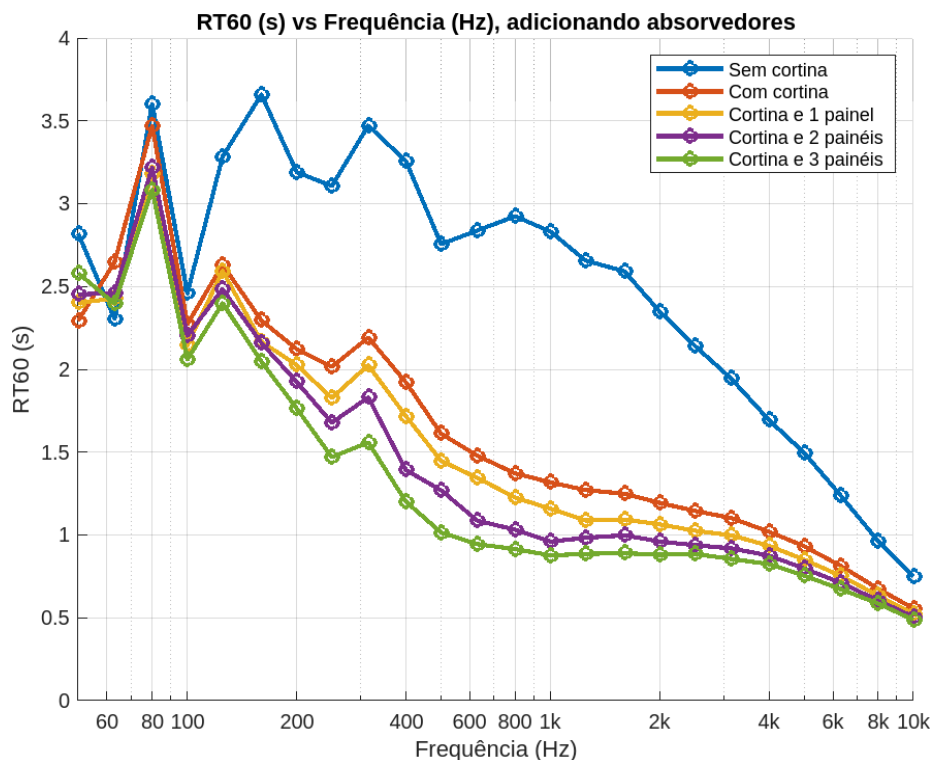


Fonte: autoria própria.

Como as medidas com 2 painéis laterais (lado a lado, como na Figura 22) se mostraram ligeiramente melhores do que a configuração com 2 painéis sobrepostos um sobre o outro, para os 3 parâmetros analisados, e para quase todas as frequências, essa foi a configuração final escolhida para o restante das medidas, para todas as varreduras realizadas neste trabalho.

Terminadas todas as varreduras para cada configuração da sala, em cada posição do microfone, foi feita uma média dos valores encontrados, 5 a 5 (excluindo eventuais medidas com interferência de ruídos externos, como motocicletas), e em seguida, outra média final com as 5 médias de cada posição do microfone para cada configuração de corpos absorvedores na sala. As Figuras de 26, 27 e 28 mostram os resultados finais das medições para cada configuração, sem nenhum absorvedor, e gradualmente adicionando-se cortina, painel traseiro, e os laterais, um por vez, para RT60, C50 e D50, nessa ordem.

Figura 26: RT60 (s) vs Frequência (Hz), adicionando absorvedores.



Fonte: autoria própria.

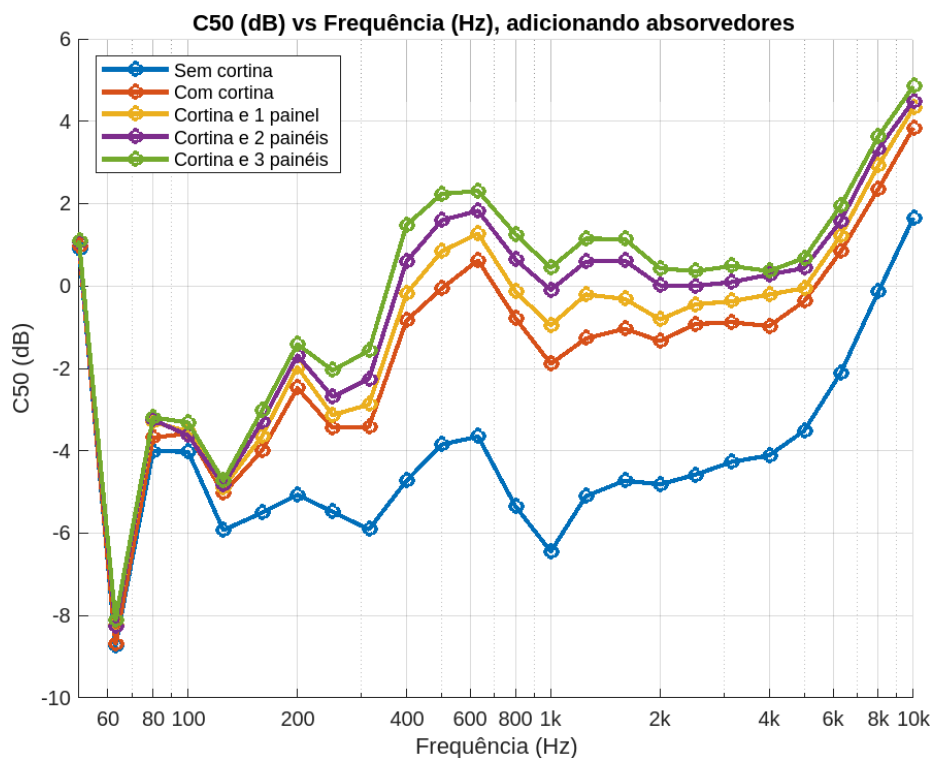
Olhando para a condição inicial de RT60 da sala, sem cortina e painéis, o tempo de reverberação geral se mostrou inadequadamente alto, com notáveis picos nas faixas de frequências de 80Hz e 160Hz de pouco mais de 3,5s, e 315Hz ligeiramente abaixo de 3,5s, especificamente na frequência comum da voz humana. Porém, após cada subsequente adição de corpos absorvedores para o tratamento da sala, nessas frequências mais problemáticas, o tempo de reverberação caiu para quase 3s, um pouco abaixo de 2,5s, e quase 1,5s, respectivamente, o que deixa a sala mais bem posicionada na faixa entre 1,5s e 2,5s de tempo de reverberação sugeridos na Tabela 1, além também de uma notável melhora no tempo de reverberação das frequências mais altas e não muito utilizadas na sala, o que pode ser interpretado como uma rápida atenuação de possíveis ruídos externos indesejados. Essas altas frequências, após a adição da cortina e dos painéis, foram as que mais se aproximaram de um RT60 ideal de 0,5s, de acordo com a Figura 2, mas ainda com possibilidade de melhoria.

Nas frequências de aproximadamente 125Hz, porém, mesmo com todas as adições (até o momento) na sala, ainda existe um pico de tempo de reverberação, o que pode ser explicado pela presença persistente dos modos anteriormente citados,

nos sentidos da altura e comprimento da sala. Em frequências anteriores a isso, por mais que hajam picos de tempo de reverberação também acima do tempo ideal e possivelmente desconfortáveis, empiricamente, durante o uso da sala, elas não são percebidas como tal, por não serem comumentes geradas durante o uso específico para a função da sala, ou por ruídos externos.

Embora a faixa de frequência de 125Hz tenha um claro pico local nos gráficos de RT60, a faixa de frequência de 80Hz também possui um pico, até mesmo maior que o de 125Hz. Pelas Figuras 15 e 16 dos modos acústicos da sala, é possível notar que existem sim modos nessa frequência na sala trabalhada, inclusive, modos em mais de um sentido que coincidem nessa mesma frequência, por volta dos 80Hz. Embora as curvas de RT60 sem tratamento nenhum e tratamento completo mostrem que essa é uma frequência problemática, ela ainda segue sendo menos excitada dentro do ambiente, seja por conta do uso específico dela, ou por conta dos ruídos externos que costumam ser em frequências superiores (como por volta dos 125Hz), portanto, não sendo a região de frequências próximas a 80Hz (e abaixo dela) de grande incômodo para quem frequenta a sala.

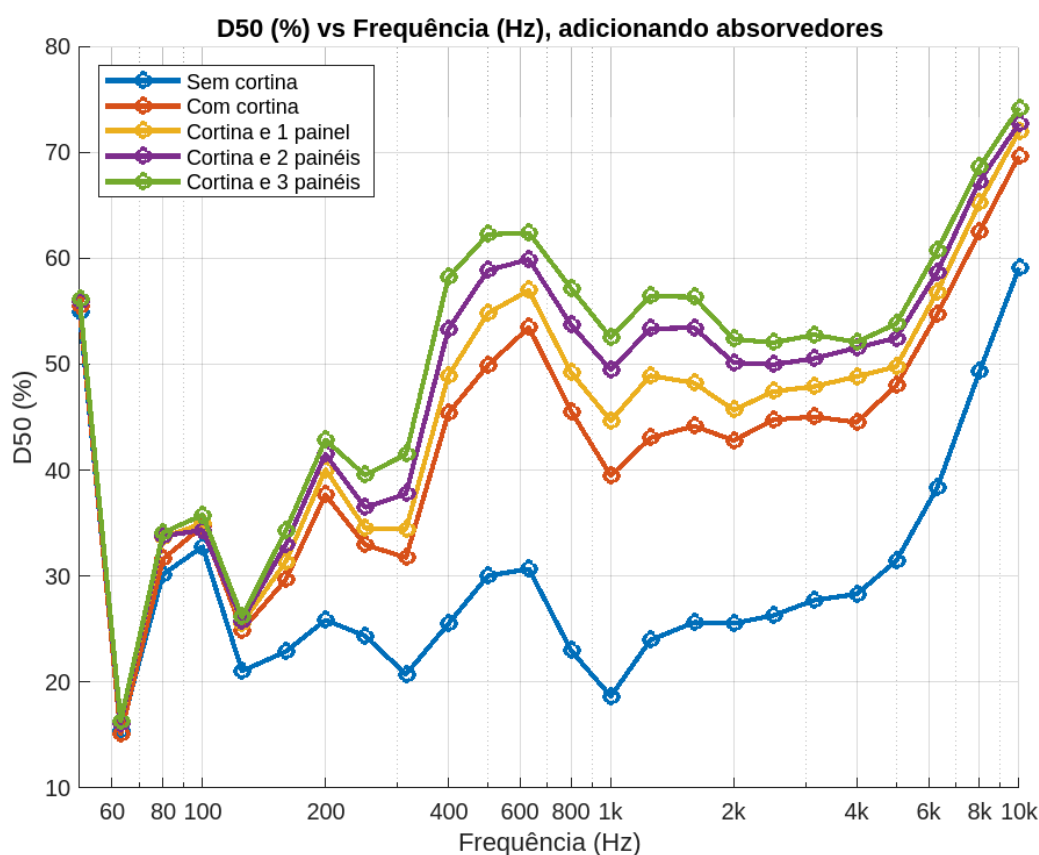
Figura 27: C50 (dB) vs Frequência (Hz), adicionando absorvedores.



Fonte: autoria própria.

Já para a Clareza, na faixa de frequências entre 80Hz e 5kHz, inicialmente ela variou entre valores de -4 e -6, melhorando após o tratamento para valores entre -2 e -4 na faixa da voz humana, e 0 e -2 na faixa de frequências superiores entre 400Hz e 6kHz, aproximadamente. A evolução das curvas de C50 da Figura 27 com a adição de cada corpo absorvedor reafirma a melhoria que a sala apresentou na Figura 26 com o parâmetro de RT60, em especial para as frequências a partir de 400Hz.

Figura 28: D50 (%) vs Frequência (Hz), adicionando absorvedores.



Fonte: autoria própria.

E para a Definição, em valores de frequência usuais para a fala e até um pouco mais superiores, de 60Hz até 5kHz, o D50 medido esteve aproximadamente na faixa entre 0.05 a 0.35, e após o posicionamento dos aparatos acústicos, esse parâmetro foi melhorado para uma faixa aproximadamente entre 0.25 e 0.45 para a frequência usual da fala, e valores ainda melhores, entre 0.5 e 0.65, para frequências entre 400Hz e 6.3kHz, elevando assim a sala de uma inteligibilidade entre "ruim" e "pobre", a "pobre" e "razoável", de acordo com a Tabela 2. Uma

melhora significativa, mas que ainda pode ser melhor trabalhada, e será testada com a adição do Absorvedor de Helmholtz.

Como é possível perceber com os gráficos das Figuras 26, 27 e 28, os parâmetros RT60, C50, e D50 foram significativamente melhorados com a adição da cortina, sendo ela a melhor adição, de mais fácil aquisição e posicionamento, e esteticamente mais agradável para o ambiente. A subsequente adição dos 3 painéis, na configuração escolhida de 1 traseiro e 2 laterais lado a lado, também se mostrou de grande importância, atenuando ainda mais o tempo de reverberação, mas sem impacto negativo na inteligibilidade dos sons na sala, aumentando também a Clareza e a Definição.

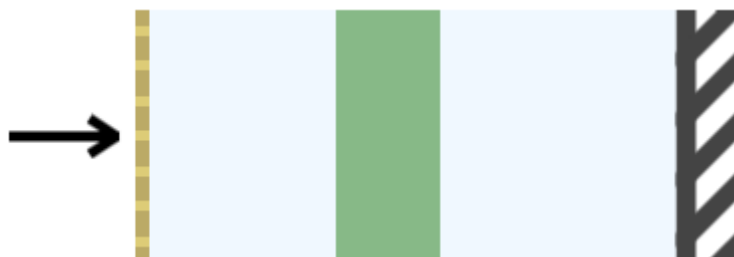
Considerando a serventia e utilidade da sala tratada, como sendo mais próxima de uma sala mista para (majoritariamente) fala e (minoritariamente) música, de acordo com a Tabela 1, o RT60 ideal fica na faixa entre 1.5s e 2.5s, e é importante ressaltar que a frequência média da voz humana varia entre 100Hz e 300Hz, desde homens, com voz mais grave, a mulheres e crianças, com a voz mais aguda [47].

4.3 PRODUÇÃO DO ABSORVEDOR DE HELMHOLTZ, E TESTES

Uma solução específica para o problema enfrentado é a criação do Absorvedor, ou Ressorador de Helmholtz. Foi experimentada, porém, uma ideia não usual para a confecção desse instrumento.

Os Absorvedores de Helmholtz, com o formato de caixa, usualmente são confeccionados com uma das superfícies coberta por furos, e as outras todas inteiras, com um material absorvedor paralelo à face perfurada. Um esquemático em duas dimensões, como um corte lateral, pode ser visualizado na Figura 29:

Figura 29: Corte lateral do Absorvedor de Helmholtz (altura, 62,4Hz).



Fonte: [46].

É possível identificar neste corte que representa um sentido da caixa, da esquerda para a direita: o painel perfurado, o primeiro espaço de ar (*air gap*) em azul, um absorvedor em verde, o segundo *air gap*, e o aparato fixo ao fundo em preto.

Para o nosso projeto, porém, como existe mais de uma frequência problemática e que se deseja abafar, foi confeccionado um Ressonador com painéis perfurados, absorvedores, e espaços de ar em duas direções, sendo elas: profundidade (para absorver na frequência de 124Hz), e altura (para absorver em 62Hz). As dimensões do Ressonador previsto podem ser vistas na Figura 30, bem como o gráfico de absorção prevista para ambas as frequências na Figura 31, sendo as curvas azul e verde dos absorvedores 1 e 2, respectivamente, também representados em cores na Figura 30. Um desenho preliminar da parte externa feito pelo programa OpenSCAD, pode ser visto na Figura 32.

Figura 30 - Interface do Acoustic Modelling com parâmetros reais utilizados.

Helmholtz Absorber Calculator

• Absorber 1

Panel type Perforated panel

Panel thickness (mm)

Hole diameter (mm)

Hole spacing (mm)

Air gap 1 (mm)

Absorber thickness (mm)

Flow resistivity (Pa.s/m²)

Air gap 2 (mm)

• Absorber 2

Panel type Perforated panel

Panel thickness (mm)

Hole diameter (mm)

Hole spacing (mm)

Air gap 1 (mm)

Absorber thickness (mm)

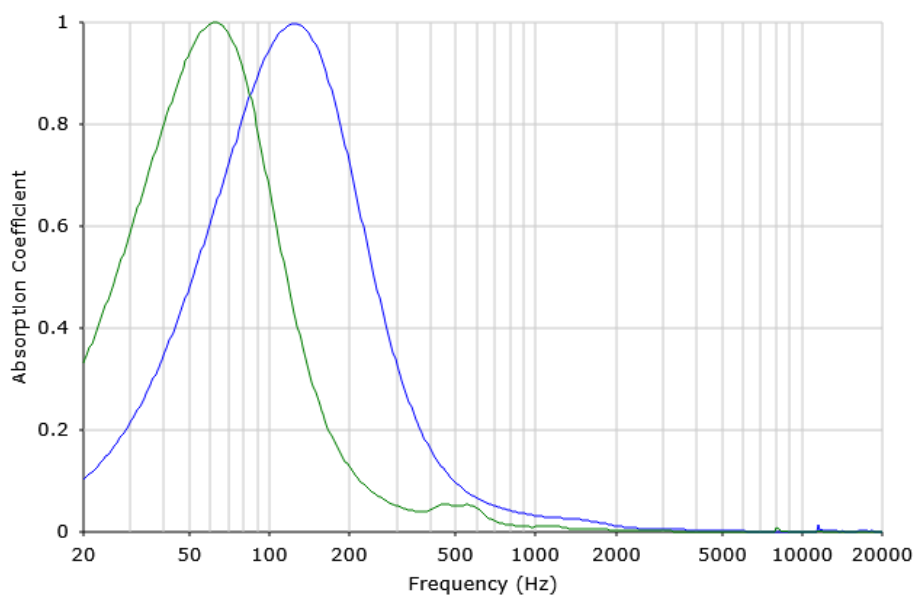
Flow resistivity (Pa.s/m²)

Air gap 2 (mm)

Fonte: [46]

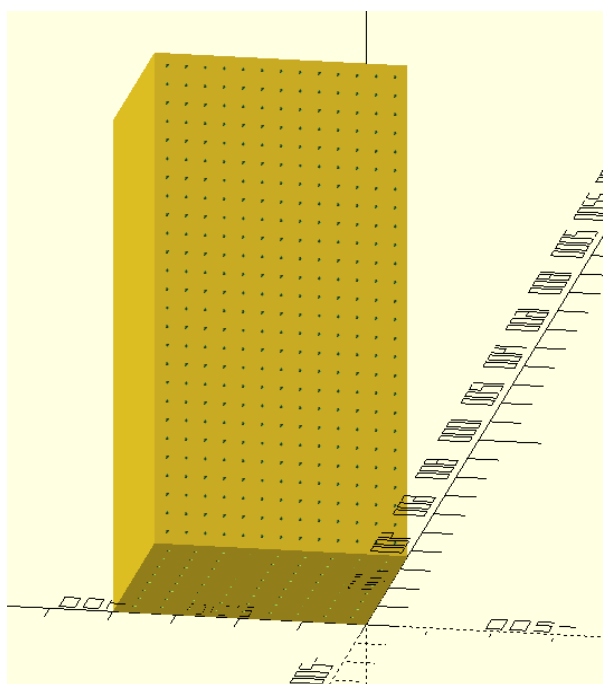
Os parâmetros da Figura 30: Espessura do Painel (*panel thickness*), Diâmetro do furo (*Hole diameter*), Espaçamento dos furos (Hole spacing), Espaçamento de ar (*Air gaps 1 e 2*), Espessura do absorvedor, ou espuma (*Absorber thickness*), podem ser visualizados na Figura 29, juntamente com a descrição dela.

Figura 31 - Gráfico com as absorções previstas do Ressonador previsto.



Fonte: [46]

Figura 32 - Desenho da parte externa do Absorvedor.



Fonte: autoria própria

No desenho da Figura 32, pode-se entender melhor a proposta do Ressorador, com os parâmetros da sua dimensão de profundidade sendo especificados para absorver a frequência de 124Hz, e os parâmetros da dimensão da altura sendo especificados para absorver a frequência de 62Hz.

O Ressorador, quando finalmente produzido (cortado, perfurado, encaixado), foi novamente medido, e algumas diferenças em relação ao projeto inicial foram encontradas. Algumas dessas diferenças são inalteráveis, como o espaçamento ligeiramente maior entre os furos, quantidade de furos para encaixá-los de forma centralizada, e dimensões da caixa, enquanto que outros parâmetros diferentes são ainda ajustáveis, como o espaçamento de ar entre a espuma interna e as faces do Ressorador. Portanto, para tentar compensar as diferenças inalteráveis (furos, espaçamentos, dimensões das faces) e adaptar a caixa construída novamente às frequências que se deseja absorver, os parâmetros ainda modificáveis foram reajustados numa tentativa teoricamente exitosa de readaptar o instrumento às frequências desejadas de 124Hz e 62Hz. Os parâmetros finais, da caixa real e pronta, podem ser observados na Figura 33, e gráfico com as absorções previstas, na Figura 34.

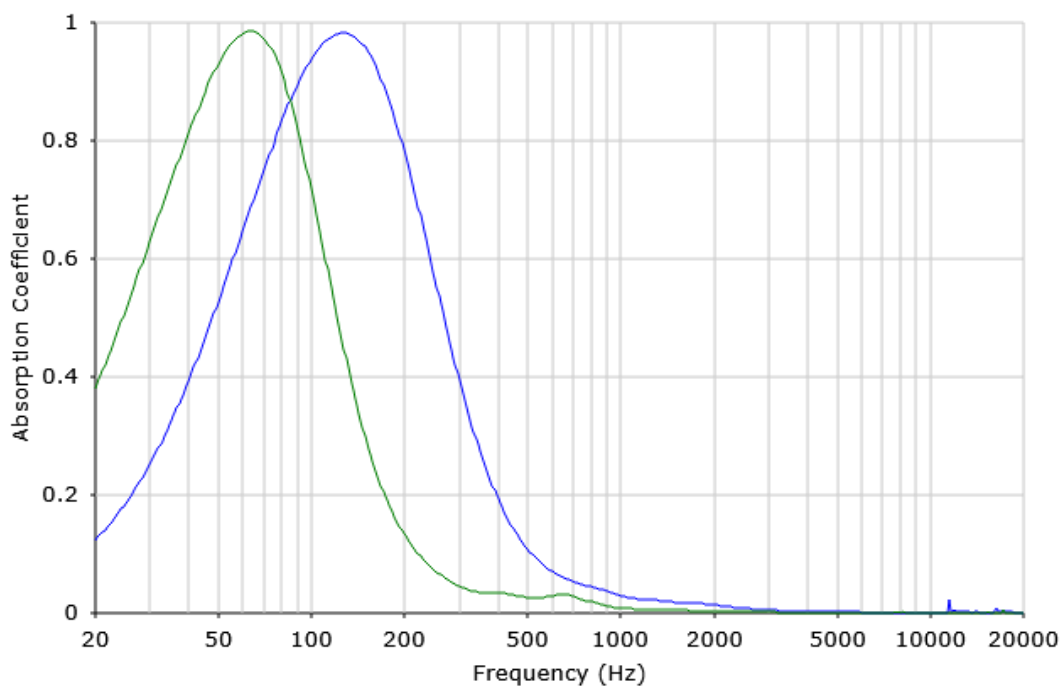
Figura 33 - Interface do Acoustic Modelling com parâmetros reais utilizados.

The image shows the 'Helmholtz Absorber Calculator' interface. It features two panels for configuring absorbers. The left panel is for 'Absorber 1' and the right panel is for 'Absorber 2'. Both panels have a 'Panel type' dropdown set to 'Perforated panel'. The parameters for each absorber are as follows:

Parameter	Absorber 1 Value	Absorber 2 Value
Panel type	Perforated panel	Perforated panel
Panel thickness (mm)	15	15
Hole diameter (mm)	6	6
Hole spacing (mm)	30	45
Air gap 1 (mm)	70	210
Absorber thickness (mm)	150	150
Flow resistivity (Pa.s/m ²)	10000	10000
Air gap 2 (mm)	145	400

Fonte: [46]

Figura 34 - Gráfico com as absorções previstas do Ressorador feito.



Fonte: [46]

O Ressorador, uma vez montado e pronto, ficou com as seguintes especificações:

- 790mm de altura;
- 395mm de profundidade;
- 400mm de largura;
- Furos de 6mm de diâmetro e 45mm de espaçamento na face frontal;
- Furos de 6mm de diâmetro e 30mm de espaçamento na face inferior;
- *Air gaps* de 70mm e 145mm no sentido da profundidade;
- *Air gaps* de 210mm e 400mm no sentido da vertical;
- Espumas de 150mm de espessura, posicionadas entre os *air gaps*, e com 50mm de distância da face perfurada perpendicular a elas;
- Absorvedor 1: Ressonância = 125Hz. Amortecimento = 1,31 (médio);
- Absorvedor 2: Ressonância = 62,3Hz. Amortecimento = 1,28 (médio).

Uma imagem do Ressorador confeccionado e pintado (com a segunda face perfurada voltada para o chão) pode ser vista na Figura 35:

Figura 35: Ressorador de Helmholtz pronto.



Fonte: autoria própria.

Um ponto importante de se ressaltar é quanto ao posicionamento do Ressorador. Caso ele seja colocado em um ponto da sala em que praticamente não há alteração na pressão do ar, por não ser um ponto de picos, ele não terá sua máxima efetividade. Para tanto, é importante que o Ressorador seja colocado sobre o ponto onde há a maior concentração de picos modais. Observando as Figuras 18, 19, 20 e 21 com os modos acústicos presentes na sala, se mostra prudente escolher um dos cantos da sala, pois todos os modos geram picos nessas regiões.

Há um conjunto de testes e análises teóricas, além dos práticos realizados *in-loco*, cuja realização é interessante para se averiguar a sensibilidade da eficiência do Ressorador projetado de acordo com variações em alguns parâmetros que não nos são completamente previsíveis, por apresentarem ligeiras alterações devido à imprecisão de fabricação, ou mudanças de acordo com o orçamento em projetos

futuros. Análises também quanto a variações de parâmetros de construção, como espaçamento entre os furos, também são de interesse para o projeto. As análises e discussões dessa sensibilidade dos parâmetros de performance do Ressorador em relação aos parâmetros construtivos são discutidas a seguir.

4.3.1 Sensibilidade do Ressorador a variações na resistividade ao fluxo de ar da espuma.

Uma das análises de sensibilidade é quanto à variação da frequência do pico de absorção, e ao parâmetro de amortecimento, quando se altera a resistividade ao fluxo de ar do material absorvedor interno do Ressorador.

A resistividade ao fluxo de ar do material (σ) é uma das características físicas de maior interesse de um absorvedor poroso, para a absorção sonora. Ele representa a capacidade de penetração do ar nos poros do material, quando o fluxo de ar o atravessa [48]. Já o Fator de Amortecimento (*Damping Factor*) é uma medida do amortecimento de um sistema ressonante, ligado a quanta energia é dissipada por ciclo de oscilação. É relacionada à largura de banda, pela Equação 4:

$$\Delta f = 2\zeta f_0 \quad (4)$$

Sendo:

Δf = Largura de banda;

f_0 = Frequência específica;

ζ = Fator de amortecimento.

Assim, um alto fator de amortecimento (ζ) resulta em uma largura de banda maior (Δf), indicando que o sistema responde a uma faixa mais ampla de frequências, o que compensa alguma ligeira diferença entre a frequência de pico de absorção real da caixa e as frequências ressonantes (modos) do ambiente tratado.

Essa análise se faz importante, uma vez que o material absorvedor interno utilizado para a confecção do Ressorador deste projeto foi obtido sem que o fornecedor fosse capaz de definir esse parâmetro de resistividade ao fluxo. Porém,

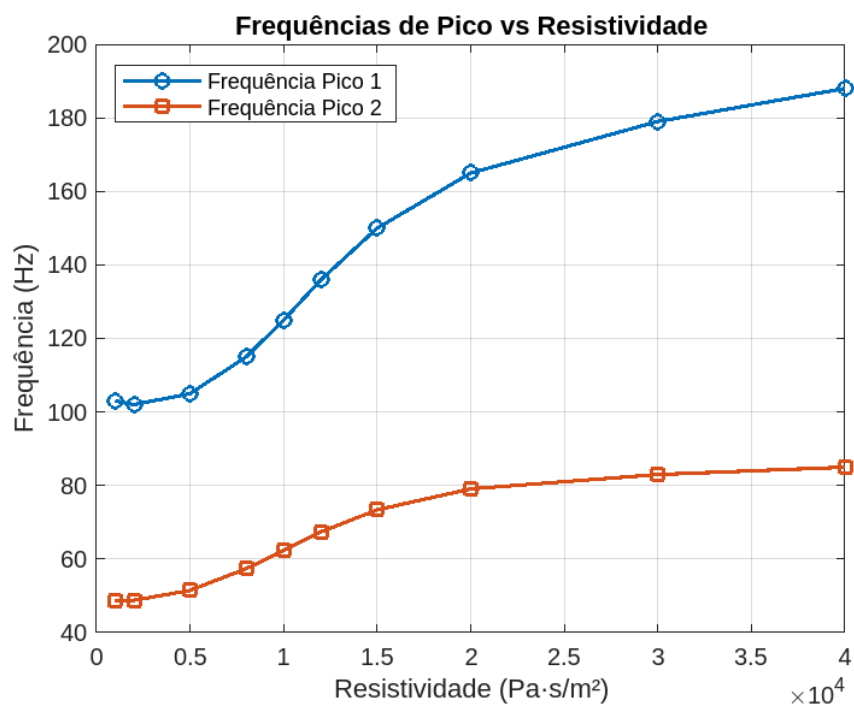
baseado nesse estudo, e na pesquisa de materiais semelhantes [49], foi escolhido utilizar 10.000 Pa.s/m^2 para o valor dessa resistividade.

Para compensar essa incerteza, e também investigar se um eventual desvio do valor real da resistividade poderia afetar significativamente a eficiência do Ressorador, foram feitas pelo programa Acoustic Modelling várias simulações com diferentes valores de resistividade ao fluxo de ar do material, valores estes que cobrem a faixa esperada da resistividade da espuma usada neste projeto (baseado em materiais semelhantes [48] e [49]), e também valores que vão além dessa faixa, a fim de encontrar alguma eventual tendência na variação da frequência de pico de absorção.

Quanto ao parâmetro de amortecimento, os mesmos dados foram coletados, variando o mesmo parâmetro (resistividade ao fluxo de ar), enquanto os demais parâmetros (diâmetro e espaçamento entre os furos, dimensões das faces, *air gaps*) foram mantidos sem variação, para que pudesse ser analisada a sensibilidade do amortecimento do Ressorador exclusivamente à variação da resistividade da espuma.

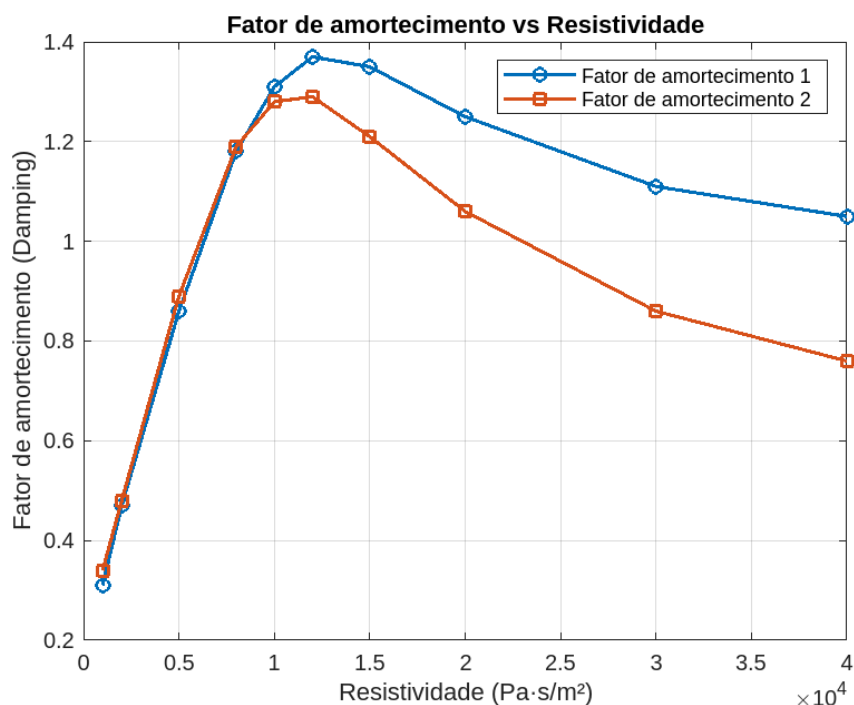
Foram gerados quatro gráficos, um com a variação da frequência de pico de absorção, e outro com o amortecimento, ambas em função da resistividade da espuma, em escala normal, e outros dois gráficos com as mesmas informações, porém na escala semi-log, todos com as curvas das duas faces perfuradas, para 125Hz (dimensão 1, da profundidade do Ressorador) e 62Hz (dimensão 2, da altura) em cada um dos gráficos, como se pode observar nas Figuras 36, 37, 38 e 39:

Figura 36: Frequências de pico de absorção vs Resistividade ao fluxo de ar.



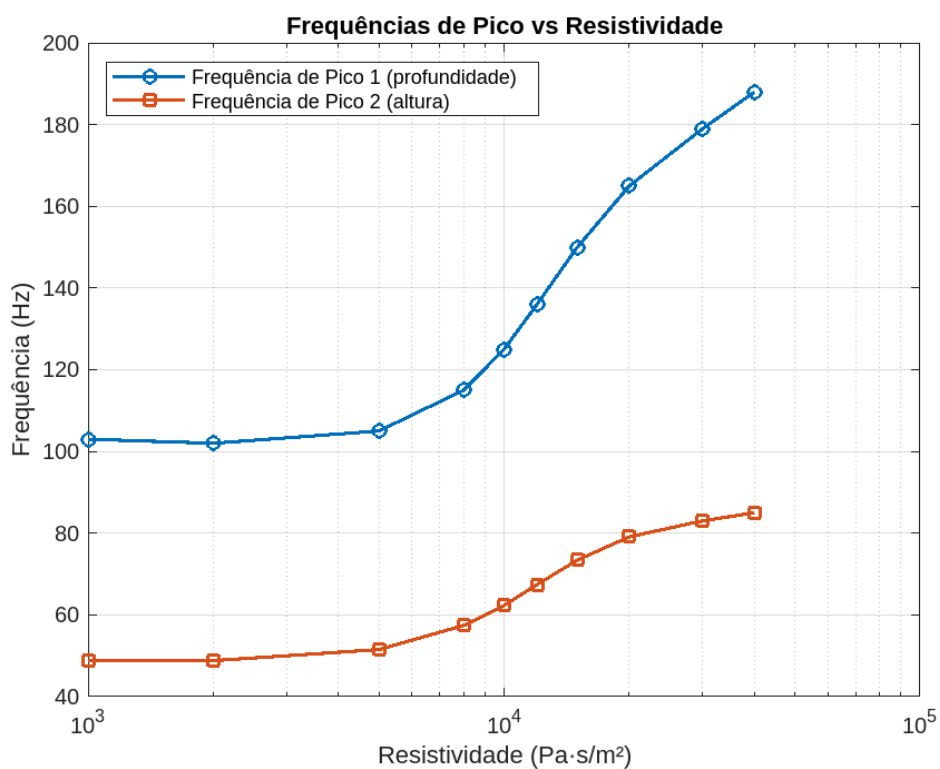
Fonte: autoria própria.

Figura 37: Amortecimento vs Resistividade ao fluxo de ar.



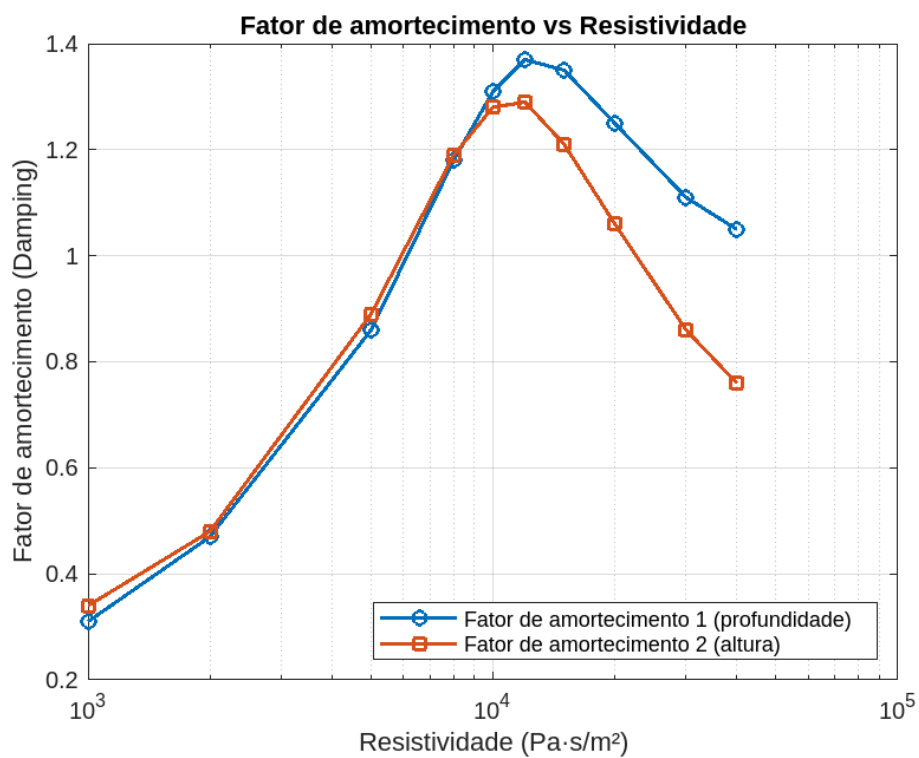
Fonte: autoria própria.

Figura 38: Frequências de pico de absorção vs Resistividade ao fluxo de ar (semi-log).



Fonte: autoria própria.

Figura 39: Amortecimento vs Resistividade ao fluxo de ar (semi-log).



Fonte: autoria própria.

Dos gráficos das Figuras 36 e 38, pode ser obtida a informação de que no entorno da resistividade esperada para a espuma utilizada (10.000 Pa.s/m^2), é justamente onde a frequência do pico de absorção apresenta maior sensibilidade. Isso é negativo para a previsibilidade da eficiência no projeto, caso a espuma utilizada tenha sua resistividade um pouco distante do esperado, de acordo com a comparação com materiais (espumas) semelhantes.

Considerando a variação da frequência de pico de absorção como linear na faixa de valores entre 5000 e 15000 Pa.s/m^2 , nas Figuras 36 e 38, há uma variação possível de 10 Hz positivos e negativos, em torno dos 10.000 Pa.s/m^2 esperados, para o caso da ressonância no sentido da altura da caixa, e de cerca de 22 Hz positivos e negativos para o caso da ressonância no sentido da profundidade do Ressorador.

Para a frequência de absorção 1, considerando também como referência a previsão da resistividade da espuma usada de 10.000 Pa.s/m^2 , isso equivale a uma diferença de 20 Hz a menos de pico com uma redução de 5.000 Pa.s/m^2 , e 25 Hz para 5.000 Pa.s/m^2 a mais, ou seja, uma queda de 16% para uma resistividade metade (50% abaixo) daquela prevista para o material usado, ou um aumento de 20% para um aumento de 50% da resistividade da espuma. Já para a frequência do pico de absorção 2, com uma queda para 5.000 Pa.s/m^2 , a frequência recede $10,8 \text{ Hz}$ ($17,3\%$), e para um aumento de 5.000 Pa.s/m^2 , a frequência aumenta em $11,1 \text{ Hz}$ ($17,8\%$), para variações de 50% na resistividade, comparados com os $62,3 \text{ Hz}$ dos 10.000 Pa.s/m^2 previstos para a espuma.

Por outro lado, nos gráficos 37 e 39, é perceptível que no entorno da resistividade esperada da espuma usada no projeto (caso haja uma variação não conhecida na sua resistividade), é também onde há o maior fator de absorção, ou em termos práticos, a maior largura de banda da curva de absorção do Ressorador. Desta maneira, embora haja a desvantagem da resistividade da espuma nos entornos de 10.000 Pa.s/m^2 ser justamente a faixa de valores com maior sensibilidade às variações desse parâmetro de resistividade, essa é também a região com maior largura de banda, o que faz com que a absorção pelo Ressorador ainda seja consideravelmente alta, mesmo se houver algum deslocamento do pico das

frequências absorvidas pelo Ressonador para a esquerda ou direita do esperado no gráfico, para uma resistividade da espuma diferente do valor esperado.

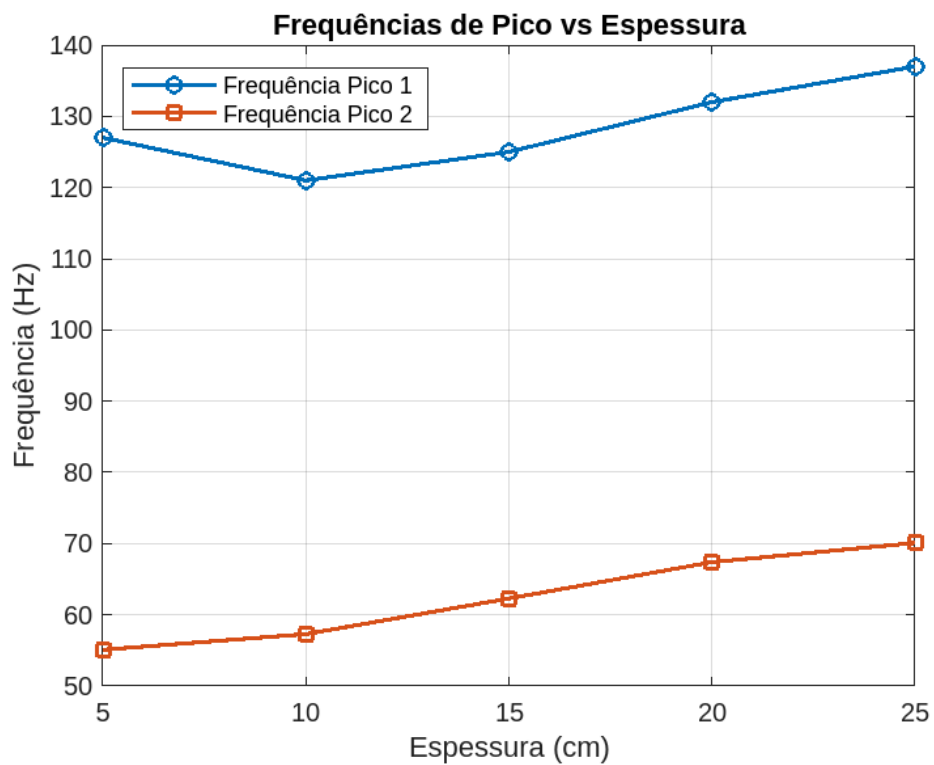
Embora os gráficos das Figuras 36 e 38 mostrem que pode haver um desvio significativo entre a frequência de pico de absorção esperada e a real, caso a resistividade da espuma seja ligeiramente diferente do valor esperado, os gráficos das Figuras 37 e 39 ainda trazem a segurança de que é justamente nessa faixa de valores de resistividade em que a largura da curva de absorção é maior. Assim, o Ressonador ainda terá uma alta eficiência, mesmo no caso da espuma ter uma resistividade diferente dos 10.000 Pa.s/m^2 esperados e os picos de absorção não acontecerem exatamente nas frequências desejadas, pois elas ainda estarão próximas do pico da eficiência da absorção do Ressonador de Helmholtz, por conta desta satisfatória largura de banda. Entretanto, caso haja um grande desvio na Resistividade ao fluxo da espuma utilizada, ainda mais caso em conjunto com outros desvios em algum dos demais parâmetros do Ressonador, podem ocorrer desvios significativos nas frequências absorvidas.

4.3.2 Sensibilidade do Ressonador a variações na espessura da espuma.

Outro teste de sensibilidade relevante para o projeto, é quanto aos efeitos na frequência de pico de absorção, e na absorção, ou largura de banda da curva de absorção, conforme se altera a espessura da espuma interna do Ressonador.

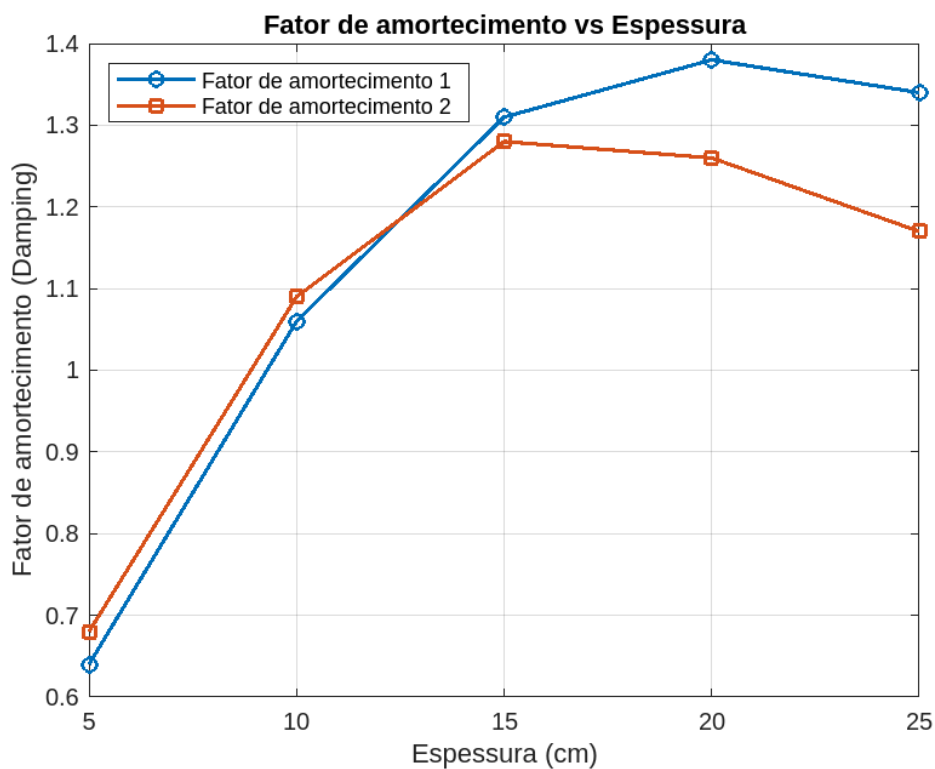
Semelhante às Figuras 37 e 38, as Figuras 40 e 41 mostram a variação da frequência de pico de absorção, e da largura de banda (ou absorção), conforme se varia a espessura da espuma interna (consequentemente aumentando os *air gaps*), mantendo demais parâmetros sem alteração:

Figura 40: Frequência de pico de absorção vs Espessura da espuma.



Fonte: autoria própria.

Figura 41: Amortecimento vs Espessura da espuma.



Fonte: autoria própria.

Experimentalmente, através do Acoustic Modelling, foi encontrado que espessuras maiores das espumas internas de absorção são mais eficientes para uma curva de absorção de maior largura, porém até os 20cm de espessura. Após esse ponto, a absorção começa a cair, o que torna esse aumento contraprodutivo, além de ser economicamente desvantajoso uma espuma tão espessa, o que prova que nem sempre “mais” é “melhor”,

Já quanto à frequência do pico de eficiência do Ressorador, dentro dos valores cabíveis para o caso do Ressorador construído, ela apresenta a tendência de aumentar conforme a espessura da espuma também aumenta, o que pode ser equilibrado ou contrabalanceado através de outros ajustes, como o dos espaços de ar, ou dimensões da caixa.

Considerando a variação do fator de amortecimento como linear na faixa de mais ou menos 50mm em relação 100mm de espessura da espuma de referência, ela sofre uma alteração de 39,6% para menos, e 23,6% para mais, no caso fator de amortecimento 1 (espuma vertical, no sentido da profundidade da caixa), e de 37,6% para menos e de 14,8% para mais no caso do fator de amortecimento 2 (espuma horizontal, da altura).

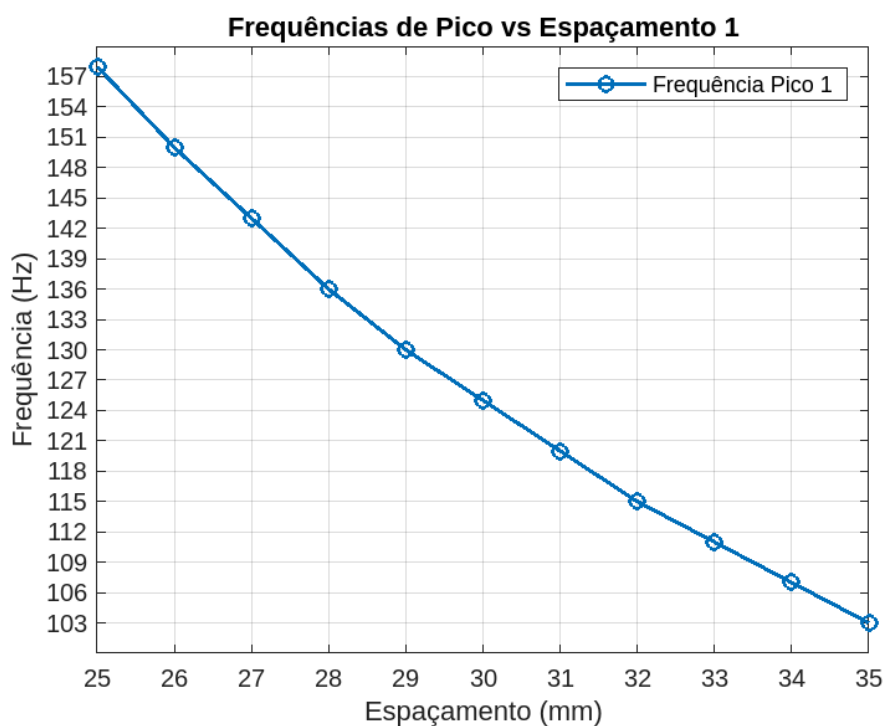
Resumidamente, por mais que espumas mais espessas tenham uma eficiência maior, esses ganhos são marginais, e ainda só ocorrem até certo ponto, além de que o custo do material absorvedor em grande volume pode ser um fator limitante para a viabilidade econômica do Ressorador, ou interesse de algum eventual cliente e comprador deste instrumento.

4.3.3 Sensibilidade do Ressorador a variações no espaçamento entre os furos.

Seguindo a mesma linha de raciocínio dos casos anteriores, um parâmetro interessante de se analisar a sensibilidade ao ser variado, é o do espaçamento entre os furos nos painéis perfurados, uma vez que, por terem sido calculados muito precisamente, e terem dimensões muito diminutas (furos de 6mm de diâmetro, e espaçamento de 30mm e 45mm), há a possibilidade de ligeiros erros nas perfurações durante a confecção do instrumento.

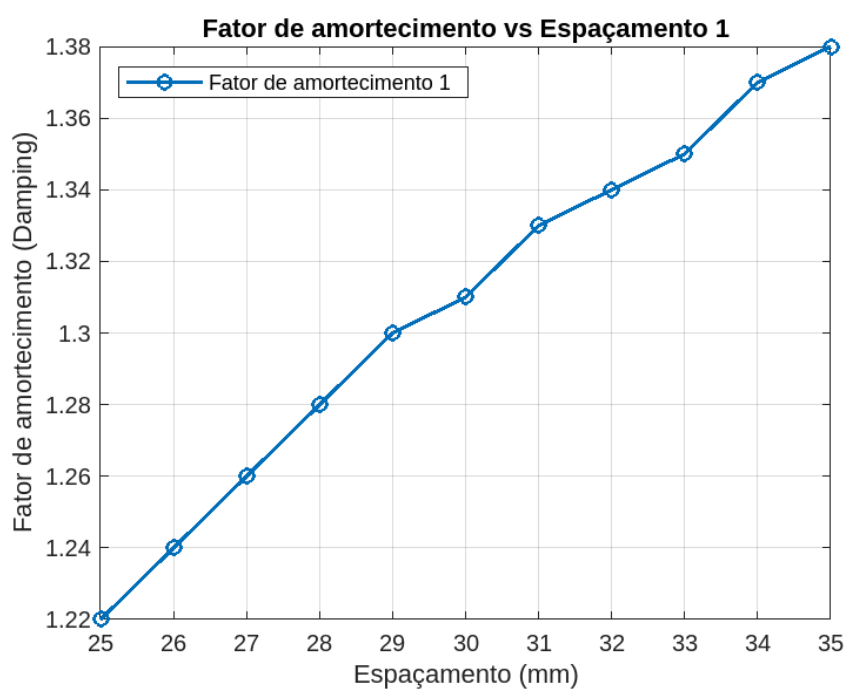
Assim sendo, são mostradas nas Figuras 42, 43, 44 e 45, as frequências de pico de absorção e largura de banda em relação a diferentes espaçamentos entre os furos, das superfícies perfuradas 1 e 2, frontal e inferior, respectivamente:

Figura 42: Frequências de Pico vs Espaçamento 1.



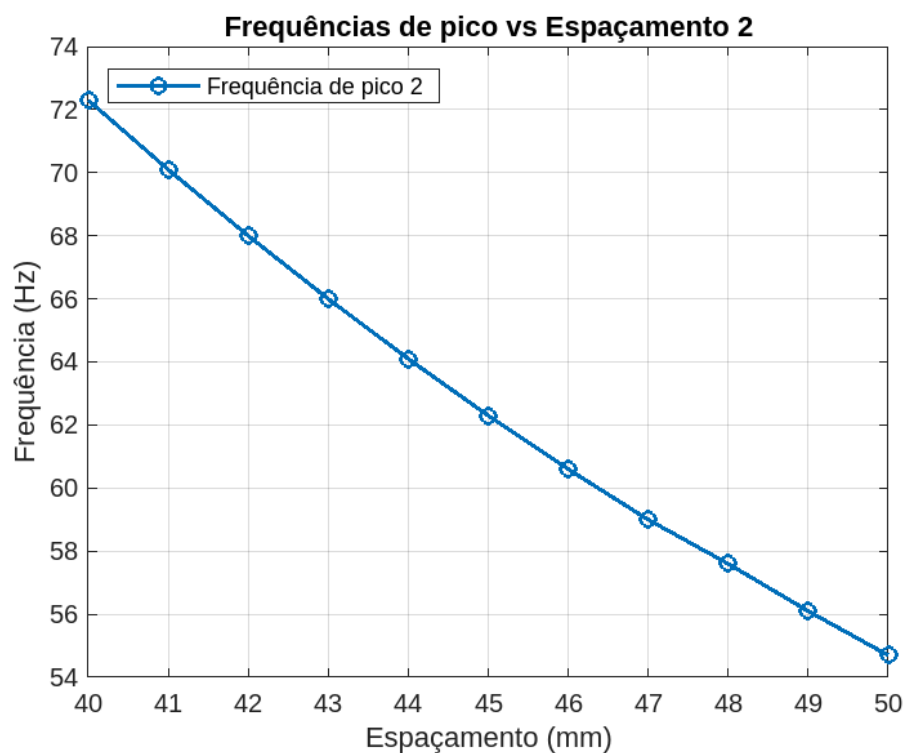
Fonte: autoria própria.

Figura 43: Amortecimento vs Espaçamento 1.



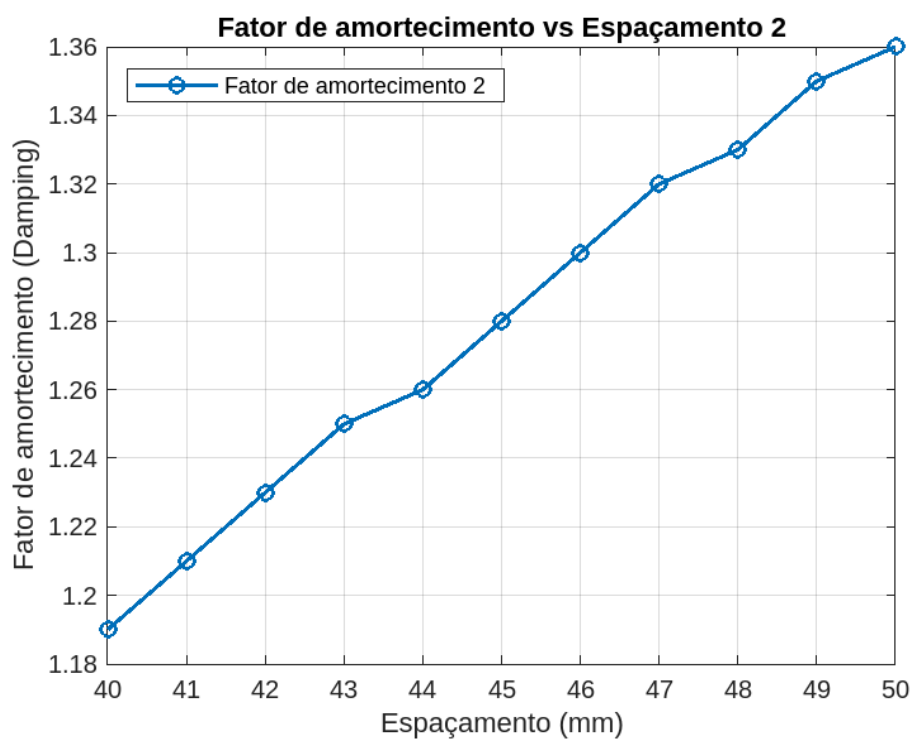
Fonte: autoria própria.

Figura 44: Frequências de Pico vs Espaçamento 2.



Fonte: autoria própria.

Figura 45: Amortecimento vs Espaçamento 2.



Fonte: autoria própria.

Das Figuras 42 e 44, é possível perceber que a frequência de pico de absorção varia de forma mais ou menos linear, inversamente proporcional ao aumento do espaçamento dos furos, em ambas as faces. Variando em 1mm o distanciamento de 30mm da caixa construída, a frequência de pico muda em cerca de apenas 5Hz para mais e para menos, e para o outro painel perfurado, 1mm de variação em 45mm causa um deslocamento de 2Hz.

Com variações mínimas e aleatórias nos espaçamentos dos furos dos painéis perfurados, tanto para 44mm e 46mm na face inferior, ou 29mm e 31mm na face frontal (que pode ser vista na Figura 27), é de se esperar que não haja qualquer distanciamento significativo entre as frequências previstas de pico de absorção do Ressonador, e as efetivas.

As Figuras 43 e 45 também colaboram com esse posicionamento, uma vez que os valores de *damping*, ou fator de amortecimento, não sofrem grandes alterações nas faixas imediatamente próximas aos espaçamentos previstos para a caixa.

Analisando todas as sensibilidades apresentadas, a mais relevante para o projeto se mostra a sensibilidade da frequência de absorção em relação à resistividade ao fluxo da espuma, pois além da frequência sofrer alterações relevantes no intervalo de resistividades possíveis, esse é um parâmetro que apesar de estimado através de materiais semelhantes, ainda é incerto. Apesar da variação que a frequência de pico de absorção pode sofrer para pequenas variações de Resistividade, a eficiência do Ressonador para o seu propósito do trabalho ainda é garantida pelo fator de amortecimento alto, portanto, boa largura de banda, o que garante que as frequências problemáticas e que se deseja absorver ainda estarão próximas do pico da eficiência do Ressonador construído.

4.4 VARREDURAS FINAIS NA SALA

Agora com o Ressonador em mãos, as últimas varreduras podem ser realizadas na sala, agora com um corpo feito sob medida para o problema enfrentado.

As medições foram realizadas com a sala o mais fielmente possível semelhante às primeiras condições: computador, cortina, painéis absorvedores, cadeiras, caixa de som, todos na mesma posição, e o microfone a 70cm de altura e 90cm de distância das paredes e no centro da sala, como pode ser observado na Figura 14. Foram também eliminadas as medições com claras interferências de ruídos externos, como sons de veículos transitando na rua.

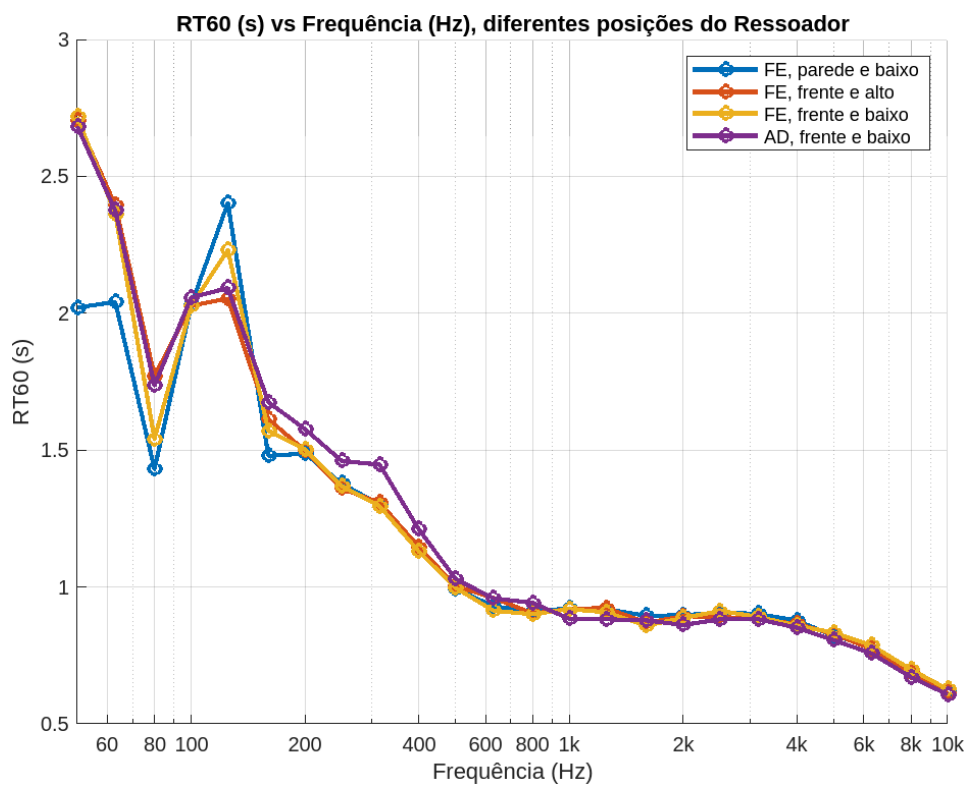
Para os testes realizados com o Ressorador de Helmholtz, foram escolhidas 4 posições para as medições, para que se pudesse tentar determinar qual é a melhor posição e orientação do Ressorador. As posições foram as seguintes:

- “FE, parede e baixo”: o Ressorador foi colocado junto à parede do canto da frente e esquerda da sala, com os painéis perfurados virados para o chão e para a parede;
- “FE, frente e alto”: o Ressorador ficou no canto da frente e esquerda da sala, com as faces furadas para frente (voltados para dentro da sala) e para cima;
- “FE, frente e baixo”: o Ressorador ficou no canto da frente e esquerda da sala, com as faces furadas para a sala e para baixo;
- “AD, frente e baixo”: o Ressorador ficou no canto de trás e direita da sala, com as faces furadas para a sala e para baixo.

Para cada uma das posições experimentadas para o Ressorador, foram feitas 5 varreduras para cada uma das 5 posições do microfone na sala, e os valores finais que serão apresentados das curvas de RT60, C50 e D50 de cada posição do Ressorador são frutos da média de 25 varreduras (excluindo alguma eventual medida com interferência de ruídos), assim como foi feito nos primeiros testes com a sala trabalhada.

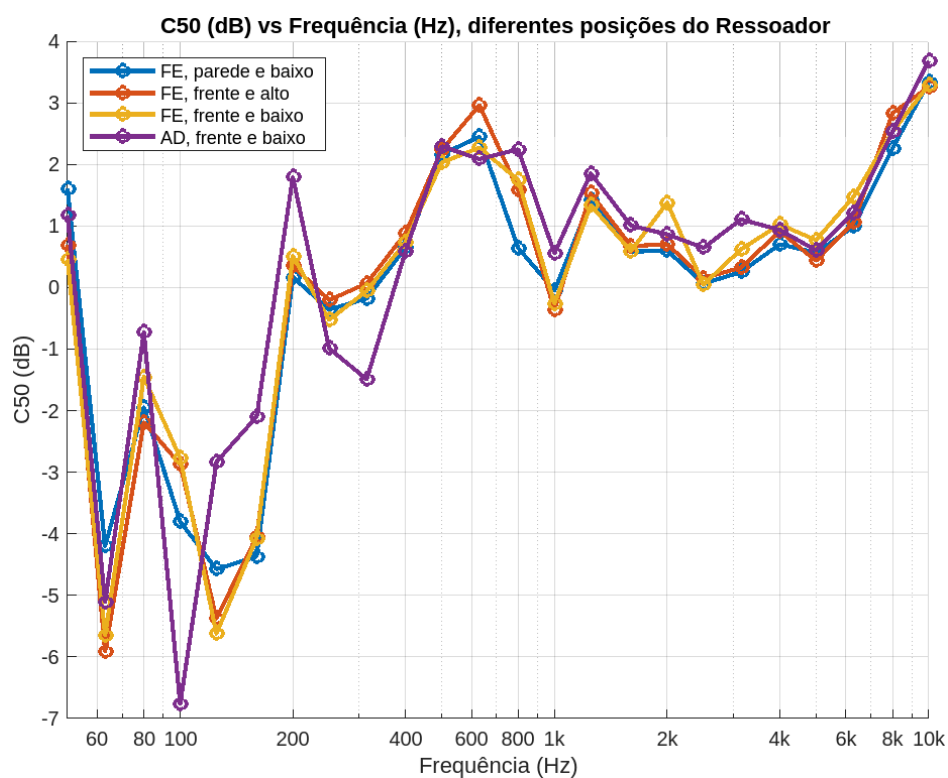
As Figuras 46, 47 e 48 mostram as curvas de RT60, C50 e D50 da sala com os absorvedores testados previamente, e o Ressorador de Helmholtz testado em cada uma das posições citadas anteriormente.

Figura 46: RT60 (s) vs Frequência (Hz), diferentes posições do Ressonador.



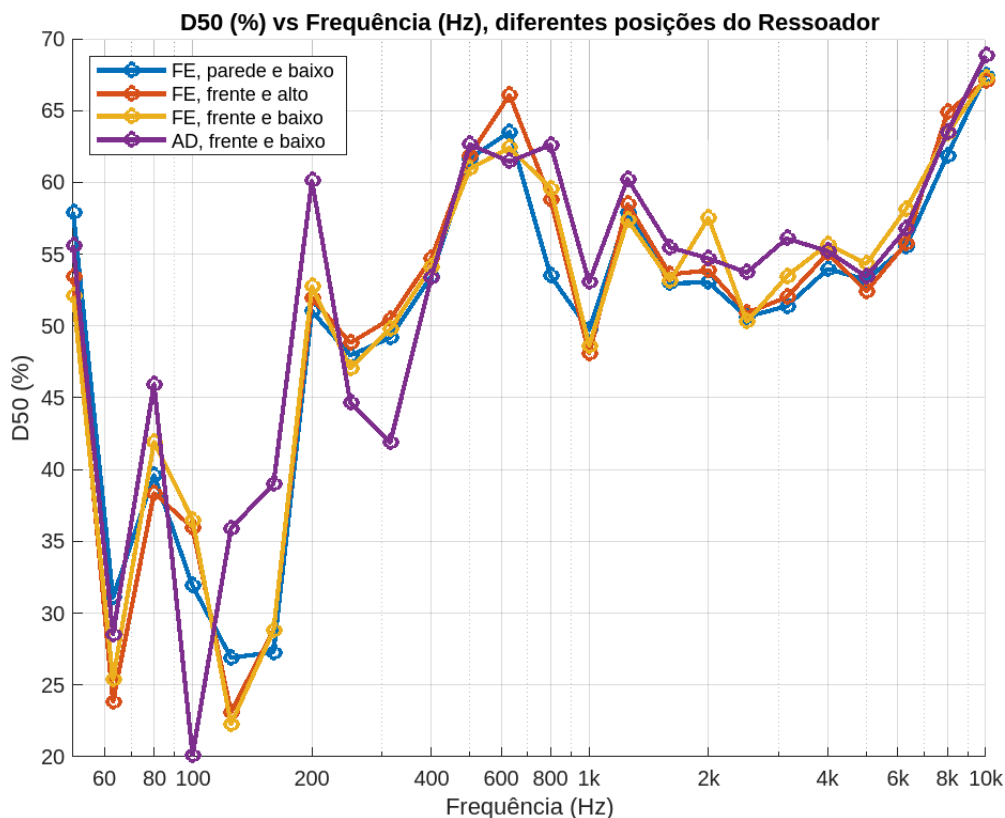
Fonte: autoria própria.

Figura 47: C50 (dB) vs Frequência (Hz), diferentes posições do Ressonador.



Fonte: autoria própria.

Figura 48: D50 (%) vs Frequência (Hz), diferentes posições do Ressoador.

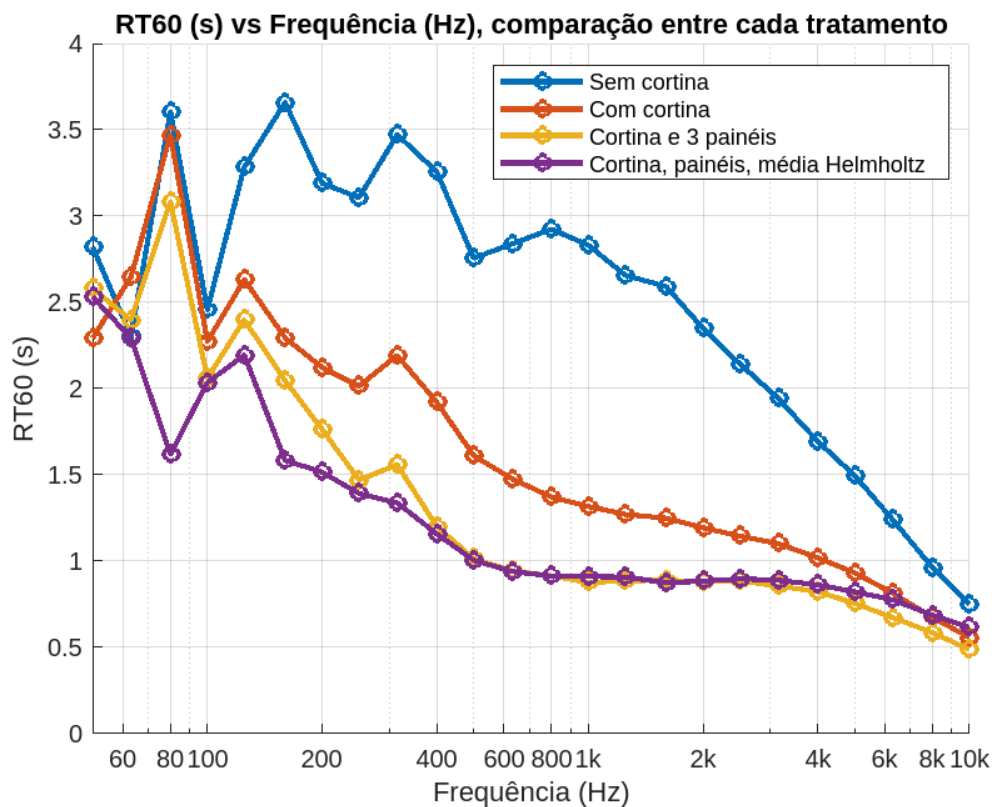


Fonte: autoria própria.

Analisando os gráficos das Figuras 46, 47 e 48, e levando em conta que o Ressoador foi projetado para atuar mais especificamente nas baixas frequências, não é possível definir claramente uma posição do Ressoador em que melhor atua. Tendo em vista que não há uma posição claramente mais eficiente, será utilizada uma média das 4 posições para os gráficos e cálculos subsequentes.

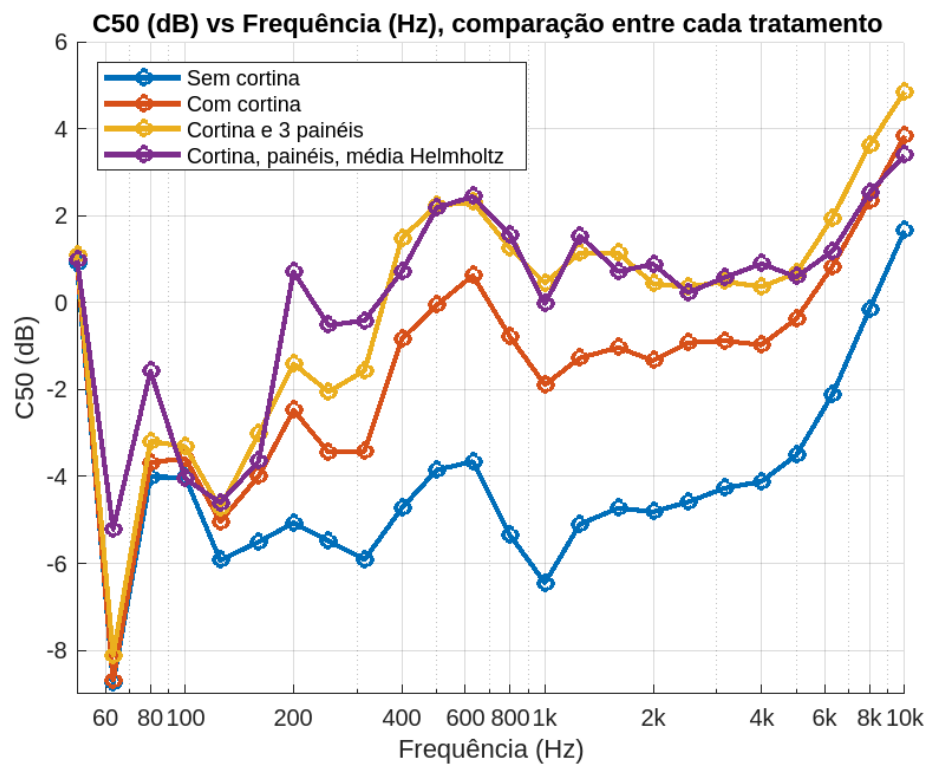
Agora, com a finalidade de se comparar a resposta da sala às varreduras com as diferentes medidas corretivas, as Figuras 49, 50 e 51 mostram as respostas da sala para RT60, C50 e D50, respectivamente, para as condições de absorvedores: sem cortina, com cortina, com cortina e 3 painéis absorvedores, e por último, com cortina, painéis, e a média do Ressoador de Helmholtz para as 4 configurações testadas.

Figura 49: RT60 (s) vs Frequência (Hz), comparação geral.



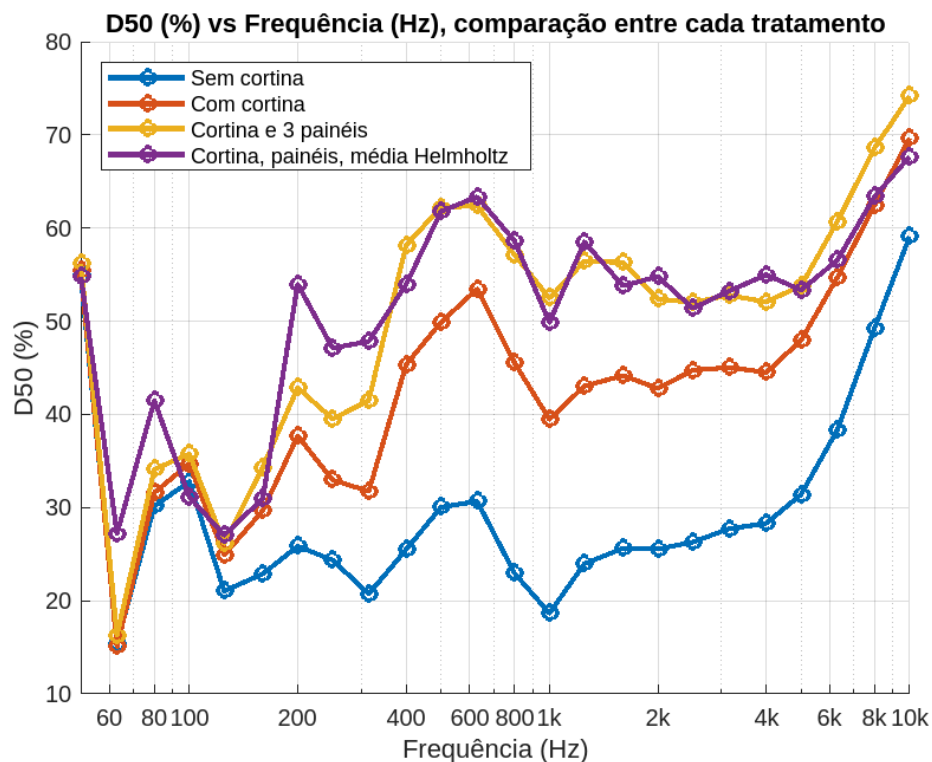
Fonte: autoria própria.

Figura 50: C50 (dB) vs Frequência (Hz), comparação geral.



Fonte: autoria própria.

Figura 51: D50 (%) vs Frequência (Hz), comparação geral.



Fonte: autoria própria.

Os gráficos das Figuras 49 a 51 são decorrentes dos últimos testes na sala tratada, e apresentam, sucintamente, todo o resultado obtido para o qual este trabalho se propõe a fazer.

Os gráficos das Figuras 49, 50 e 51 mostram que o Ressonador foi eficiente em melhorar a qualidade acústica da sala tratada para as baixas frequências, de até cerca de 300Hz, com especial destaque para a faixa de frequências de 80Hz.

Especificamente na faixa dos 80Hz, houve uma grande redução do RT60, e melhoria no D50 e C50, o que não ocorreu tão acentuadamente nas proximidades dos 60 e 120Hz. Um desvio tão significativo quanto o que se apresentou não encontra justificativa na variação do espaçamento entre furos, como discutido na seção 4.3.3, mas pode ser melhor explicado por uma Resistividade da espuma bem menor do que a esperada, como visto na seção 4.3.1, que acabou gerando um grande deslocamento da curva de absorção dos 120Hz, em direção aos 80Hz, além, ainda, de uma possível contribuição da sobreposição da curva de absorção para as frequências mais baixas da outra face do Ressonador.

Baseado na Figura 2 de valores de RT60 para diferentes tipos e volumes de ambiente, o tempo de reverberação desejado para a sala tratada pode ser considerado de 0,5s para uma sala de conferência 68m³. Da Figura 49, é observado que para as baixas frequências, mais próximas da faixa da voz humana, os valores de RT60 se mostravam inadequadamente altas, e com todos os tratamentos aplicados, até as faixas mais problemáticas de 60 a 160Hz, que apresentavam grandes picos de tempo de reverberação de até 3,5s, finalmente se encontraram em uma faixa mais aceitável, aproximadamente entre 2,5s e 1,3s, mas ainda longe do tempo ideal de 0,5s, considerando a sala tratada para o propósito de conferência, de acordo com a Figura 2. Já para as frequências mais altas, como a partir dos 800Hz, que já não sofrem os efeitos dos modos ressonantes dentro da sala, também tiveram o tempo de reverberação bastante atenuado, bem mais próximo do tempo almejado.

Analisando a Figura 49, em suma, percebe-se que houve uma notável melhora no RT60 das frequências mais altas e que não sofrem efeito dos modos estacionários, e principalmente, uma grande atenuação ou quase desaparecimento de todos os grandes picos de frequências com modos ressonantes dentro da sala.

Quanto à Clareza da sala, apresentada na Figura 50, houve uma melhora em todas as frequências analisadas, com notável melhoria nas proximidades de 60Hz, 80Hz e 200Hz, sendo que a adição da cortina, assim para o caso da melhoria do RT60, foi a melhor adição à sala.

Quanto à Figura 51 e ao parâmetro de Definição da sala, a qualidade da inteligibilidade da sala foi melhorada de valores qualitativos entre "ruim" e "pobre" para baixas (frequências mais próximas da faixa de voz humana) e altas frequências, respectivamente, a "pobre" e "razoável" com a adição de cortina e painéis de espuma nas paredes, de acordo com a Tabela 2. Com a subsequente adição do Ressoador, esses valores foram ligeiramente melhorados, com notável melhoria, novamente, das frequências ao redor dos 60Hz, 80Hz e 200Hz, que foram mais significativamente melhoradas.

O parâmetro D50, no geral, para as frequências de 60Hz e 100Hz a 180Hz, ainda apresenta vales que podem ser melhorados, e estão na faixa qualitativa

“pobre”, de acordo com a Tabela 2. Já para as demais frequências, a qualidade foi melhorada para o nível “razoável”, chegando perto da região limite entre “razoável” e “bom” nas faixas de 500Hz a 750Hz, e 8kHz a 10kHz. Subsequentes melhorias no padrão de inteligibilidade da sala, melhorando D50 e C50, poderiam resultar em uma queda exagerada nos RT60 da sala, distanciando-a dos tempos de reverberação ideais para uma sala de uso misto como ela, também usada para culto religioso e música.

4.5 ESTIMATIVA DE CUSTO PARA TRATAMENTO ADEQUADO

Como visto na seção anterior, por mais que o tratamento até então tenha sido de grande serventia para a melhora da qualidade acústica da sala, ela ainda não é ideal para o uso que se propõe a ela, e alguns problemas, por mais que estejam grandemente atenuados, ainda persistem. Nessa seção, portanto, são discutidos a viabilidade e o custo para que um tratamento acústico consiga tornar a sala ótima para o uso, de acordo com o que se espera para a finalidade dela, e os valores de RT60 e D50 das Figura 2 e Tabela 2, respectivamente.

Existem várias equações que relacionam o tempo de reverberação com a absorção acústica total de uma sala [7]. Será utilizado o método de Eyring, que embora não seja muito precisa para baixas frequências, ainda é eficaz para a estimativa das médias e altas frequências. Para uma explicação mais detalhada do método e da fórmula, é recomendada a leitura do capítulo 6.7 da referência [7]. A fórmula de tempo de reverberação de Eyring é mostrada na Equação 5:

$$RT_{60} = \frac{0,161 V}{-S \ln(1-\bar{\alpha})}; \quad (5), [7]$$

Sendo:

- S a área total de superfície da sala em m²;
- V o volume em m³;
- $\bar{\alpha}$ o coeficiente de absorção médio da sala.

O parâmetro $\bar{\alpha}$, por sua vez, é dado pela Equação 6:

$$\bar{\alpha} = \frac{\sum_i S_i \alpha_i}{S}; \quad (6), [7]$$

Sendo:

- S_i a i -ésima área de uma superfície cujo coeficiente de absorção é α_i ;
- α_i o i -ésimo coeficiente de absorção.
- S a área total de superfície da sala em m^2 ;

O somatório calcula a contribuição total devido à absorção de cada superfície. Com isso, pode-se estimar o acréscimo de absorção acústica da sala medindo-se o RT60 antes e depois da adição dos corpos absorvedores. Com este procedimento, foram estimados os coeficientes de absorção da cortina, dos painéis e do Ressorador, para algumas frequências de interesse, sendo elas baixas, médias, e alta, conforme mostrado na Tabela 3.

Tabela 3: Valores estimados dos coeficientes de absorção.

Absorvedor	Frequência [Hz]	RT60 sem o material	RT60 com o material	$\bar{\alpha}_{Tv}$ estimado sem material	$\bar{\alpha}_{Tn}$ estimado com material	$\alpha_{material}$ (por m^2)
Cortina	80	3,60	3,47	0,0287	0,0298	0,0464
	125	3,28	2,63	0,0315	0,0391	0,1537
	400	3,26	1,92	0,0317	0,0532	0,3774
	4k	1,69	1,02	0,0602	0,0977	0,6631
Painéis	80	3,47	3,08	0,0298	0,0335	0,2088
	125	2,63	2,40	0,0391	0,0428	0,2181
	400	1,92	1,20	0,0532	0,0837	1,5288
	4k	1,02	0,82	0,0977	0,1200	1,1766

Fonte: autoria própria.

Utilizando a equação de Eyring, pode-se estimar a área total de painéis absorvedores para se atingir um objetivo mais exigente para o valor de RT60 como, por exemplo, os 0,50s ideais para a sala, mas ainda um valor realista. Para isso, são necessárias as seguintes informações:

- Área total da sala = $2(2,75m \times 4,5m) + 2(2,75m \times 5,5m) + 2(4,5m \times 5,5m) = 104,5 m^2$;

- Volume da sala = 2,75m x 4,5m x 5,5m = 68,0625m³;
- Área total dos 3 painéis = 3 (1,2m x 0,6m) = 2,16 m²;
- Área da cortina = 2 (2,5m x 1,3m) = 6,5m²;
- Área do Ressorador (painel frontal) = 0,79m x 0,40m = 0,316m²

Cálculo para a sala vazia na Equação 7:

$$RT_{60} = \frac{0,161 \times 68,0625}{-104,5 \ln(1 - \bar{\alpha}_{Tv})} ; (7), [7]$$

Cálculo para a sala com painéis na Equação 8:

$$RT_{60} = \frac{0,161 \times 68,0625}{-104,5 \ln(1 - \bar{\alpha}_{Tn})} ; (8), [7]$$

Cálculo do alpha dos materiais absorvedores na Equação 9:

$$\alpha_{material} = \frac{(S)\bar{\alpha}_{Tn} - (S - S_{material})\bar{\alpha}_{Tv}}{S_{material}} ; (9), [7]$$

Sendo:

- $\bar{\alpha}_{Tv}$ Absorção acústica total do ambiente antes do tratamento acústico considerado;
- $\bar{\alpha}_{Tn}$ Absorção acústica total do ambiente depois do tratamento acústico considerado;
- $S_{painéis}$ superfície dos 3 painéis.

A coluna de $\bar{\alpha}_{Tv}$ estimado da Tabela 3 foi preenchida substituindo o tempo de reverberação pelo RT60 da Equação 5, para se obter o $\bar{\alpha}$ para a condição da sala, em determinada frequência. Com isso, substituindo os valores anteriores e posteriores de $\bar{\alpha}$ na Equação 9, é possível encontrar o valor da absorção $\bar{\alpha}$ do material estimado para cada corpo absorvedor, na última coluna da Tabela 3.

De posse do $\alpha_{material}$, sendo “material” a cortina ou painéis, pode-se calcular a área necessária para obter-se um RT60 de 0,50s.

De acordo com a Equação 9, foram realizados para a cortina os mesmos cálculos para se obter α_{total} , apenas alterando a área do corpo absorvedor em questão nos cálculos.

Como o Ressonador produzido acabou absorvendo frequências diferentes da esperada, sendo mais eficiente para os 80Hz e menos em 60Hz e 120Hz, e os parâmetros obtidos pelo método de Eyring não se aplicarem apropriadamente para as baixas frequências em que o Ressonador trabalha, uma estimativa de custo para Ressonadores adicionais para as frequências trabalhadas foi descartada. Por conta dessas várias camadas de incertezas e imprecisões, foi escolhida uma estimativa de custo apenas com os painéis, que operam nas médias e altas frequências, para ser realizada.

Na Tabela 4, são apresentados os valores necessários de absorção total do material absorvedor $\alpha_{necessário}$ para que se alcance um RT60 de 0,5s, e quantos m² seriam necessários, bem como o seu custo.

Tabela 4: Absorção necessária, quantidade e custo

Absorvedor	Frequência [Hz]	RT60 desejado [s]	$\alpha_{necessário}$	$\alpha_{material}$	Quantidade necessária [m ²]	Custo
Painéis	400	0,50	0,1892	1,5288	115,11	Inviável
	4k	0,50	0,1892	1,1766	87,63	R\$15.294 [42]

Fonte: autoria própria.

Para o cálculo da quantidade necessária de painéis, foi levado em conta a quantidade de metros quadrados de espuma para que a média do coeficiente de absorção geral da sala fosse $\alpha_{necessário} = 0,1892$, obtido através da Equação 5, para um RT60 de 0,5s. Para isso, foi calculada por uma média ponderada do $\overline{\alpha_{Tv}}$ da sala sem cortina e do $\alpha_{material}$ por m², para se chegar na superfície necessária de painéis na sala para que o RT60 chegue nos valores desejados.

Para o caso da faixa de frequências de 400Hz, o tratamento, com o material utilizado, é teoricamente inviável, uma vez que seria necessária uma área de cobertura por painéis maior do que a superfície total da sala. Já para a frequência de

4kHz, ela é teoricamente possível, com um custo de R\$15.294 (para a mesma espuma já adquirida), o que a torna financeiramente desinteressante.

5 CONCLUSÃO

5.1 PARÂMETROS RT60, C50 E D50

Todos os três parâmetros analisados ao longo do trabalho foram bastante melhorados, com o RT60 bem mais próximo do estipulado pela Figura 2 para a sala em questão, maior Clareza para entendimento da fala, e a Definição para quase todas as frequências no nível “razoável”, próxima a “bom”, em contraste com a situação original entre “ruim” e “pobre”.

Analisando o gráfico da Figura 49, é possível ver que foi perceptível o efeito do Ressorador nas proximidades da frequência de 80Hz, mas não tanto nas frequências de aproximadamente 60Hz e 120Hz. Como explicado na seção 4.4, uma variação dessa magnitude não ocorre por conta de possíveis pequenas diferenças nos parâmetros de montagem do Ressorador. Analisando os gráficos das seções 4.3.1, 4.3.2, e 4.3.3, sobre a sensibilidade do Ressorador à variação de diferentes parâmetros, e comparando com o Ressorador construído, a Resistividade da espuma interna utilizada na caixa se mostra como a principal, ou até mesmo única suspeita.

Uma vez que as espumas foram obtidas sem que fosse possível ter um valor exato da sua Resistividade, ela foi estipulada para um valor comparável ao de materiais semelhantes e conhecidos. Porém, um valor de Resistividade mais baixo dos $10.000\text{Pa}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ esperados, como $5.000\text{Pa}\cdot\text{s}/\text{m}^2$, pode ter resultado em um deslocamento da absorção do Ressorador na sua dimensão da profundidade de cerca de 124Hz para cerca de 105Hz, o que explicaria a maior eficiência em absorver o som na frequência de 80Hz e mais baixa eficiência nos 120Hz do que era esperado, e para a dimensão da altura, um deslocamento de 62Hz para cerca de 50Hz, o que explicaria a menor eficiência para absorver as faixas de frequências desejada. Uma Resistividade ainda menor que os experimentados e apresentados nas Figuras 38 e 36, de até mesmo $1000\text{Pa}\cdot\text{s}/\text{m}^2$, podem resultar em uma queda geral na eficiência do Ressorador.

Mesmo com os valores de RT60, C50 e D50 sendo calculados através da média de 5 medições para cada uma das 5 posições de microfone, os valores para as frequências mais baixas dos gráficos se mostraram individualmente bastante dispersos, o que reduz a confiabilidade dessas medições na frequência mais baixa possível.

Apesar do Ressorador não ter sido mais eficiente para reduzir o tempo de reverberação nas duas faixas de frequências para as quais ele foi projetado, ele ainda demonstrou grande eficiência para a região dos 80Hz, o que prova sua funcionalidade, necessitando apenas de ajustes mais finos para adequar o seu uso à função desejada. Quanto aos painéis acústicos utilizados, eles são de fácil aquisição, manutenção, e posicionamento, e apresentam também grande efetividade em reduzir o tempo de reverberação das baixas, altas, e principalmente médias frequências dentro da sala. A cortina, em especial, se mostrou como a maior aliada no tratamento realizado, sendo o corpo absorvedor mais eficiente para “quebrar” os modos ressonantes presentes na sala por conta das dimensões do ambiente, e para absorver as médias e altas frequências.

Para contornar a influência que a absorção de uma frequência em um sentido do Ressorador de Helmholtz tem na absorção da frequência do outro sentido, podem ser construídos dois corpos distintos, cada um dedicado a absorver uma frequência específica, com os seus parâmetros todos exclusivamente direcionados a absorver uma única frequência. Para evitar que a curva de absorção seja deslocada novamente para frequências mais baixas, pode ser usada uma espuma de mais densidade, portanto, maior resistividade ao fluxo de ar, como uma placa ou manta de lã de rocha. Essa medida provavelmente deslocaria as curvas de absorção de volta para as frequências de aproximadamente 120Hz e 60Hz, e pela sobreposição das duas curvas, ainda teria grande eficiência na faixa dos 80Hz, também problemática na sala.

5.2 CUSTO, EFICIÊNCIA, E PROPOSTAS FUTURAS.

O tratamento acústico, a depender do problema enfrentado na sala, pode sofrer uma grande variação de custo. Para o caso estudado, os custos foram os seguintes:

- Madeira para o Ressorador: R\$160,00;
- 3 espumas para montar a absorção interna do Ressorador, mais 3 espumas para os painéis das paredes: R\$377,00;
- Cortina com tecido blackout: R\$260,00;
- Estimativa de mão de obra para o Ressorador: R\$200,00.

Assim, o custo final em materiais e mão de obra utilizados para esse trabalho, (desconsiderando equipamentos como caixa de som, microfone, computador...) foi de aproximadamente R\$1000,00. De acordo com a seção 4.5, para um tratamento que elevasse a qualidade acústica da sala a níveis ideais, haveria um custo adicional superior a R\$15.000,00, com a adição 88m² de painéis absorvedores, ou aproximadamente 122 painéis. Para o tipo de material utilizado, esse tratamento se mostra inviável tecnicamente e economicamente, obrigando em trabalhos futuros que o material das espumas tenha uma Resistividade maior, para que possa haver um maior tratamento do tempo de reverberação dentro do ambiente.

Por mais que o tratamento completo do ambiente, que o levasse para níveis ótimos de conforto e qualidade acústica, sejam teoricamente, ou no mínimo financeiramente inviáveis, o tratamento atual na sala estudada, nas condições apresentadas, se mostrou eficiente e de relativo baixo custo, uma vez que os materiais usados na atual configuração são de fácil obtenção e baixo custo, enquanto que as próximas etapas de tratamento serão de alto custo e com menor incremento de qualidade. Com um maior aporte de investimento financeiro e uma mudança na escolha dos materiais utilizados para o tratamento, em conjunto com as pesquisas e testes realizados até o momento como base, os testes podem ser levados adiante, para novamente se testar a viabilidade de um tratamento que eleve a qualidade acústica do ambiente a um nível bem mais próximo do ideal para a sua utilização, com o RT60 próximo do ideal de 0,5s acordo com a Figura 2, e o parâmetro D50 de maior valor e qualidade de acordo com a Tabela 2.

Como proposta para projetos futuros, é interessante levar em conta a eficiência e o baixo custo da cortina como tratamento acústico. Sugestões incluem a utilização de um segundo corpo semelhante, como uma cortina no lado oposto da sala, ou um tapete espesso. Essas opções são práticas, esteticamente agradáveis e de aplicações relativamente baratas. Elas podem melhorar significativamente a qualidade acústica da sala, de acordo com a seção 4.5. Painéis de maior absorção acústica, tanto para as paredes, quanto para o(s) Ressonador(es), poderiam ser utilizados para tornar possível um RT60 ideal, ou pelo menos aproximar a experiência do usuário no ambiente a uma qualidade ótima.

REFERÊNCIAS

- [1] BERG, Richard E. Acoustics: introduction. Britannica, atualizado em 2019. Disponível em: <<https://www.britannica.com/science/acoustics>>. Acesso em: 24/07/2024.
- [2] BRANDÃO, Eric. Acústica de salas - Aula 3 - uma revisão histórica da acústica de salas. Youtube, 30/03/2021. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=air48R3em5E&ab_channel=EricBrand%C3%A3o>. Acesso em: 24/07/2024.
- [3] ROSSING, Thomas D. Springer Handbook of Acoustics. Segunda edição. New York: Springer, 2014.
- [4] INTERNATIONAL STANDARD. ISO 3382-1: Acoustics - Measurements of room acoustic parameters. Part 1: Performance spaces. Primeira edição. Suíça. 15/06/2009.
- [5] INTERNATIONAL STANDARD. ISO 3382-2: Acoustics - Measurements of room acoustic parameters. Part 2: Open plan offices. Segunda edição. Suíça. 01/2022.
- [6] INTERNATIONAL STANDARD. ISO 3382-3: Acoustics - Measurements of room acoustic parameters. Part 3: Reverberation time in ordinary rooms. Primeira edição. Suíça. 15/06/2008.
- [7] BRANDÃO, Eric. Acústica de Salas: projeto e modelagem. Primeira edição. São Paulo - SP - Brasil: Blucher, 2016.
- [8] PINTO e VETTERLI. Space/Time-Frequency Processing of Acoustic Wave Fields: Theory, Algorithms, and Applications. 2010. 13 páginas. Signal Processing, IEEE Transactions on. 58. 4608 - 4620. 10.1109/TSP.2010.2052045.
- [9] KINSLER, Lawrence E. et al. Fundamentals of Acoustics. Quarta edição. Hoboken - EUA: John Wiley and Sons Inc, 2000. (capítulo 6.6)
- [10] HÖLDRICH, Robert; WENDT, Floria. Precedence effect for specular and diffuse reflections. 2020. Hearing, Audiology and Psychoacoustics - University of Music and Performing Arts Graz, Austria, Institute of Electronic Music and Acoustics. Acta Acustica, Volume 5, 1.
- [11] Antonov, A. I. et al. Coupling Coefficient of Flux Density and Density Gradient of Reflected Sound Energy in Quasi-Diffuse Sound Fields. Journal of Theoretical and Computational Acoustics, 2018, Vol. 26, No. 4 10 pages
- [12] INGARD, Karl Uno. Notes on Acoustics. Primeira edição. Hingham, Massachusetts: Infinity Science Press LLC, 2008.
- [13] GOMES, Felipe F. Avaliação das condições de conforto acústico de um auditório de múltiplo uso. 2019. Tecnologia e Ciências Sociais Aplicadas, Engenharia Civil - UNICEUB, Brasília, 2019.
- [14] BERAMEK, Leo L. et al. Vibration control engineering principles and applications. Segunda edição. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2006.
- [15] Svantek Academia. RT60 Tempo de reverberação. Svantek Academia, 2023. Disponível em: <<https://svantek.com/pt/academia/rt60-tempo-de-reverberacao/>>. Acesso em: 24/07/2024.
- [16] Larson Davis. Reverberation Time Measurements: Understanding RT60 in Room Acoustics. Disponível em: <<https://www.larsondavis.com/learn/building-acoustics/Reverberation-Time-in-Room-Acoustics>>. Acesso em: 24/07/2024.

- [17] Siniat. Recommended reverberation times for 7 key spaces. Siniat, 12/06/2019. Disponível em: <<https://blog.siniat.com.au/recommended-reverberation-times-for-7-key-space>>. Acesso em: 24/07/2024.
- [18] EGUEZ, Fernando. Target Reverberation Time. Commercial acoustics, 22/06/2017. Disponível em: <<https://commercial-acoustics.com/reverberation-time-graphic/>>. Acesso em: 24/07/2024.
- [19] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12179: Tratamento acústico em recintos fechados. Rio de Janeiro, p. 9. 1992.
- [20] FERNANDES, Douglas. Projeto acústico de salas: Uma análise do auditório do IFSC - Campus Lages. 2022. Engenharia mecânica - Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC), Lages, 2022.
- [21] DONOSO, José P. Som e acústica. Terceira parte. Instituto de Física de São Carlos - IFSC. 6/11/2009. Disponível em: <https://www.ifsc.usp.br/~donoso/fisica_arquitetura/14_som_acustica_3.pdf>. Acesso em: 25/07
- [22] FIGUEIREDO, FÁBIO L. Parâmetros Acústicos Subjetivos: Critérios para Avaliação da Qualidade Acústica de Salas de Música. 2005. 258p. Dissertação de Mestrado – Escola de Comunicações e Artes, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.
- [23] ANSAY, Samuel; ZANNIN, Paulo. H. T. Using the Parameters of Definition, D50, and Reverberation Time, RT, to Investigate the Acoustic Quality of Classrooms. Canadian Acoustics - Acoustique Canadienne , v. 44, n. 4, p. 6-11, 2016.
- [24] FOLEY, Dennis. Wavelengths In Our Rooms. Acoustic Fields.com, 17/06/2012. Disponível em: <<https://www.acousticfields.com/wavelengths-in-our-rooms/>>. Acesso em: 25/07/2024.
- [25] FOLEY, Dennis. The Top 5 Room Acoustic Problems You Face In Your Studio. Acoustic Fields.com, 11/08/2014. Disponível em: <<https://www.acousticfields.com/the-top-5-room-acoustic-problems-you-face-in-your-studio/>>. Acesso em: 25/07/2024.
- [26] JÚNIOR, Calebe G. Análise Comparativa de Métodos de Medição de Parâmetros Acústicos em Salas de Pequeno Porte. 2017. 105 páginas. Escola de Engenharia Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - UFMG, Belo Horizonte, 2017.
- [27] MARTINS, Tiago de A. Análise e tratamento acústico para estúdios musicais. 2010. – São Paulo, 2010. Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica. 40 páginas. 2010.
- [28] EVEREST, F. Alton, POHLMANN, Ken C. Master Handbook of Acoustics. 5ª edição. McGraw-Hill, 2009.
- [29] BENADE, A.H. From Instrument to Ear in a Room: direct or via recording. Journal of the Audio Engineering Society, v. 33, n. 4, p. 218-233, 1985.
- [30] VERGARA, Erasmo. F.; MARROS, Fernanda.; PAUL, Stephan. Caracterização da qualidade acústica de salas de aula para prática e ensino musical. 2017. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 17, n. 1, p. 23-37, 2017. ISSN 1678-8621 Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído.
- [31] SILVA, Jordana T. Influência de configurações das aberturas na qualidade acústica de salas de aula naturalmente ventiladas com base na rede pública municipal de ensino de Maceió-AL. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Alagoas, 2014.
- [32] MELCHER, Andreas. What are room modes? amcoustics, Vienna, Austria 2004. Disponível em: <<https://amcoustics.com/articles/roommodes>>. Acesso em: 28/07/2024.

- [33] BARRETO, Wilson José Macedo. Acústica Arquitetônica – Como Absorver o Curso de Acústica Arquitetônica. Recife. Sem Editora. 1998.
- [34] AMORIM, Emanuel S. Tratamento acústico em templo religioso: Estudos de caso - Diagnósticos e projetos. 1º edição. Olinda: Câmara Brasileira do Livro, 2023.
- [35] Tzer Sheng Tie, Kim Hung Mo, Azma Putra, Siaw Chuing Loo, U. Johnson Alengaram, Tung-Chai Ling, Sound absorption performance of modified concrete: A review, Journal of Building Engineering, Volume 30, 2020.
- [36] ARENAS, Jorge e CROCKER, Malcolm. (2010). Recent Trends in Porous Sound-Absorbing Materials. Sound & vibration. 44. 12-17, 2010.
- [37] GIK Acoustics, Scopus Tuned Membrane Bass Trap (T40). Gik Acoustics LLC | 3121 Presidential Dr | Atlanta, GA 30340, 2023. Disponível em: <<https://www.gikacoustics.com/product/gik-acoustics-scopus-tuned-bass-trap-t40/>> . Acesso em: 30/07/2024.
- [38] MICHALSKI, Ranny L. X. N. Roteiro para projeto/avaliação acústica. AUT0286 – Conforto Ambiental 3: TermoAcústica, Departamento de Tecnologia Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, 2020.
- [39] LEE, Taehwa e NOMURA, Tsuyoshi e IIZUKA, Hideo. Damped resonance for broadband acoustic absorption in one-port and two-port systems. 2019. Scientific Reports. 9. 13077. 10.1038/s41598-019-49222-w.
- [40] COX, Trevor J. e D'ANTONIO, Peter. Acoustic Absorbers and Diffusers: Theory, Design and Application. Terceira edição. EUA, CRC PRESS, 2017.
- [41] MiniDSP Ltd. Product Brief - Umik. Disponível em: <<https://www.minidsp.com/images/documents/Product%20Brief%20-%20Umik.pdf>>. Acesso em: 31/07/2024.
- [42] MERCADO LIVRE. 6 placas Lã de PET 120x60x5cm 30kg/m³ revestimento drywall. Disponível em: <https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-2082248958-6-placas-l-de-pet-120x60x5cm-30kgm-revestimento-drywall-_JM>. Acesso em: 31/07/2024
- [43] MULCAHY, John. Room EQ Wizard Room Acoustics Software, 2024. Disponível em: <<https://www.roomeqwizard.com/>>. Acesso em: 31/07/2024.
- [44] MELCHER, Andreas. *Amcoustics: Acoustic Materials and Solutions*. Disponível em: <<https://amcoustics.com/>>. Acesso em: 02/02/2025.
- [45] Soundproof Your Studio, Why Room Ratios Don't Work... most of the time. 07/08/2023. Disponível em: <<https://www.soundproofyourstudio.com/blog/why-room-ratios-don-t-work-most-of-the-time>>. Acesso em: 31/07/2024.
- [46] Calculadora acousticmodelling. Disponível em: <<http://www.acousticmodelling.com/8layers/helmholtz.php>>. Acesso em 31/07/2024
- [47] MANGANOTE, Edmilson J. T. Módulo 09, Física da Fala e da Audição: A Voz Humana I, Produção da Fala. Instituto de Física Gleb Wataghin (IFGW), Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Disponível em: <https://sites.ifi.unicamp.br/graduacao/files/2018/06/M%C3%B3dulo-09_A-Voz-Humana-I_Produ%C3%A7%C3%A3o-da-Fala.pdf>. Acesso em: 08/02/2025.

[48] GOMES, Caio V. S. Comportamento Acústico de Materiais Absorvedores em Multicamadas. 198 páginas. Programa de Pós-Graduação em Engenharias de Estruturas - UFMG, Belo Horizonte, 2015.

[49] PORTAL DA ACÚSTICA. Placa Lã de PET Preto para Isolamento Térmico Acústico 1200 x 600 x 50 mm - 30kg/m³ - 6 Unidades 4,32m². Disponível em: <<https://www.portaldaacustica.com/produto/placa-la-de-pet-preto-para-isolamento-termico-acustico-1200-x-600-x-50-mm-30kg-m3-6-unidades-4-32m2-70581>>. Acesso em: 02/02/2025.

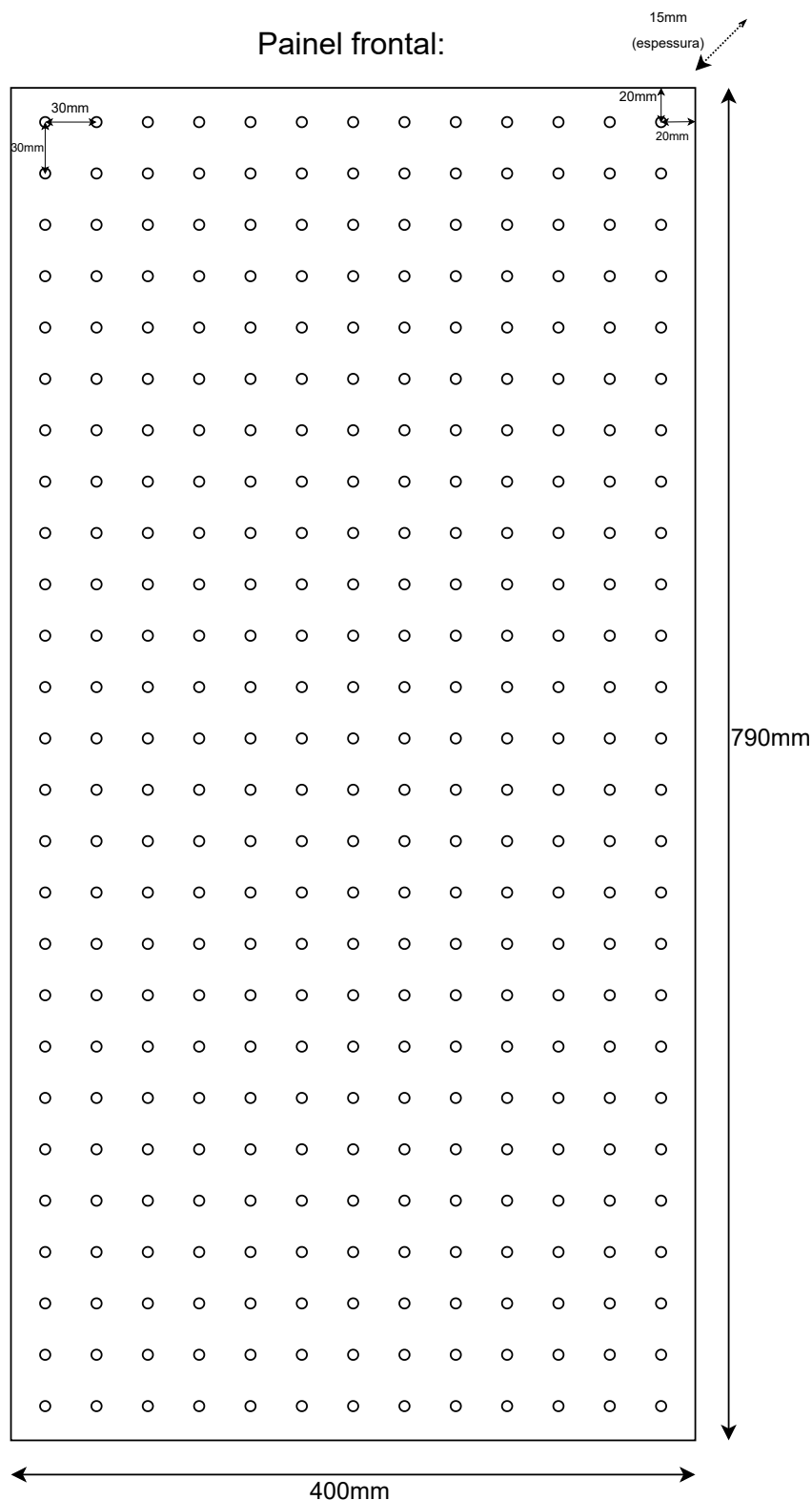
APÊNDICE A

O Apêndice A apresenta os desenhos realizados para representar o Ressonador de Helmholtz produzido e experimentado *in-loco*, com todas as medidas dos painéis, das vistas frontal, lateral e inferior da caixa, e das espumas utilizadas para a confecção deste instrumento.

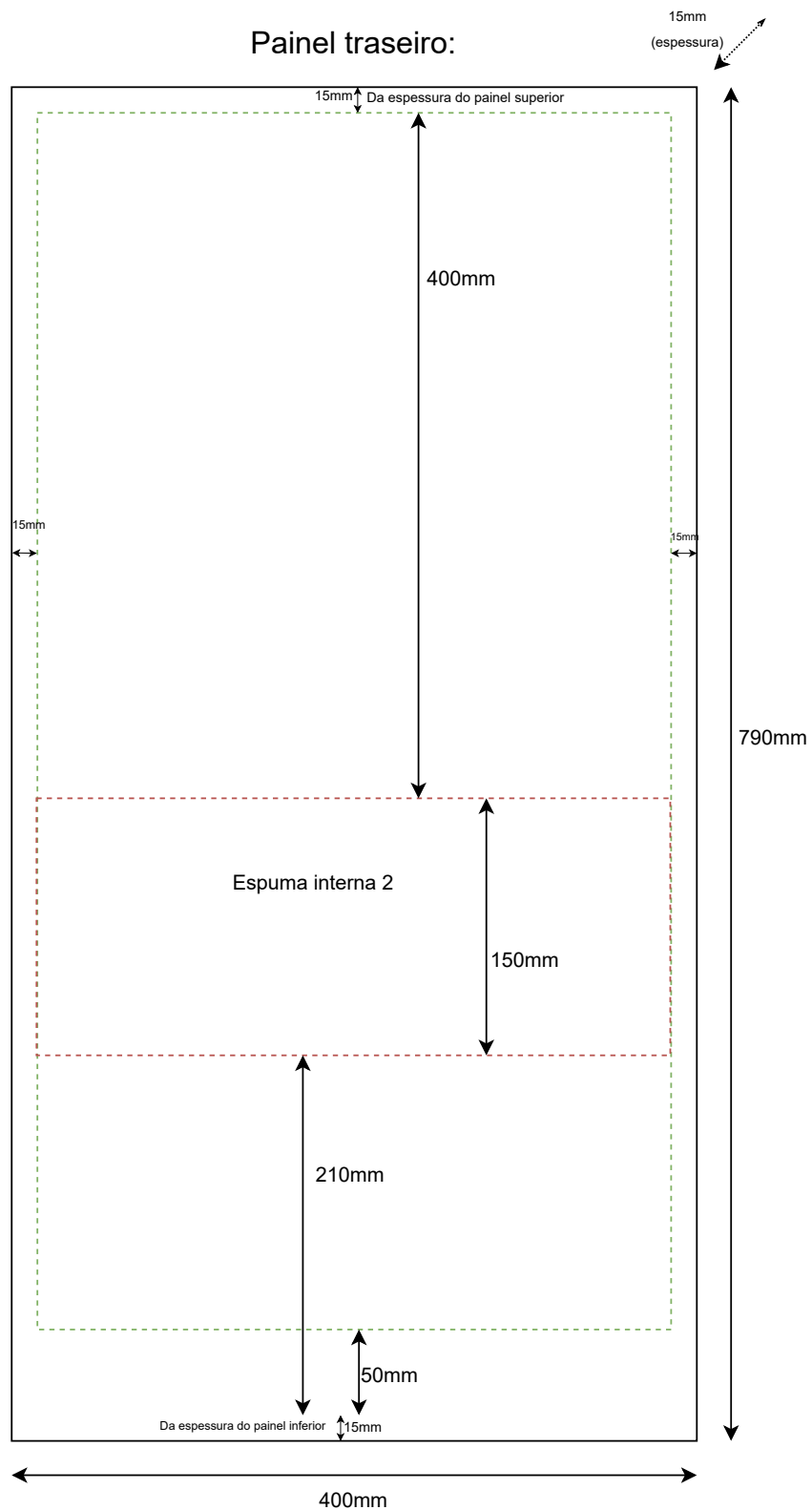
Ressorador/absorvedor de Helmholtz

Desenho com medidas e dimensões reais utilizadas

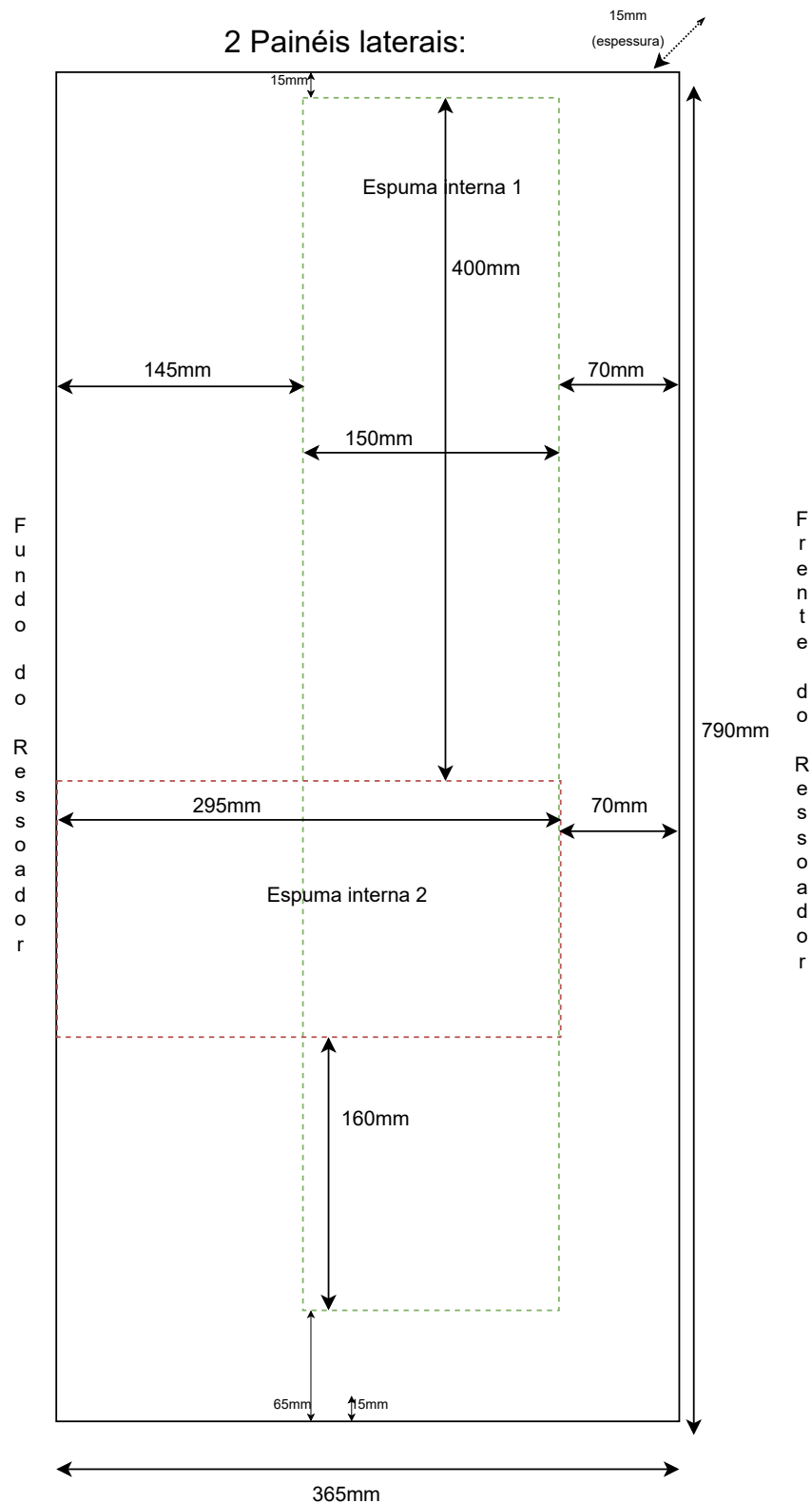
Desenho dos PAINÉIS



- TODOS os furos são de 6mm de diâmetro;
- Distância entre os centros dos furos: 30mm (acima, abaixo, e aos lados);
- Portanto, a distância entre a borda de um furo ao outro: 24mm;
- Distância do centro dos furos até as margens superior, inferior, e laterais: 20mm;
- Portanto, distância da borda dos furos mais externos até as margens desse painel: 17mm.
- Observações: distância entre os furos é constante, e os furos não passam pelas outras placas, já que a espessura das placas conectadas ao painel frontal é de 15mm;
- Mesma vista da espuma que o painel traseiro.

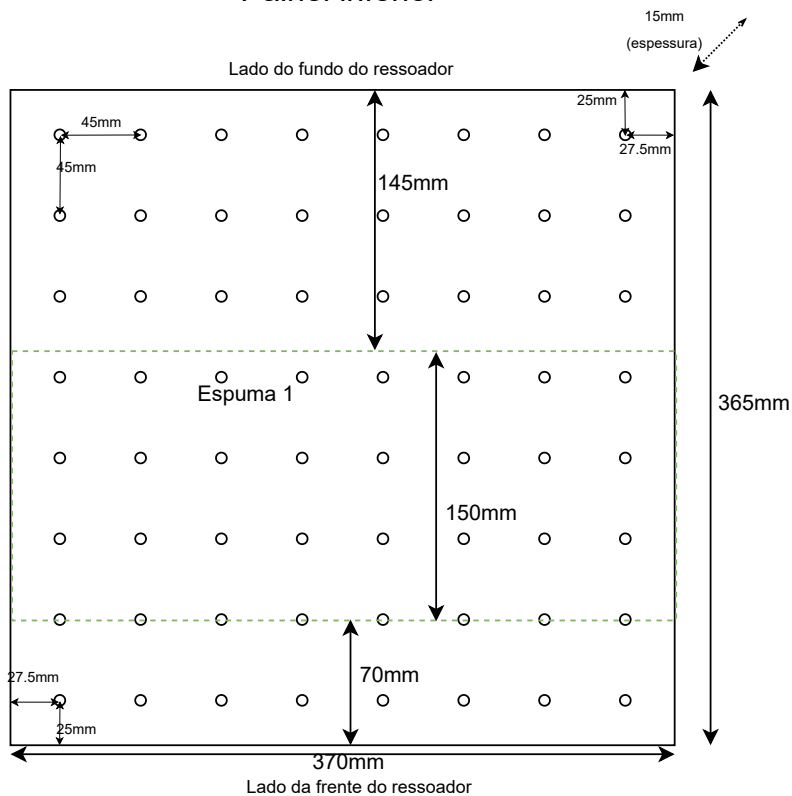


- Igual ao painel frontal, mas sem furos;
- Vista também da espuma interna, que vai paralela aos painéis superior e inferior;
- Há uma distância de 50mm das espumas em relação aos painéis perfurados da outra dimensão (espuma vertical - painel inferior, e espuma horizontal - painel frontal).



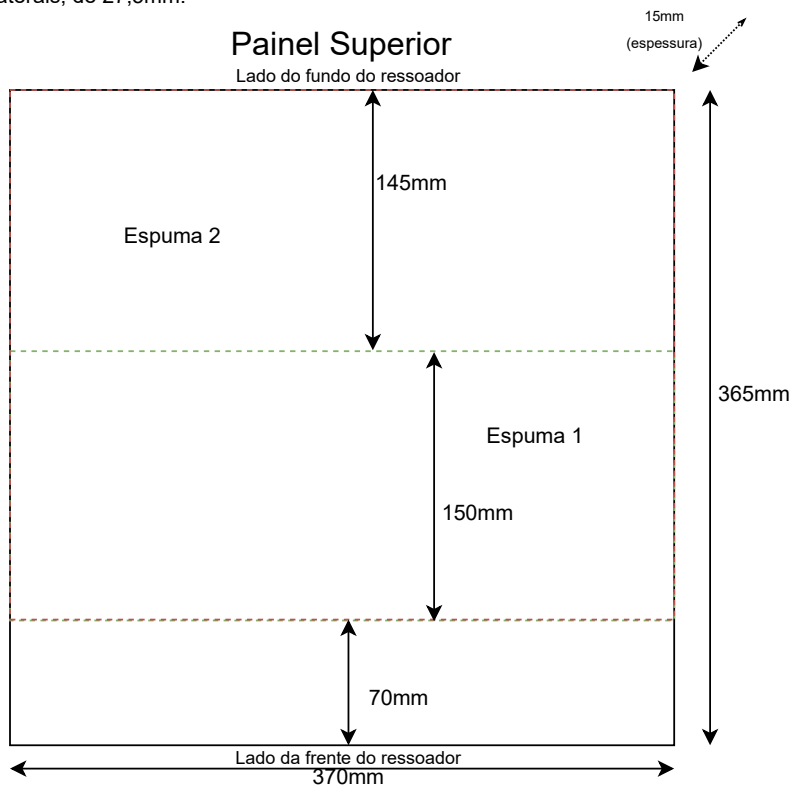
- Altura idêntica ao painel frontal;
- A largura desse painel + (2x15mm das espessuras dos painéis frontal e traseiro) = 395mm, que é a profundidade do Ressorador;
- Nenhum painel lateral é furado;
- Laterais dessa placa são encaixadas dentro dos painéis frontal e traseiro;
- Espuma interna de 150mm, paralela aos painéis dianteiro e traseiro;
- As espumas ficam a 50mm de distância dos painéis perfurados ao qual são perpendiculares;
- Espuma 1 (vertical) vai até 65mm do final do painel lateral, ou seja, 50mm do interior do painel inferior perfurado (facilidade para cortar e encaixar).

Painel inferior



- TODOS os furos são de 6mm de diâmetro;
- A altura desse painel + (2x15mm) = 395mm, que é a profundidade do Ressoador;
- A largura desse painel + (2x15mm) = 400mm, que é a largura do Ressoador;
- Painel inferior é encaixado dentro dos painéis laterais, frontal, e traseiro;
- Distância do centro dos furos é de 43mm;
- Distância do centro dos furos das extremidades até os limites superior e inferior desse painel é de 25mm, e das laterais, de 27,5mm.

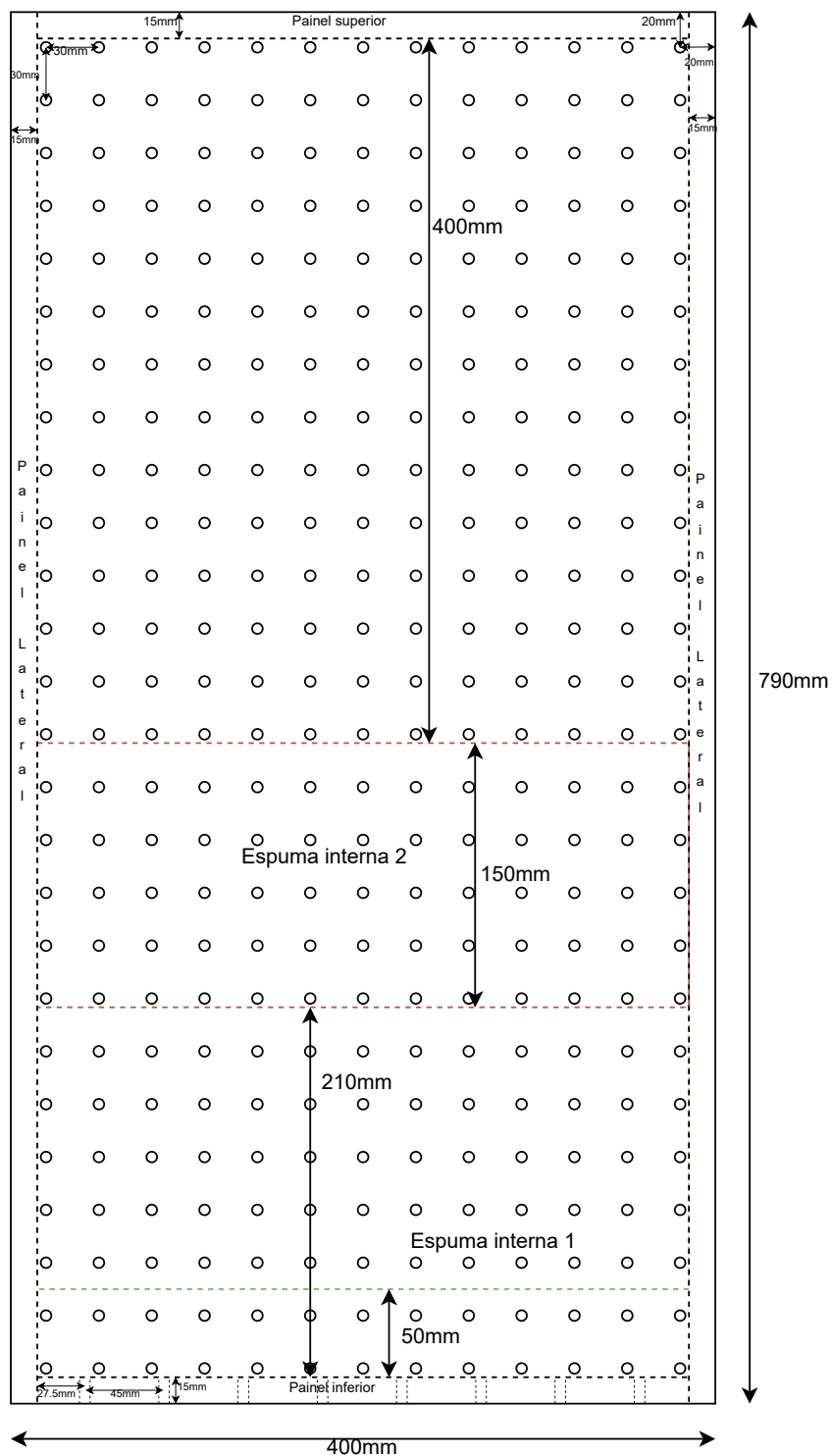
Painel Superior



- A altura desse painel + (2x15mm) = 395mm, que é a profundidade do Ressoador;
- A largura desse painel + (2x15mm) = 400mm, que é a largura do Ressoador.
- Painel inferior é encaixado dentro dos painéis laterais, frontal, e traseiro;
- Igual ao painel inferior, mas sem furos

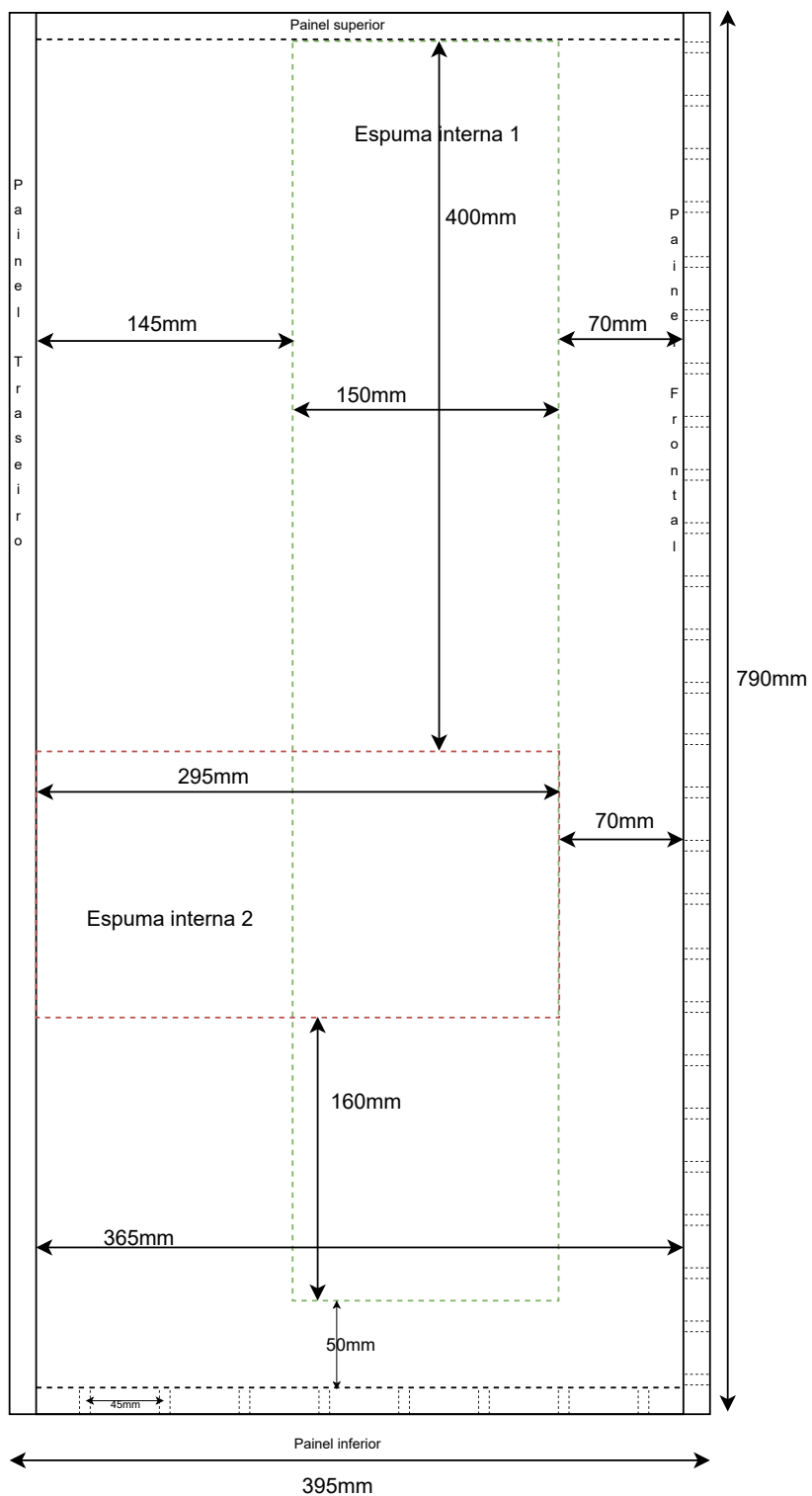
Vista da caixa

Vista frontal:



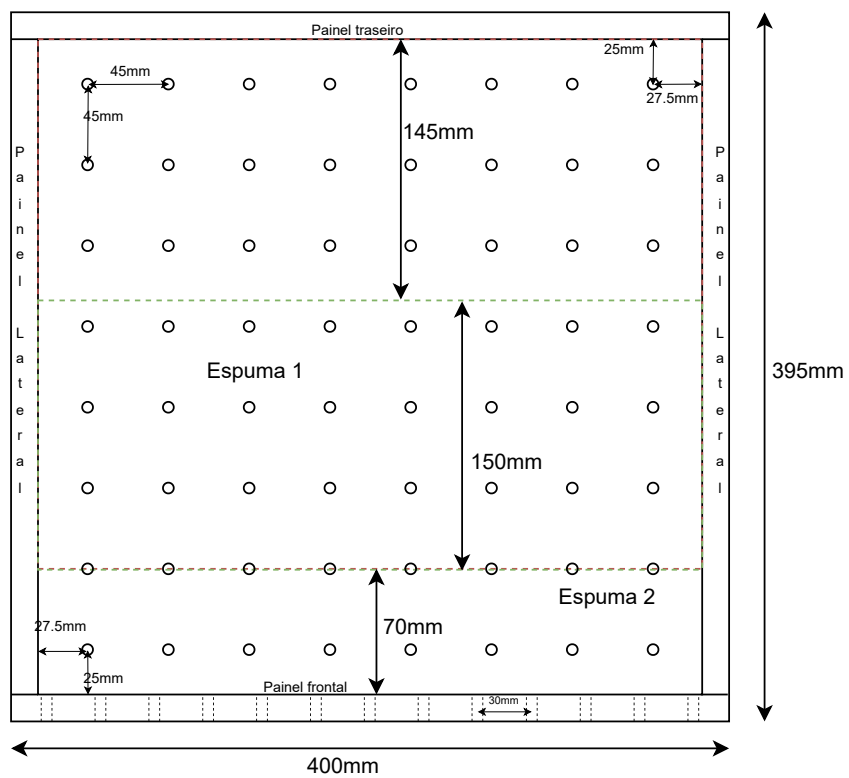
- As linhas pontilhadas representam as espessuras dos painéis laterais, superior, e inferior, todos atrás do painel frontal (painel frontal esconde, cobre todos eles na vista frontal).
- Linhas pontilhadas coloridas representam espumas;
- Espuma 1 (vertical) vai do topo até 50mm do painel inferior perfurado.

Vista lateral (esquerda)



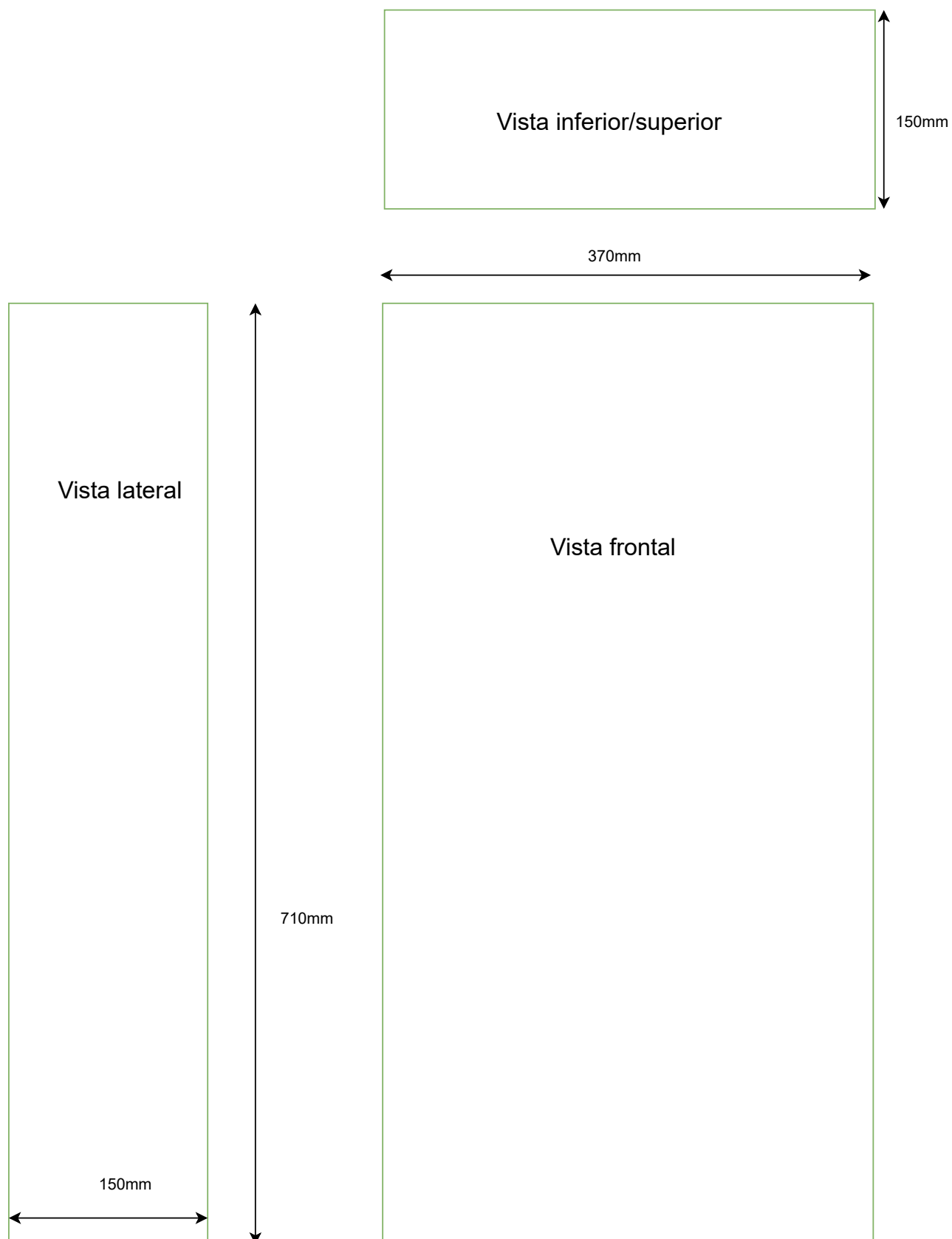
- Vista lateral com as espumas 1 e 2 (vertical e horizontal), com 50mm de distância dos painéis perfurados perpendiculares às espumas. Espuma 1 vertical se prolonga até 50mm do painel perfurado interior, e espuma 2 horizontal se prolonga até 50mm do painel frontal perfurado.

Vista inferior:



Vista das espumas:

Espuma 1 (vertical)



Espuma 2 (horizontal)

