



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS  
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO STRICTO SENSU EM ENGENHARIA  
MECÂNICA



**Leandro Neves de Assis**

**Estudo experimental do leiaute de disposição dos  
materiais de absorção sonora em uma sala de aula**

Goiânia  
2023



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS  
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

## TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO (TECA) PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES

### E DISSERTAÇÕES NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a [Lei 9.610/98](#), o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo das Teses e Dissertações disponibilizado na BDTD/UFG é de responsabilidade exclusiva do autor. Ao encaminhar o produto final, o autor(a) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

#### 1. Identificação do material bibliográfico

Dissertação     Tese     Outro\*: \_\_\_\_\_

\*No caso de mestrado/doutorado profissional, indique o formato do Trabalho de Conclusão de Curso, permitido no documento de área, correspondente ao programa de pós-graduação, orientado pela legislação vigente da CAPES.

**Exemplos:** Estudo de caso ou Revisão sistemática ou outros formatos.

#### 2. Nome completo do autor

Leandro Neves de Assis

#### 3. Título do trabalho

Estudo experimental do leiaute de disposição dos materiais de absorção sonora em uma sala de aula

#### 4. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador)

Concorda com a liberação total do documento  SIM     NÃO<sup>1</sup>

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante:

**a)** consulta ao(a) autor(a) e ao(a) orientador(a);

**b)** novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo da tese ou dissertação.

O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;

- Publicação da dissertação/tese em livro.

**Obs. Este termo deverá ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.**



Documento assinado eletronicamente por **Marlipe Garcia Fagundes Neto, Professor do Magistério Superior**, em 08/03/2023, às 07:41, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Leandro Neves De Assis, Discente**, em 08/03/2023, às 09:47, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufg.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **3579161** e o código CRC **66A95072**.

**Leandro Neves de Assis**

Estudo experimental do leiaute de disposição dos materiais de  
absorção sonora em uma sala de aula

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Goiás, como requisito final para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica. Área de Concentração: Ciências Mecânicas.

Orientador: Prof. Dr. Marlipe Garcia Fagundes Neto.

Universidade Federal de Goiás  
Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação

Goiânia  
2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do  
Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Assis, Leandro Neves de

Estudo experimental do leiaute de disposição dos materiais de  
absorção sonora em uma sala de aula [manuscrito] / Leandro Neves de  
Assis. - 2023.

CXI, 111 f.: il.

Orientador: Prof. Marlipe Garcia Fagundes Neto.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Escola  
de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC), Programa  
de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Goiânia, 2023.

Bibliografia. Apêndice.

Inclui abreviaturas, lista de figuras, lista de tabelas.

1. Acústica de salas. 2. Leiaute. 3. Tempo de reverberação. 4.  
Placa de absorção sonora. 5. Planejamento experimental. I. Fagundes  
Neto, Marlipe Garcia, orient. II. Título.

CDU 621



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS

ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

### ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Ata nº 01 da sessão de Defesa de Dissertação de **Leandro Neves de Assis**, que confere o título de Mestre em **Engenharia Mecânica**, na área de concentração em **Ciências Mecânicas**.

Ao **décimo sexto dia do mês de fevereiro do ano de dois e vinte e três**, a partir da(s) **09h00min.**, em **sala virtual da plataforma Google Meet**, realizou-se a sessão pública de Defesa de Dissertação intitulada “**Estudo experimental do leiaute de disposição dos materiais de absorção sonora em uma sala de aula**”. Os trabalhos foram instalados pelo Orientador, Professor Doutor **Marlize Garcia Fagundes Neto (UFG)**, com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: Professora Doutora **Maria Alzira de Araújo Nunes (UnB)**, membro titular externo; e Professor Doutor **Marco Aurélio Brazão Costa Badan (IFG)**, membro titular externo. Durante a arguição os membros da banca não fizeram sugestão de alteração do título do trabalho. A Banca Examinadora reuniu-se em sessão secreta a fim de concluir o julgamento da Dissertação, tendo sido o candidato **aprovado** pelos seus membros. Proclamados os resultados pelo Professor Doutor **Marlize Garcia Fagundes Neto**, Presidente da Banca Examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, lavrou-se a presente ata que é assinada pelos Membros da Banca Examinadora, ao **décimo sexto dia do mês de fevereiro do ano de dois e vinte e três**.

TÍTULO SUGERIDO PELA BANCA



Documento assinado eletronicamente por **Marlize Garcia Fagundes Neto, Professor do Magistério Superior**, em 16/02/2023, às 12:06, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Maria Alzira de Araújo Nunes, Usuário Externo**, em 16/02/2023, às 12:07, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Marco Aurélio Brazão Costa Badan, Usuário Externo**, em 16/02/2023, às 12:44, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufg.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **3527472** e o código CRC **A64B7EC2**.

**Leandro Neves de Assis**

# **Estudo experimental do leiaute de disposição dos materiais de absorção sonora em uma sala de aula**

Dissertação apresentada no Programa de Pós-Graduação *Stricto sensu* em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Goiás, como requisito final para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de Concentração: Ciências Mecânicas.

Orientador: Marlipe Garcia Fagundes Neto.

Dissertação avaliada e aprovada em 16 de fevereiro de 2023, pela seguinte Banca Examinadora:

---

**Prof. Dr. Marlipe Garcia Fagundes Neto**  
Orientador UFG

---

**Prof. Dr. Maria Alzira de Araújo Nunes**  
Avaliador externo - UnB

---

**Prof. Dr. Marco Aurélio Brazão Costa Badan**  
Avaliador externo - IFG

Goiânia  
2023

*Dedico este trabalho a quem colaborou  
diretamente comigo: meu orientador, o Prof. Dr.  
Marlipe Garcia, meus familiares Antônio, Elza e  
Alline, minha namorada Isadora, que estavam  
sempre comigo me incentivando a ser alguém melhor,  
sem os quais eu não teria concluído este projeto.*

# AGRADECIMENTOS

Um trabalho de mestrado é uma longa viagem, que inclui uma trajetória permeada por inúmeros desafios, tristezas, incertezas, alegrias e muitos percalços pelo caminho, mas apesar do processo solitário a que qualquer investigador está destinado, reúne contributos de várias pessoas, indispensáveis para encontrar o melhor rumo em cada momento da caminhada.

Trilhar este caminho só foi possível com o apoio, energia e força de várias pessoas, a quem dedico especialmente este projeto de vida.

Primeiramente a Deus, por sempre colocar pessoas maravilhosas em meu caminho, as quais me fazem acreditar em um mundo melhor e me encorajam a prosseguir. Obrigado por nunca soltar a minha mão e me guiar em todos os momentos.

À minha família, que nunca mediram esforços para me ensinar o caminho do bem, e sempre me apoiaram em todas as etapas da minha vida. Sem vocês, eu não chegaria até aqui. Muito obrigada por tudo! O amor que sinto por vocês é incondicional.

Especialmente à minha namorada Isadora, que está sempre comigo me incentivando a ser alguém melhor.

Gostaria de agradecer à PRPG/UFG, ao PPGMEC/UFG e ao CNPQ 434921/2018-1 "Acústica de Salas: Influência e modelagem da posição de materiais de absorção sonora na característica acústica de salas de aula.". Agradeço à oportunidade que me foi dada de desenvolver um trabalho criterioso e poder contribuir de alguma forma para o desenvolvimento de pesquisas no Brasil.

A todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho, o meu muito obrigado!

*“Se você quer ser bem-sucedido, precisa ter dedicação total, buscar seu último limite e dar o melhor de si.”*

*Ayrton Senna.*

## RESUMO

As salas de aula têm como função a promoção da aprendizagem através da comunicação oral e da audição. Assim, uma das principais características que determinam o sucesso desta função é a qualidade acústica das salas de aula. A inteligibilidade da fala é um dos parâmetros mais relevantes e pode ser melhorado minimizando o ruído externo e reduzindo a reverberação. Uma tática para diminuir a reverberação de uma sala é o amortecimento da energia sonora, utilizando materiais absorventes como: cadeiras acolchoadas, cortinas, carpetes e placas de absorção sonora (PAS). No entanto, a influência do posicionamento dos elementos, principalmente das PAS, é pouca estudada. Para os experimentos das posições com as PAS, foi utilizada a Sala 108 que está localizada no prédio de Engenharia Mecânica, campus II da UFG e baseando-se na ISO 3382-2 foram selecionados 2 pontos distintos para a fonte sonora e 6 pontos distintos para o receptor. Os dados obtidos foram analisados pela técnica da análise de variância, almejando identificar os fatores mais significativos para o desempenho acústico do ambiente, uma vez que o seguinte trabalho tem o objetivo geral de investigar a disposição dos materiais de absorção sonora em salas de aula, através dos parâmetros acústicos obtidos, como Tempo de Reverberação, Brilho, Razão de Baixos, Clareza e Definição. Os resultados mostraram que as frequências mais altas forneceram melhores respostas em todos os parâmetros. Além disso, de modo geral, observou-se que a configuração com placas distribuídas próximas ao quadro e ao fundo da sala se destacou por ter o melhor desempenho acústico para a sala estudada. Por outro lado, a configuração com placas apenas mais próximas ao quadro apresentou as piores respostas, caracterizando-se assim como o pior leiaute para a mesma sala.

**Palavras-chaves:** acústica de salas, leiaute, tempo de reverberação, placa de absorção sonora, planejamento experimental.

# ABSTRACT

Classrooms have the function of promoting learning through oral communication and listening. Thus, one of the main characteristics that determine the success of this function is the acoustic quality of classrooms. Speech intelligibility is one of the most relevant parameters and can be improved by minimizing external noise and reducing reverberation. One tactic to decrease the reverberation of a room is to dampen sound energy by using absorbent materials such as: padded chairs, curtains, carpets, and sound absorbing panels (SAP). However, the influence of the positioning of the elements, especially the SAP, is little studied. For the experiments of the positions with the SAP, Room 108 was used, which is located in the Mechanical Engineering building, campus II of UFG and, based on ISO 3382-2, 2 distinct points were selected for the sound source and 6 distinct points for the receptor. The data obtained was analyzed by the analysis of variance technique, aiming at identifying the most significant factors for the acoustic performance of the environment, since the following work has the general objective of investigating the arrangement of sound absorption materials in classrooms, through the acoustic parameters obtained, such as Reverberation Time, Brightness, Bass Ratio, Clarity and Definition. The results showed that the higher frequencies provided better responses in all parameters. Furthermore, in general, it was observed that the configuration with slabs placed closer to the frame and further back in the room stood out as having the best acoustic performance for the room studied. On the other hand, the configuration with slabs only closer to the board showed the worst responses, thus being characterized as the worst layout for the same room.

**Keywords:** room acoustics, layout, reverberation time, sound absorption plate, experimental design.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Isolamento acústico interno em paredes. ....	1
Figura 1.2 – A melhor configuração geral para disposição e quantidade de material de absorção sonora em uma típica sala de aula inteligente.....	3
Figura 1.3 – Posicionamento de PAS em uma sala de aula típica. ....	4
Figura 2.1 – Gráfico da quantidade de trabalhos sobre acústica ( <i>acoustics</i> ) na base de dados da <i>Scopus</i> . ....	8
Figura 2.2 – Gráfico da quantidade de trabalhos relacionados ao leiaute ( <i>layout</i> ) na base de dados da <i>Scopus</i> . ....	8
Figura 2.3 – Ranking de países com mais trabalhos publicados sobre acústica ( <i>acoustics</i> ). ....	10
Figura 2.4 – Ranking de países com mais trabalhos publicados sobre a relação do leiaute ( <i>layout</i> ) no desempenho acústico. ....	10
Figura 2.5 – Dia Internacional da Conscientização sobre o Ruído (2022). ....	11
Figura 2.6 – Relação de palavras citadas na busca ( <i>classroom AND acoustic</i> ). ....	13
Figura 2.7 – Gráfico demonstrando o som direto, as reflexões iniciais e a reverberação no domínio do tempo. ....	15
Figura 2.8 – Decomposição de uma forma de onda. ....	16
Figura 2.9 – Variação do NPS em função do espaço. ....	17
Figura 3.1 – Parcelas de energia sonora. ....	21
Figura 3.2 – Decaimento do tempo de reverberação. ....	23
Figura 3.3 – T20 (esquerda) e T30 (direita). ....	25
Figura 3.4 – Tempo de Decaimento Inicial (EDT). ....	25
Figura 4.1 – Dimensões em cm da Sala 108 presente no prédio da Engenharia Mecânica - EMC/UFG.....	37
Figura 4.2 – Equipamentos utilizados. ....	38
Figura 4.3 – Esquema de ligação dos equipamentos utilizados no ensaio. ....	38
Figura 4.4 – Dimensão da espuma acústica e da chapa de MDF cru. ....	39
Figura 4.5 – Espuma acústica caixa de ovo - 1,90 x 1 m. ....	40
Figura 4.6– Coeficiente de absorção acústica medido para a espuma por Barbosa (2021). ....	40

Figura 4.7 – Posicionamento da PAS na parede. a) Suporte na placa de MDF. b) Gancho preso na parede. ....	41
Figura 4.8 – Posicionamento da fonte e do receptor. Dimensões em cm. ....	42
Figura 4.9 – Representação das paredes.....	43
Figura 4.10 – Representação das posições. a) Posições na parede direita da sala. b) Posições na parede esquerda da sala .....	45
Figura 5.1 – Gráfico do Desvio Padrão para T20. ....	50
Figura 5.2 – Gráfico do Desvio Padrão para T30. ....	50
Figura 5.3 – Gráfico do Desvio Padrão para EDT. ....	51
Figura 5.4 – Gráfico do Tempo de Reverberação (T20). ....	52
Figura 5.5 – Gráfico do Tempo de Reverberação (T30). ....	52
Figura 5.6 – Gráfico do Tempo de Reverberação (EDT). ....	53
Figura 5.7 – Gráfico de Contorno (T20). ....	55
Figura 5.8 – Gráfico de Contorno (T30). ....	56
Figura 5.9 – Gráfico de Contorno (EDT). ....	57
Figura 5.10 – Leiaute ACDF. a) Disposição na parede direita b) Disposição na parede esquerda. ....	58
Figura 5.11 – Leiaute ABCD. a) Disposição na parede direita b) Disposição na parede esquerda.....	58
Figura 5.12 – Gráfico de Efeitos Principais (T20). ....	59
Figura 5.13 – Gráfico de Efeitos Principais (T30). ....	60
Figura 5.14 – Gráfico de Efeitos Principais (EDT). ....	61
Figura 5.15 – Gráfico do Brilho (Br). ....	65
Figura 5.16 – Gráfico da Razão de Baixo (BR). ....	65
Figura 5.17 – Gráfico da Clareza (C50). ....	68
Figura 5.18 – Gráfico da Definição (D50). ....	68
Figura 5.19 – Leiaute ACEF. a) Disposição na parede direita b) Disposição na parede esquerda. ....	70
Figura 5.20 – Leiaute ABCD. a) Disposição na parede direita b) Disposição na parede esquerda.....	70

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Quantidade de trabalhos sobre acústica ( <i>acoustics</i> ) e sobre a influência do leiaute ( <i>layout</i> ) no desempenho acústico no Brasil e no mundo.....	9
Tabela 2.2 – Resultados da busca por palavras-chave em bases conhecidas. ....	12
Tabela 2.3 –Trabalhos da base <i>Scopus</i> que relacionam acústica de salas de aula e leiaute .....	14
Tabela 3.1 – Classificação do STI .....	19
Tabela 3.2 - Critério de mérito para BR. ....	27
Tabela 3.3 – Relações entre C50 e D50 quanto à qualidade da fala. ....	30
Tabela 4.1 – Descrição da sala .....	36
Tabela 4.2 – Informações dos fatores .....	44
Tabela 4.3 – Classificação das frequências em banda de oitava. ....	46
Tabela 5.1 – Tempo de Reverberação Médio (T20).....	48
Tabela 5.2 – Tempo de Reverberação Médio (T30).....	48
Tabela 5.3 – Tempo de Reverberação Médio (EDT).....	49
Tabela 5.4 – Desempenho das configurações.....	54
Tabela 5.5 – Fatores significantes para o Tempo de Reverberação.....	62
Tabela 5.6 – Brilho (Br).....	63
Tabela 5.7 – Razão de Baixos (BR).....	64
Tabela 5.8 – Clareza (C50).....	66
Tabela 5.9 – Definição (D50).....	67
Tabela 5.10 – Quadro de Desempenho Geral.....	69

## LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANOVA	- Análise de Variância
ASA	- Acoustical Society of America (Sociedade Americana de Acústica)
BR	- Bassratio (Razão de Baixos)
Br	- Brilho
C50 e C80	- Clareza/Clareza
D50 e D80	- Definição
DOE	- Planejamento de Experimentos
EDT	- Early Decay Time (Tempo de Decaimento Inicial)
ESS	- Exponential Sine Sweep (Varredura de Seno Exponencial)
INAD	Dia Internacional da Conscientização sobre o Ruído
MLS	- Maximum Length Sequences (Sequências de Comprimento Máximo)
NBR	- Norma Brasileira
NPS	- Nível de Pressão Sonora
PAS	- Placa de Absorção Sonora
RIS	- Resposta ao Impulso da Sala
SINDUSCON-DF	Sindicato da Indústria da Construção Civil do Distrito Federal
SOBRAC	Associação Brasileira de Acústica
STI	- Speech Transmission Index (Índice de Transmissão da Fala)
TDS	- Time Delay Spectrometry (Espectrometria de Atraso de Tempo)
TR	- Tempo de Reverberação

UFG

- Universidade Federal de Goiás

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1	Justificativa	4
1.2	Objetivos	5
1.2.1	Objetivo geral	5
1.2.2	Objetivos específicos	5
1.3	Estrutura do trabalho	6
<b>2</b>	<b>ESTADO DA ARTE</b>	<b>7</b>
2.1	Panorama da acústica na atualidade	7
2.2	Revisão sistemática	12
2.3	Acústica de salas	14
<b>3</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>18</b>
3.1	Parâmetros acústicos de salas	18
3.1.1	Inteligibilidade da fala (STI)	18
3.1.2	Reflexão sonora e Absorção sonora	19
3.1.3	Resposta ao impulso	22
3.1.4	Tempo de Reverberação (TR)	22
3.1.5	Razão de Baixos ou <i>BassRatio</i> (BR)	26
3.1.6	Brilho (Br)	27
3.1.7	Clareza (C80 ou C50) e Definição (D50)	28
3.2	Metodologia de análise de dados	30
3.2.1	Análise variância (ANOVA)	30
3.2.2	Planejamento de experimentos (DOE)	32
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>35</b>
4.1	Especificações do ambiente	35
4.2	Cadeia de instrumentação	37
4.3	Determinação dos parâmetros	41

4.4	Leiaute dos ensaios .....	44
4.5	Tratamento dos dados .....	45
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>47</b>
5.1	Tempo de Reverberação.....	47
5.2	Brilho e Razão de Baixos .....	63
5.3	Clareza e Definição .....	66
5.4	Desempenho geral .....	69
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>71</b>
6.1	Conclusão.....	71
6.2	Sugestões para trabalhos futuros .....	72
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>73</b>
<b>8</b>	<b>APÊNDICE A – LEIAUTE DOS ENSAIOS.....</b>	<b>79</b>
<b>9</b>	<b>APÊNDICE B – ANÁLISE DE VARIÂNCIA .....</b>	<b>87</b>

# 1 INTRODUÇÃO

A falta do tratamento acústico adequado no desenvolvimento de um projeto está ligada a alguns problemas que afetam a sociedade atualmente, tais como problemas de saúde e impacto na qualidade de vida, aumento dos custos e retrabalho, defasagem competitiva e complicações jurídicas. Assim, o tratamento acústico além de um investimento necessário é também estratégico.

Eliminar a transmissão de ruídos de um ambiente para outro é fundamental para garantir a eficiência de um projeto acústico e o conforto sonoro. Por isso, o isolamento acústico é um dos principais pontos a ser abordado no estudo e no trabalho do profissional da área. Entretanto, o isolamento acústico vai além do revestimento interno (Figura 1.1), na realidade o que existe é uma combinação de materiais que fazem com que o sistema fique acusticamente adequado para o ambiente projetado.

Figura 1.1 - Isolamento acústico interno em paredes.



Fonte: Portal Acústica (2020).

No entanto, como aponta o trabalho de Souza (2019), por se tratar de um elemento invisível, o som muitas vezes é negligenciado no desenvolvimento de projetos de engenharia e arquitetura. Desta forma, problemas acústicos são comuns em ambientes fechados. A acústica de salas é o estudo do som no interior do ambiente, focando tanto no campo sonoro, na curva de decaimento acústico e na qualidade acústica.

As salas de aula têm como função a promoção da aprendizagem, a qual é principalmente conseguida através da comunicação oral e da audição. Portanto, uma das principais propriedades físicas que determinam o sucesso desta função é a acústica das salas de aula. Em

situações de ensino, a inteligibilidade da fala é o parâmetro mais relevante. Segundo Fernandes (2017), este parâmetro é melhorado minimizando o ruído de fundo e reduzindo o campo reverberante.

Neste sentido, Falcão (2022) sugere que uma tática para diminuir a reverberação de uma sala é fazer o amortecimento da energia acústica utilizando materiais absorventes, como cadeiras acolchoadas, cortinas, carpete ou painéis dedicados para absorção de som. Além disso, a presença de pessoas em uma sala reduz a reverberação e, portanto, produz um valor de tempo de reverberação menor em comparação com a sala desocupada.

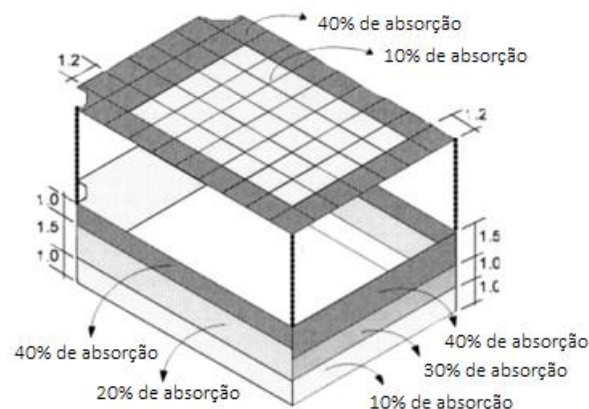
Como será evidenciado nos próximos capítulos, apesar da acústica ter ganhado exposição com o passar do tempo, existem poucos estudos sobre a influência do posicionamento do material de absorção sonora em acústica de salas de aula.

Dentre os poucos trabalhos a nível global, destaca-se o trabalho dos autores Mir & Abdou (2005) que avaliaram os parâmetros acústicos provenientes do ruído de fundo ambiental e índices de inteligibilidade da fala, com a finalidade encontrar de um modelo ideal para as salas de aula inteligentes (uma nova geração de salas de aula de tecnologia elevada). Os pesquisadores realizaram testes de simulação de absorção das superfícies (auxiliados pelo programa *ODEON 5.0®*). A simulação de materiais acústicos para pisos, paredes e teto foi realizada para encontrar um tempo de reverberação entre 0,4 e 0,6 segundos, conforme as recomendações da ASA (*Acoustical Society of America*) em Seep et al (2000), e posteriormente pela norma ANSI S12.60 (2010). Os resultados apontaram a melhor configuração para esse tipo de sala, como representado na Figura 1.2, na qual obteve uma melhoria na acústica transferindo parte da absorção sonora do teto para as paredes. Para essa configuração, mantiveram a periferia do teto com um material absorvente (40% de absorção sonora) e sua região central com baixo revestimento (10% de absorção sonora), a fim de favorecer a reflexão da voz do professor na direção do fundo da sala. As paredes laterais têm na parte inferior, próxima ao piso, um material de característica reflexiva com baixa absorção sonora (10% de absorção sonora), em sua parte média um material absorvente (20% de absorção sonora) e na parte superior, próximo ao teto, um material de absorção sonora (40% de absorção sonora). Para a parede do fundo, a parte inferior é composta por um material refletivo (10% de absorção sonora), a parte média por um material absorvente (30% de absorção sonora) e a parte superior por um material absorvente (40% de absorção sonora).

Além deles, cita-se também Bistafa & Bradley (2000) que avaliaram a capacidade de várias expressões analíticas e dois softwares de acústica de salas de aula para prever tempos de

reverberação medidos numa sala de aula simulada. Como resultado, os autores constataram que a fórmula de Sabine previu consistentemente os tempos de reverberação subestimados para todas as configurações de absorção de som testadas. Segundo eles, a inexatidão da fórmula deve-se ao fato de que o campo sonoro era menos difuso do que o campo sonoro ideal, em que estas expressões analíticas se baseiam, uma vez que a dispersão do som foi considerada um fator, assim como outros fatores, incluindo a quantidade e distribuição do material de absorção sonora, que também desempenham um papel importante no grau de difusão do campo sonoro. Eles também compararam os resultados com expressões analíticas, entre elas Sabine, Eyring, Fritzroy e Arau-Puchades. Dentre elas, destaca-se Fritzroy (1959 apud Brandão, 2016) que propôs um equacionamento que também pondera a distribuição dos dispositivos de absorção sonora.

Figura 1.2 – A melhor configuração geral para disposição e quantidade de material de absorção sonora em uma típica sala de aula inteligente.



Fonte: Mir e Abdou (2005) (Adaptado).

Pondera-se que as simulações acústicas que são feitas durante o desenvolvimento de um estudo, além de possuírem um custo considerável, muitas vezes não condizem com a resposta real, pois apesar de possuírem bons modelos os dados de entrada geralmente não são tão confiáveis. As predições do tempo de reverberação e das métricas de inteligibilidade de discurso por programas de simulação, como *Odeon*, nem sempre são mais precisas quando comparada aos cálculos analíticos (BISTAFA; BRADLEY, 2000).

## 1.1 Justificativa

Apesar de diversos países já possuírem normas e diretrizes acústicas para projetos acústicos de espaços educacionais, o Brasil não possui regulamentação ou normas indicando requisitos acústicos que devam ser atendidos em salas de aula ou outros espaços educacionais. A única norma que contém um parâmetro objetivo é a norma brasileira ABNT NBR 10152: 2017 que estabelece valores de referência de níveis de pressão sonora para salas de aula, entretanto não aborda importantes parâmetros acústicos, como Tempo de Reverberação, Tempo de Decaimento, Índice de Transmissão da Fala, entre outros.

Neste cenário o Brasil está atrasado em relação a outros países quando se trata de projetar espaços educacionais acusticamente confortáveis e adequados. Isso pode estar associado à falta de uma norma/diretriz acústica a ser seguida (RAEDER; NAKAZATO, 2018). No decorrer do trabalho, será exposto em números como o Brasil é carente de estudos sobre a área da acústica e principalmente, sobre a relação do leiaute no desempenho acústico.

Sabendo disso, levantamos a hipótese do quanto à disposição dos materiais de absorção sonora influenciam nas características acústicas de um leiaute de uma sala de aula. A Figura 1.3 ilustra alguns tipos de posicionamentos das PAS em uma sala de aula.

Figura 1.3 – Posicionamento de PAS em uma sala de aula típica.



Nesse viés, tendo com referência o trabalho de Mir & Abdou (2005) que investigou o desempenho acústico de uma sala de aula propondo uma maior quantidade de material de absorção sonora nas paredes laterais, este trabalho propõe investigar nas paredes laterais qual a melhor posição para colocar os materiais (mais próximas do quadro ou do fundo da sala, por exemplo).

## **1.2 Objetivos**

Diante do exposto, os objetivos desse trabalho estão divididos em objetivo geral e em objetivos específicos.

### **1.2.1 Objetivo geral**

Este trabalho tem como objetivo geral investigar experimentalmente a influência da posição de materiais de absorção sonora na característica acústica de uma sala de aula típica da UFG.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

Os objetivos específicos são:

- Formação do campo sonoro em um ambiente fechado, bem como os fatores que o influenciam;
- Estudar os parâmetros acústicos que caracterizam um ambiente fechado (além do tempo de reverberação);
- Apresentar uma revisão sistemática que envolve as palavras chave desse trabalho;
- Medir os parâmetros acústicos de um ambiente fechado para vários leiautes de materiais de absorção sonora;

- Analisar a influência do leiaute dos materiais de absorção sonora nos parâmetros acústicos;
- Sugerir o melhor leiaute que adeque acusticamente o ambiente utilizando a uma determinada quantidade de material disponível;

### **1.3 Estrutura do trabalho**

A dissertação é composta por cinco capítulos, dispostos da seguinte forma:

- O primeiro corresponde à introdução, onde foi apresentado o panorama geral do trabalho, com uma breve descrição da realidade acústica em salas de aulas no Brasil, a justificativa do estudo proposto e os objetivos.
- O segundo capítulo apresenta a fundamentação teórica contendo a revisão bibliográfica dos conceitos relevantes e dos parâmetros acústicos que serão utilizados no desenvolvimento da pesquisa, incluindo as técnicas utilizadas na análise dos dados. Também é identificada nesta etapa a revisão de literatura do trabalho, realizada de forma sistemática, com artigos que convergem com o tema da dissertação. Por fim, apresenta-se o Estado da Arte da acústica em dias atuais.
- O terceiro capítulo refere-se à metodologia adotada para a realização das medições acústicas nos estudos de caso e para a realização dos cálculos analíticos. Nesse capítulo, será retratado o estudo piloto que auxiliou na definição do procedimento metodológico e os passos a serem seguidos posteriormente no método experimental através da resposta impulsiva acústica.
- O quarto capítulo corresponde aos resultados de cada etapa, obtidos pelo planejamento experimental e análise de variância. São analisados os parâmetros acústicos separadamente com a variação do leiaute, e após isso, são apresentados os resultados dos tempos de reverberação, Brilho, Razão de Baixo, Clareza e Definição.
- Por fim, na quinta seção do trabalho são realizadas as considerações finais obtidas com o estudo desenvolvido. Nela são destacadas as conclusões do trabalho, dificuldades, sugestões para trabalhos futuros.

## 2 ESTADO DA ARTE

Este capítulo tem por objetivo, principalmente, contribuir com a análise das produções científicas sobre o tema. Assim, ele se divide em três partes: panorama da acústica nos dias atuais, revisão sistemática e o estudo relacionado ao tema da pesquisa.

De modo geral, a apresentação do panorama da acústica na atualidade é importante para a apresentar políticas na área da acústica que vem ganhando espaço.

A revisão sistemática demonstra a forma com que os principais trabalhos sobre o tema da dissertação foram buscados, elencando os resultados encontrados em bases de conhecimento reconhecidas, tais como *Web of Science* e *Scopus*.

Por fim, o estudo relacionado ao tema da pesquisa destina-se a acústica de salas, destacando os principais pontos dessa área de estudo.

### 2.1 Panorama da acústica na atualidade

O estudo da acústica tem ganhado cada vez mais relevância. Ao fazer uma busca pela base de conhecimento *Scopus*, pesquisando a palavra *acoustics* como palavra-chave entre os anos de 2000 e 2020, pelo gráfico da Figura 2.1, fica evidente que teve um aumento no número de estudos. Em paralelo a isso, ao adicionar a palavra *layout* para buscar estudos relacionados ao leiaute, nota-se que o número de trabalhos também vem aumentando, como observa-se no gráfico da Figura 2.2. Entretanto, o número de trabalhos relacionados ao leiaute ainda é bastante inferior ao se comparar com o número de trabalhos na área da acústica (menos que 1%).

Figura 2.1 – Gráfico da quantidade de trabalhos sobre acústica (*acoustics*) na base de dados da *Scopus*.

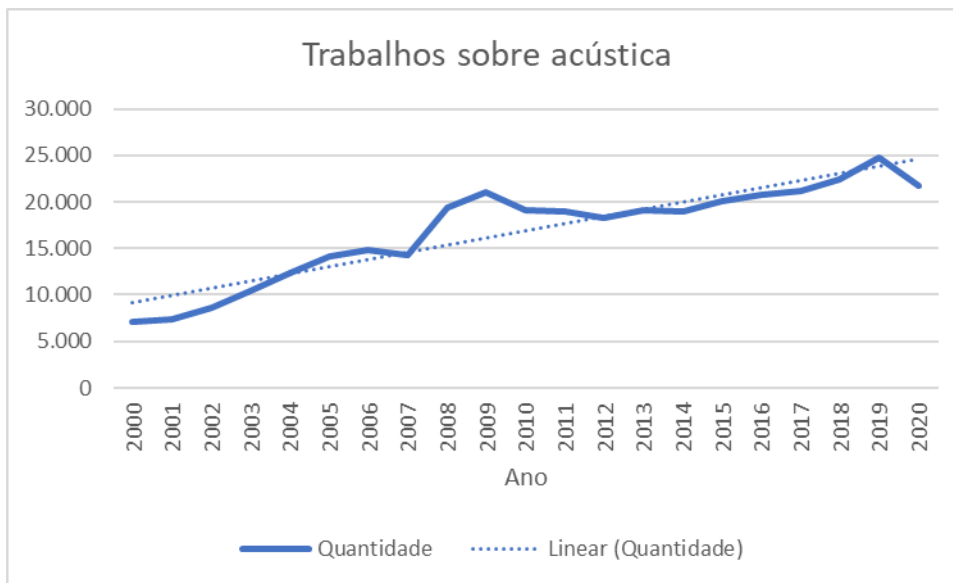
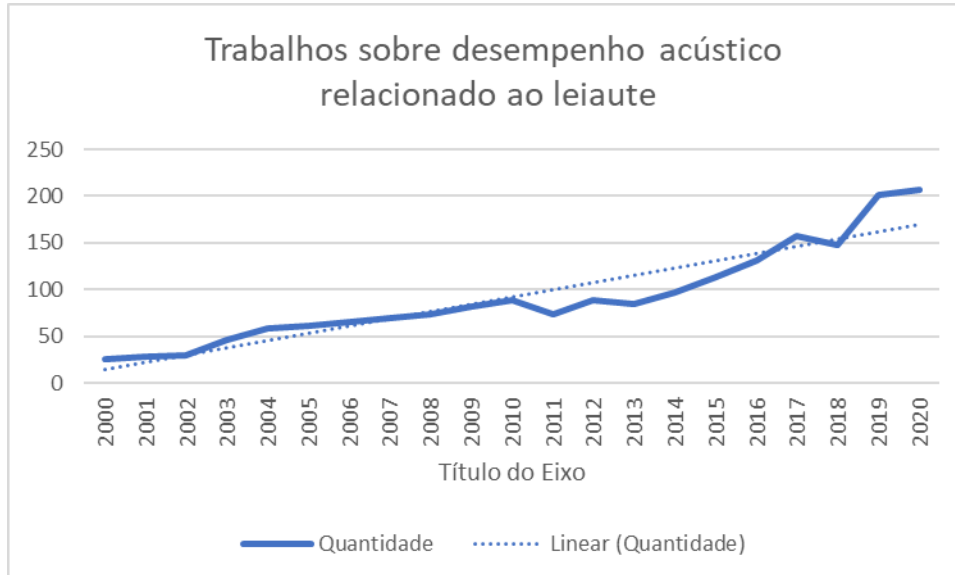


Figura 2.2 – Gráfico da quantidade de trabalhos relacionados ao leiaute (*layout*) na base de dados da *Scopus*.



Destaca-se ainda, por meio da Tabela 2.1, que ao filtrar a pesquisa pela origem dos trabalhos, o Brasil publicou em média 1,42% dos trabalhos publicados no mundo sobre acústica. Quando se trata do estudo do desempenho acústico relacionado ao leiaute de uma sala a média da quantidade de publicação no Brasil é ainda menor (0,52%), sendo que por diversos anos não

houve uma única publicação sobre o tema.

Tabela 2.1 – Quantidade de trabalhos sobre acústica (*acoustics*) e sobre a influência do leiaute (*layout*) no desempenho acústico no Brasil e no mundo.

Ano	Acústica			Acústica + Leiaute		
	Mundo	Brasil	(%)	Mundo	Brasil	(%)
2020	21.717	407	1,87%	207		0,00%
2019	24.715	439	1,78%	201		0,00%
2018	22.437	429	1,91%	148	2	1,35%
2017	21.133	335	1,59%	158	1	0,63%
2016	20.785	421	2,03%	131	3	2,29%
2015	20.046	325	1,62%	114	2	1,75%
2014	18.996	277	1,46%	97	1	1,03%
2013	19.077	328	1,72%	85	1	1,18%
2012	18.316	268	1,46%	89	1	1,12%
2011	18.913	306	1,62%	74		0,00%
2010	19.043	333	1,75%	89		0,00%
2009	21.076	237	1,12%	82		0,00%
2008	19.378	237	1,22%	74		0,00%
2007	14.253	153	1,07%	69		0,00%
2006	14.894	173	1,16%	65	1	1,54%
2005	14.073	213	1,51%	61		0,00%
2004	12.306	130	1,06%	59		0,00%
2003	10.404	106	1,02%	46		0,00%
2002	8.603	106	1,23%	29		0,00%
2001	7.415	57	0,77%	28		0,00%
2000	7.046	54	0,77%	26		0,00%
	<b>Média</b>		<b>1,42%</b>			<b>0,52%</b>

Nesse contexto, as Figura 2.2 e Figura 2.3 ilustram o *ranking* de países que possuem mais estudos sobre acústica e a relação do leiaute no desempenho acústico, respectivamente.

Figura 2.3 – Ranking de países com mais trabalhos publicados sobre acústica (*acoustics*).

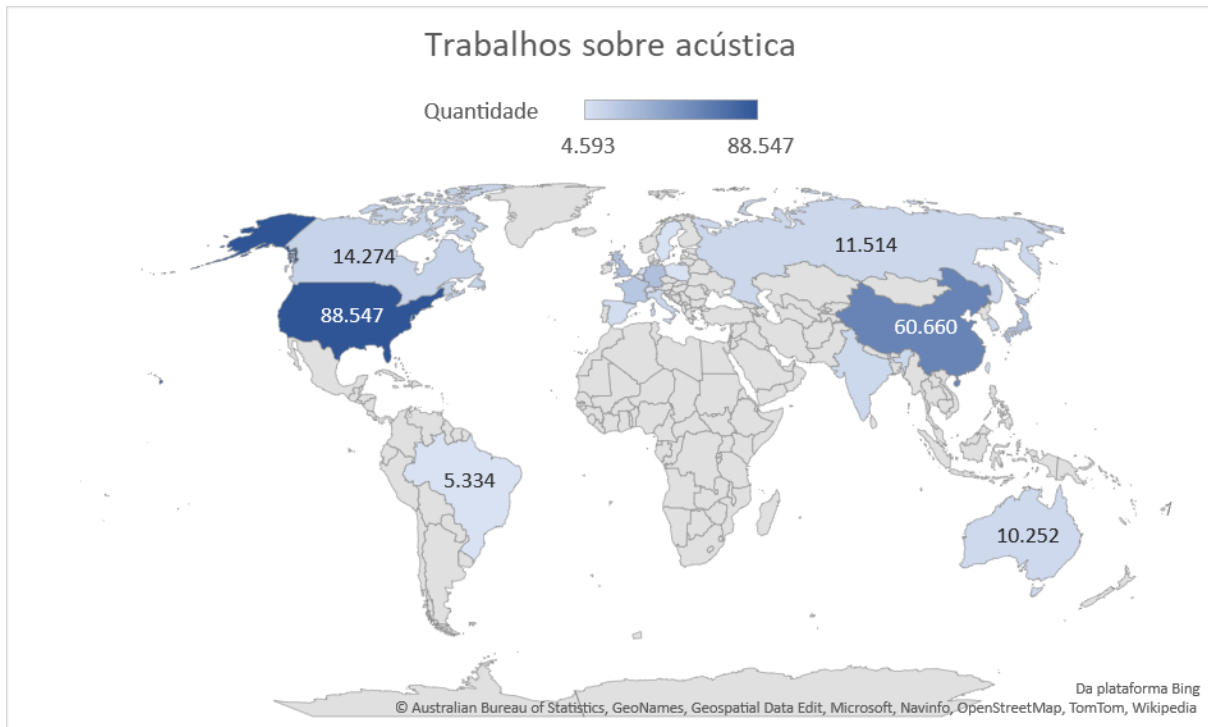
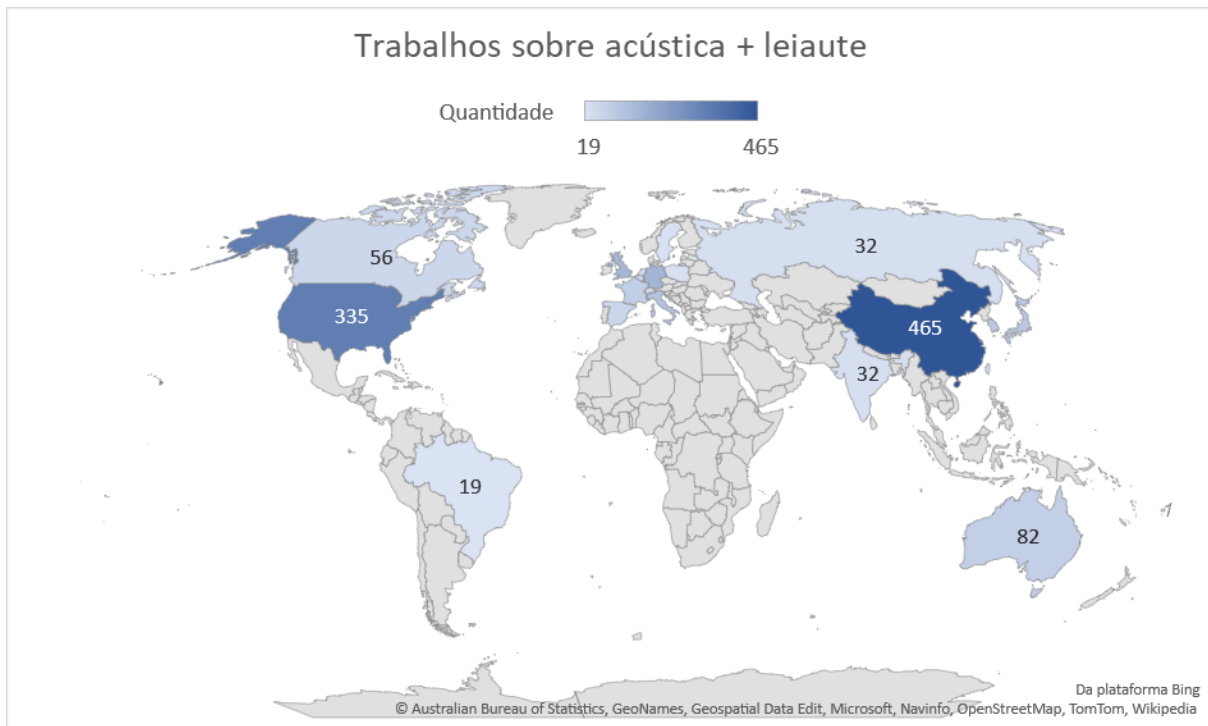


Figura 2.4 – Ranking de países com mais trabalhos publicados sobre a relação do leiaute (*layout*) no desempenho acústico.



Atualmente, há várias campanhas que envolvem a acústica, como por exemplo o Dia Internacional da Conscientização sobre o Ruído (INAD) que é comemorado na última quarta-feira de abril de cada ano, e em 2022 a data foi celebrada no dia 27 de abril (Figura 2.5). O INAD é um evento mundial de alerta sobre os efeitos nocivos da poluição sonora na saúde, qualidade de vida das pessoas e no meio ambiente. Desde 2011, essa data foi incluída no calendário de eventos de São Paulo e outras cidades brasileiras, com intervenções urbanas impactantes e criativas de grande repercussão no Brasil e no mundo. Nessa data, observa-se um minuto de silêncio a fim de demonstrar o impacto do ruído na vida cotidiana.

Figura 2.5 – Dia Internacional da Conscientização sobre o Ruído (2022).



Fonte: Pro Acústica (2022).

Cita-se, ainda no Brasil, a atuação da Sociedade Brasileira de Acústica (SOBRAC), em especial a Regional Centro Oeste, que desenvolveu um projeto para obras de condicionamento acústico em duas salas de escola pública do Distrito Federal. No evento de lançamento, a arquiteta e diretora do Sindicato da Indústria da Construção Civil do Distrito Federal (SINDUSCON-DF), Cândida Maciel, destacou a importância de fatores como o volume da sala, posicionamento das paredes e verificar coeficiente de absorção sonora dos revestimentos.

Com a pandemia causada pelo Coronavírus (Covid-19), um número expressivo de escolas no mundo todo tiveram suas atividades presenciais suspensas. Por consequência, houve uma notória preocupação em garantir que os estudantes não fossem prejudicados em seu processo de escolarização. Por isso, a pandemia foi um marco para o investimento em

infraestrutura destinada ao conforto e a qualidade acústica.

## 2.2 Revisão sistemática

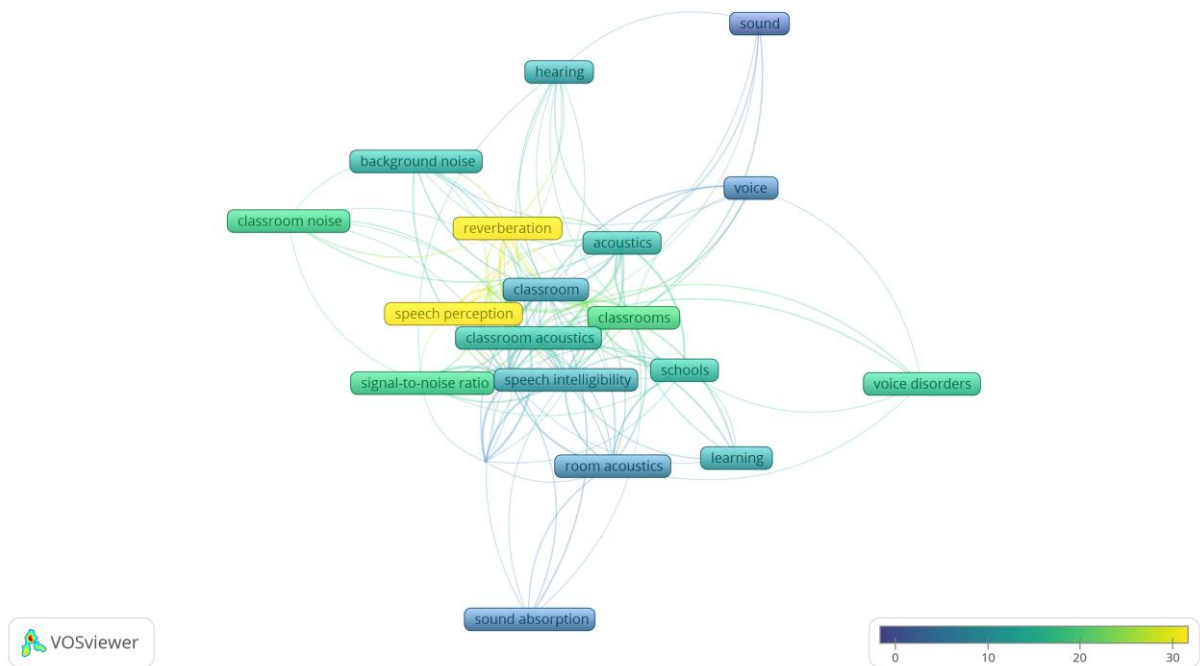
Buscando coletar toda a evidência empírica que se encaixa em critérios de elegibilidade pré-definidos, foi utilizado o método da revisão sistemática para avaliar um conjunto de dados provenientes de diferentes estudos. Com o objetivo de levantar produções científicas disponíveis para construção de conceitos, realizou-se uma busca por palavras-chave na plataforma *Scopus* e *Web of Science* buscando trabalhos realizados entre os anos de 2000 a 2020, obtendo, em junho de 2022, as seguintes quantidades de artigos, conforme a Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Resultados da busca por palavras-chave em bases conhecidas.

Palavras buscadas	Quantidade de artigos	
	<i>Scopus</i>	<i>Web of Science</i>
( <i>classroom AND acoustic</i> )	802	285
( <i>room acoustics AND reverberation time</i> )	647	235
( <i>acoustic AND experimental AND layout</i> )	277	120
( <i>room AND acoustic AND reverberation AND absorbing</i> )	213	97
( <i>acoustic AND sound absorbing AND reverberation time</i> )	108	46
( <i>room acoustic AND reverberation time AND panel</i> )	28	4

Por possuir um maior quantitativo para as buscas, considerou-se a *Scopus* como base principal das buscas e considerando que salas de aula e acústica são os temas mais relacionados a esse trabalho e uma maior quantidade de trabalhos publicados, selecionou a relação *classroom AND acoustic* para serem exportados em formato “.cvs” e analisados no *VOS Viewer* (VAN ECK; WALTMAN, 2009). Foi feita a análise de co-ocorrência de todas as palavras-chave dos artigos encontrados, filtrando no mínimo dez ocorrências em artigos distintos. Desta forma, criou-se uma linha de pensamento utilizando como base as palavras mais citadas. A Figura 2.6 ilustra esta análise. A quantidade de citações está em escala de cores na própria figura.

Figura 2.6 – Relação de palavras citadas na busca ( *classroom AND acoustic* ).



Evidencia-se a ocorrência destacada para os termos Reverberação (*Reverberation*) e Percepção da fala (*Speech perception*), mostrando que esses tópicos devem nortear esse trabalho.

Em adicional a essa pesquisa, foram relacionados os dois termos (acústica e salas de aula) com o termo leiaute, obteve-se o resultado disposto na Tabela 2.3. Dentre eles, apesar de aparecer apenas como o terceiro mais citado (11 citações), salienta o estudo de Mir e Abdou (2005), pois é o estudo de base desse trabalho e que possui um objetivo semelhante.

Tabela 2.3 –Trabalhos da base *Scopus* que relacionam acústica de salas de aula e leiaute

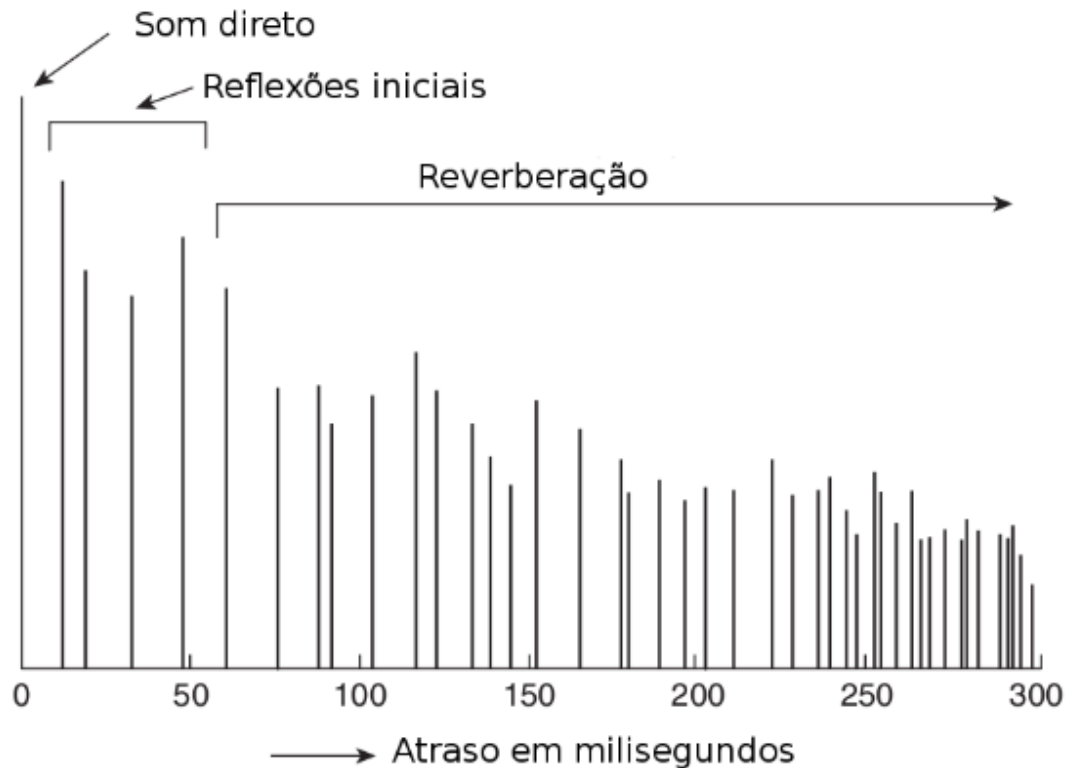
<b>Título</b>	<b>Autor</b>	<b>Ano</b>	<b>Citações</b>
<i>A study on student perceptions of higher education classrooms: Impact of classroom attributes on student satisfaction and performance</i>	Yang, Z., Becerik-Gerber, B., Mino, L.	2013	107
<i>Noise levels in primary schools of medium sized city in Greece</i>	Sarantopoulos, G., Lykoudis, S., Kassomenos, P.	2014	22
<i>Investigation of sound-absorbing material configuration of a smart classroom utilizing computer modeling</i>	Mir, S.H., Abdou, A.A.	2005	11
<i>Acoustic comfort as a salutogenic resource in learning environments—a proposal for the design of a system to improve the acoustic quality of classrooms</i>	Lauria, A., Secchi, S., Vessella, L.	2020	3
<i>Fieldwork study on acoustical environment of learning and living spaces for children with disability</i>	Ueno, K., Nakajima, C.	2012	3

## 2.3 Acústica de salas

Segundo Brandão (2016), a acústica de salas é uma mistura entre teoria e prática e trata o problema de como o som se propaga em um ambiente. O interesse desse estudo é a representação tempo-espaço-frequência do som no interior de um ambiente, também buscando controlá-lo de forma que este se torne acusticamente adequado ao seu uso principal. É importante lembrar que a acústica de salas é o estudo do som no interior do ambiente, não se preocupando com a transmissão do som para os ambientes adjacentes, assim o objeto de estudo é como modelar o som no interior de uma sala e condicioná-la para que apresente uma resposta acústica adequada à prática à qual ela se destina.

A dimensão temporal é importante para se conhecer a resposta de um sinal de caráter impulsivo, uma vez que ela é constituída pelos níveis de pressão sonora (NPS) medidos ao longo do tempo, como mostra a Figura 2.7.

Figura 2.7 – Gráfico demonstrando o som direto, as reflexões iniciais e a reverberação no domínio do tempo.



Fonte: Falcão (2019).

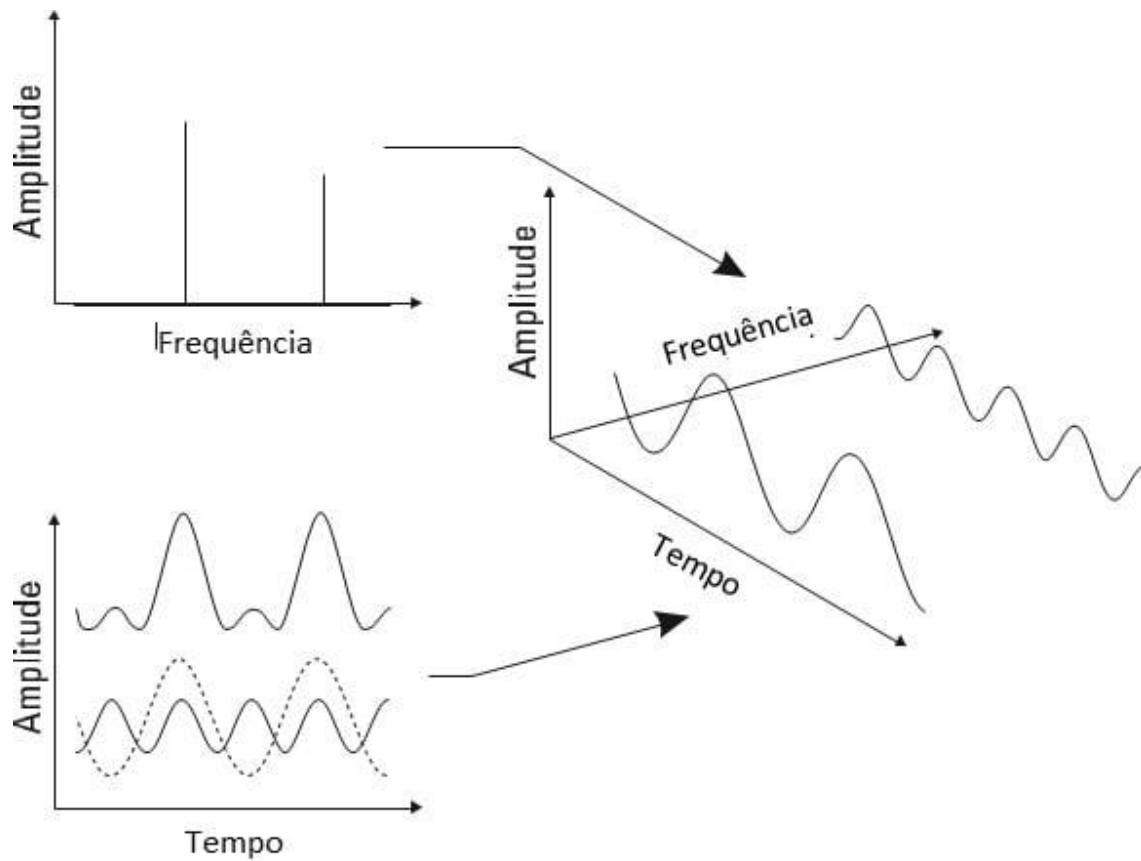
A partir dessa distribuição ao longo do tempo, a sala pode ser avaliada quanto a seus diversos parâmetros acústicos objetivos. O som direto é o caminho que o som percorre entre a fonte e o receptor sem qualquer reflexão e as primeiras reflexões compreendem a região entre o som direto e 50 ms. Assim como o som direto, as primeiras reflexões são cruciais, pois são entendidos como um único som. Na relação som direto-reverberante, o som direto deve ser maximizado para maior inteligibilidade da fala (BRANDÃO, 2016).

O estudo no domínio da frequência é responsável por caracterizar quais componentes são atenuados ou exacerbados por ressonâncias da sala. De fato, este domínio é completamente relacionado a dimensão temporal por meio da Transformada de Fourier<sup>1</sup> (Figura 2.8). Por mais que o som seja um fenômeno fisicamente complexo, as informações percebidas pelo receptor

<sup>1</sup> A transformada de Fourier, epônimo a Jean-Baptiste Joseph Fourier, decompõe uma função temporal (um sinal) em frequências, tal como um acorde de um instrumento musical pode ser expresso como a amplitude (ou volume) das suas notas constituintes.

se restringem a pressão e tempo, sendo a amplitude (ou intensidade), frequência e tempo as propriedades básicas inerentes a todo e qualquer som (VIELLIARD; SILVA, 2010)

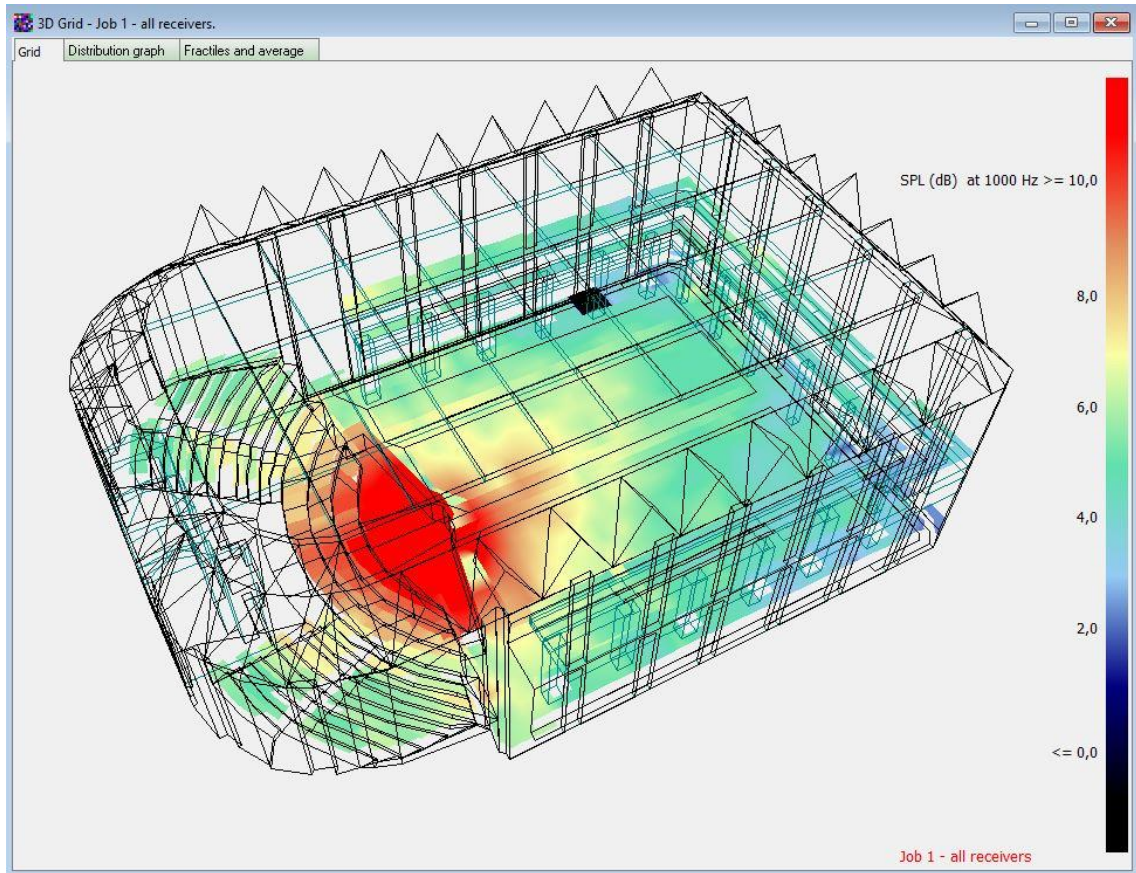
Figura 2.8 – Decomposição de uma forma de onda.



Fonte: Aroeira (2020).

O estudo do domínio do espaço é necessário para saber quais características acústicas variam em função da posição da sala, em termos principalmente do Nível de Pressão Sonora (NPS) (ver Figura 2.9) e Tempo de Reverberação (TR).

Figura 2.9 – Variação do NPS em função do espaço.



Fonte: Falcão (2019).

Cada espaço tem sua própria “impressão digital” sonora que afeta a qualidade de um som, seja fala, música ou qualquer tipo de ruído. Os engenheiros acústicos de salas tentam entender o comportamento do som nos espaços e torná-los adequados para diferentes propósitos. Uma sala de aula deve ser bem projetada para uma transmissão de fala clara do palestrante para os alunos, enquanto uma sala de concertos deve prolongar e enriquecer o som de uma orquestra para torná-lo impressionante.

Os elementos chave em acústica de salas são as fontes e receptores de som, a geometria do espaço fechado (sala) e os materiais (propriedades acústicas) das paredes.

## 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O presente capítulo tem por finalidade apresentar ao leitor a fundamentação teórica da pesquisa, dividida em duas partes: revisão bibliográfica dos parâmetros teóricos e revisão bibliográfica das metodologias de análise de dados.

A revisão bibliográfica dos parâmetros teóricos apresenta conceitos e definições de assuntos da literatura considerados relevantes para o desenvolvimento da dissertação.

A revisão bibliográfica da metodologia de análise de dados expõe o embasamento teórico necessário para o planejamento do ensaio e análise dos dados obtidos.

Desta forma, com a revisão das discussões de outros autores e das pesquisas realizadas sobre o tema abordado será possível ter o embasamento teórico necessário para o desenvolvimento do trabalho.

### 3.1 Parâmetros acústicos de salas

#### 3.1.1 Inteligibilidade da fala (STI)

A inteligibilidade da fala ou *Speech Transmission Index* (STI) pode ser definida como o grau com o qual a mensagem do falante pode ser decodificada pelo ouvinte (KENT; WEISMER; KENT; ROSENBECK, 1989). Em outras palavras, refere-se à facilidade com que o ouvinte é capaz de entender a fala de seu interlocutor. Dessa forma, a inteligibilidade não deve ser vista apenas como um atributo do falante, pois também é dependente de variáveis relacionadas ao ouvinte e ao contexto no qual a comunicação acontece (HUSTAD, 2008).

Para Hodgson e Nosal (2002), a grande preocupação em relação às características acústicas de salas de aula é a inteligibilidade da fala e sempre que existe comunicação verbal de uma mensagem entre um emissor e um receptor é possível que a mensagem chegue ao receptor de modo pouco inteligível. Isso se deve ao meio de transmissão utilizado (SILVA,

2013). Brand (2008), Long (2006) e Voran (2008), afirmam que a inteligibilidade da fala é a medida direta do número de palavras ou frases compreendidas por um ouvinte. De uma forma ainda mais aprofundada, segundo Isbert (1998), a inteligibilidade do discurso trata-se da correta percepção das consoantes de uma mensagem oral.

De acordo com estudos, como Amorim (2007); Brandão (2016) e Gomes; Bertoli (2005), a inteligibilidade da fala depende de diversos parâmetros, como: Nível de Pressão Sonora, Tempo de Reverberação, Relação Sinal-Ruído, Tempo de Decaimento Inicial, Índice de Transmissão da Fala, Definição, Porcentagem de Perda na Articulação de Consoantes, Nível Crítico e Nível de Interferência na Fala.

Segundo De Souza (2019), a Inteligibilidade da fala se baseia na medição da razão das principais componentes de modulação (0,63 Hz a 12,5 Hz) dos sinais enviado e recebido em uma sala. Assim, as frequências de banda de oitava de 125 Hz a 8 kHz são os sinais de teste para as modulações, totalizando 7 sinais modulados por 14 frequências de modulações, conforme norma IEC 60268416.

A inteligibilidade pode variar de 0 a 1, com a qualidade de ruim a excelente, respectivamente, conforme Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Classificação do STI

Valor	Classificação de qualidade de acordo com IEC 60268-16
0 - 0.3	Péssimo
0.3 - 0.45	Ruim
0.45 - 0.6	Razoável
0.6 - 0.75	Bom
0.75 - 1	Excelente

### 3.1.2 Reflexão sonora e Absorção sonora

A reflexão sonora é definida por Silva Junior e Miltão (2015) como o fenômeno que expressa a propriedade que uma onda sonora tem de ser refletida, quando incide sobre uma superfície cujas dimensões forem maiores do que comprimento da onda sonora, ou seja, a onda incidente muda de direção, retornando à região original forma de uma onda refletida. Nesse fenômeno a frequência, o comprimento de onda e a velocidade de propagação não se alteram. Pertinentemente, Carvalho (2006) salienta que materiais refletores têm, normalmente, baixa porosidade e uma densidade superficial mais alta.

Quando uma onda sonora encontra um obstáculo, a energia sonora incidente fica subdividida em duas partes, uma é refletida a outra é absorvida pela superfície. Bistafa (2006) descreve que quando há absorção do som pela superfície, a intensidade sonora absorvida degrada-se em calor no meio material que compõe a superfície.

Carvalho (2006) acrescenta que o material ao reter grande quantidade de ondas sonoras transformando-as em energia térmica, diz-se que esse material apresenta boa absorção acústica. E quando ele reflete grande parte da energia sonora, diz-se que o material é um bom isolante acústico. Portanto, “bons absorventes, em geral, são péssimos isolantes, e vice-versa” (PASSERI JR, 2005).

O controle do ruído em um ambiente é realizado através da capacidade de absorção sonora dos materiais que o revestem. Essa capacidade é indicada pelas perdas de energia sonora do material e depende de algumas de suas propriedades físicas como sua estrutura, sua densidade, entre outros (GERGES, 2000).

Segundo Costa (2003), quando o som encontra uma barreira, a energia da onda sonora incidente ( $E_i$ ) se divide em algumas parcelas como mostra a Figura 3.1. Ao entrar em contato com um obstáculo, parte da energia incidente é refletida ( $E_r$ ) e retorna ao ambiente, outra parte fica retida no material e a esta dá-se o nome de energia absorvida ( $E_a$ ), o restante da energia que atravessa o material é chamada de energia transmitida e denota-se por ( $E_t$ ), dessa forma tem-se a Equação 3.1:

$$E_i = E_r + E_a + E_t \quad 3.1$$

Os coeficientes de reflexão, absorção e transmissão são definidos através da Equação 3.1. Dividindo a equação por  $E_i$  obtém-se a Equação 3.2:

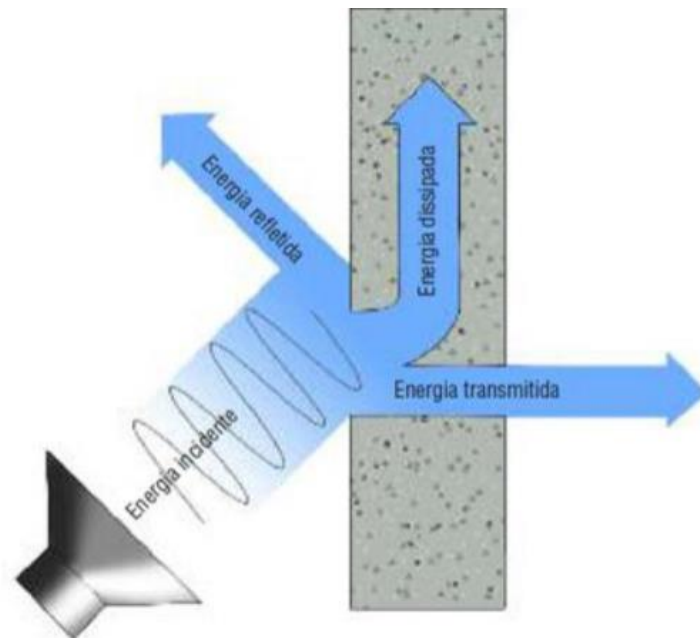
$$1 = \frac{E_r}{E_i} + \frac{E_a}{E_i} + \frac{E_t}{E_i} \quad 3.2$$

Finalmente é encontrado a Equação 3.3:

$$r + \alpha + \tau = 1 \quad 3.3$$

onde:  $r$  é o coeficiente de reflexão,  $\alpha$  é o coeficiente de absorção do material e  $\tau$  é o coeficiente de transmissão sonora.

Figura 3.1 – Parcelas de energia sonora.



Fonte: Souza (2016) (Adaptado).

A partir da Equação 3.3, e desconsiderando a parcela de energia transmitida, nota-se que a reflexão e a absorção são complementares, ou seja, na medida em que uma diminui a outra aumenta, por esse motivo utiliza-se apenas o coeficiente de absorção para expressar as propriedades absorventes do material, ele pode variar entre  $0 < \alpha < 1$ , e quanto mais próximo a 1 mais absorvente será o material. O coeficiente de absorção depende de vários fatores que serão explanados nas próximas seções.

Um ambiente que contenha paredes com muita reflexão sonora, sem um projeto acústico aperfeiçoado, terá uma péssima inteligibilidade da linguagem. É o que acontece, geralmente, com grandes igrejas, salões de clubes, etc., salienta Fernandes (2002).

### 3.1.3 Resposta ao impulso

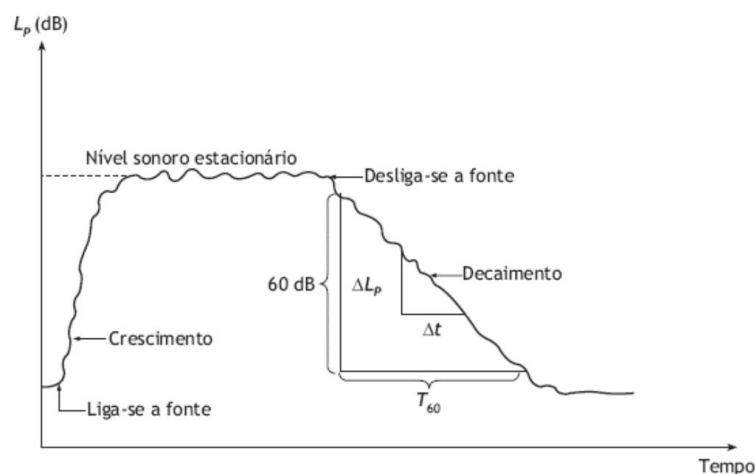
Segundo Shin e Hammond (2008), a resposta ao impulso de um sistema é a forma com que esse sistema responde a um estímulo impulsivo do tipo delta de Dirac (função impulso). Caso o sistema seja linear, é possível, conhecendo-se sua resposta ao impulso, saber como esse sistema responde a um estímulo arbitrário. A resposta a esse estímulo será obtida através da convolução da resposta ao impulso do sistema com o estímulo aplicado. Romeiro (2011), acrescenta que a Resposta Impulsiva é um elemento fundamental para caracterizar um espaço acústico.

Diversos métodos para obtenção da resposta impulsiva de salas já foram desenvolvidos e eles se diferem, essencialmente, pelo tipo de sinais utilizados para excitação da sala e pela forma como o sinal de resposta é processado (FIGUEIREDO, 2005). Atualmente, as técnicas mais conhecidas são a excitação por impulsos (pistola de alarme ou pulso gerado eletronicamente e emitido por um sistema amplificação sonora), estática por sinusóides (*stepped tone*, *multitone*), por sequência aleatória de impulsos (MLS), por um sinal “*sweep*” em que a frequência varia de forma linear ao longo do tempo (TDS) e por sinais “*sweep*” em que a frequência tem uma variação exponencial ao longo do tempo (ESS) (PEREIRA, 2010).

### 3.1.4 Tempo de Reverberação (TR)

O tempo de reverberação é o mais importante parâmetro acústico na determinação da qualidade acústica de salas (BISTAFA, 2011). É, por definição, o tempo gasto para o nível de intensidade de um som reduzir 60 decibels depois da fonte sonora ser interrompida. A Figura 3.2 ilustra o decaimento do nível sonoro com o tempo, possibilitando estimar o tempo de reverberação.

Figura 3.2 – Decaimento do tempo de reverberação.



Fonte: Bistafa (2011).

Uma fonte sonora em funcionamento, emitindo ondas sonoras que se propagam num compartimento, quando é subitamente desligada, decorre um determinado período de tempo antes que a energia sonora seja praticamente absorvida na sua totalidade pelas superfícies desse compartimento. Para muitas aplicações, a duração deste período de tempo é importante para uma utilização eficaz do espaço (BARRON, 2003).

Segundo Everest (2009), o tempo de reverberação é considerado um dos vários parâmetros acústicos mais importante e mensurável na caracterização e avaliação da qualidade acústica de uma sala. Pereira (2010), acrescenta que embora atualmente sejam utilizadas outras grandezas igualmente importantes na determinação da qualidade acústica de salas, a medição do tempo de reverberação é uma tarefa fundamental, pois este, num espaço real, pode estar fortemente relacionado com as restantes características e influenciar como um todo as condições acústicas da sala.

A reverberação natural em um recinto é produzida pelas reflexões de sons em superfícies que dispersam o som, enriquecendo-o por meio da sobreposição de suas reflexões. A quantidade e a qualidade da reverberação que ocorre em um ambiente natural são influenciadas por diversos fatores: o volume e as dimensões do espaço, o tipo de material que compõe o ambiente, a forma e o número de superfícies com que o som se encontra (ALCANTARA, 2010).

Para o cálculo do TR, a equação de Sabine, Equação 3.4, é a mais utilizada atualmente, pois além de definir o tempo de reverberação conceitualmente foi a pioneira na definição matemática do tempo de reverberação.

$$TR = \frac{0,16 \cdot V}{\sum_{i=1}^n S_i \cdot \alpha_i} \quad 3.4$$

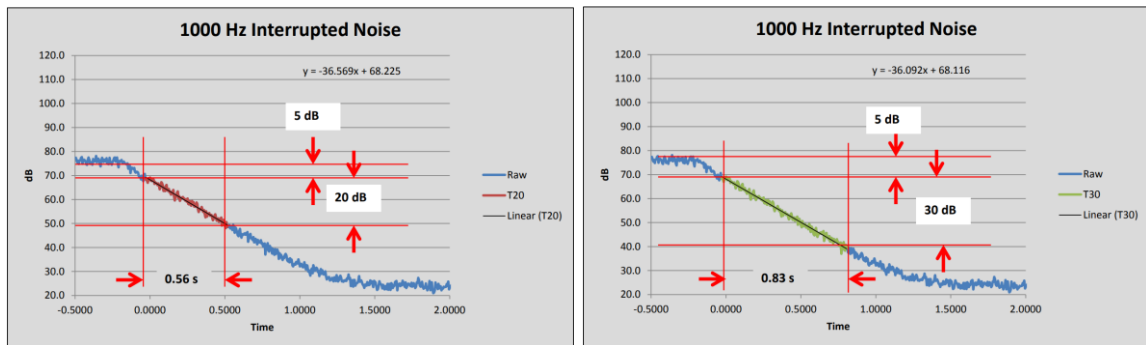
onde:

- V: Volume da sala (m<sup>3</sup>);
- S<sub>i</sub>: Área da i-ésima superfície da sala (m<sup>2</sup>);
- α: Coeficiente de absorção da i-ésima superfície da sala;

Nesta equação é possível observar que o volume da sala (V) está no numerador da equação enquanto a área de absorção sonora, produto da área pela absorção sonora, da sala está no denominador. Isto nos leva a várias conclusões, entre elas que o aumento do volume gera um aumento do tempo de reverberação, ou seja, locais grandes e com muito volume possuem tempos de reverberação tipicamente maiores, e um aumento da área absorvente dentro do ambiente leva a uma diminuição do tempo de reverberação. O que faz todo o sentido já que a tática mais comum em projetos acústicos é a de adicionar material absorvedor dentro de uma sala de modo a diminuir o tempo de reverberação do ambiente.

Pela dificuldade de se obter uma faixa de 60 dB de decaimento do som, pode se usar uma faixa dinâmica menor, 20 ou 30 dB, calculando assim os termos T20 e T30 respectivamente, sendo ambos equivalentes ao T60. Destaca-se que para equivalência ao T60, o T20 é multiplicado por 3, enquanto o T30 é multiplicado por 2. Na Figura 3.3 tem-se ilustrado o T20 e T30.

Figura 3.3 – T20 (esquerda) e T30 (direita).

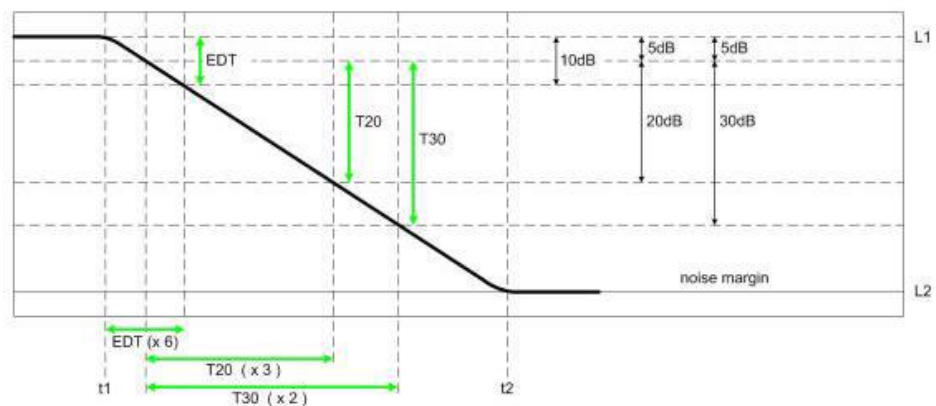


Fonte: Larson Davis (2021).

Uma vez que o objetivo é encontrar a parte principal da resposta ao impulso responsável pelo T60 iniciando-se as medidas após o decaimento de 5 dB na faixa conhecida como cauda reverberante, desconsiderando assim as primeiras reflexões. Para T20, um intervalo de 20 dB é usado e para T30, um intervalo de 30 dB. Os descritores T20 e T30 são geralmente chamados de “tempos de reverberação tardia”, pois medem na parte posterior da curva.

Similarmente ao TR, o tempo de decaimento inicial (EDT) se relaciona diretamente com a curva de decaimento. A diferença básica entre esses parâmetros é que o EDT considera os primeiros 10 dB de decaimento da curva (de 0 dB a -10 dB). O EDT é chamado de “reverberação inicial” e considera-se que reflete melhor como percebemos a reverberação na sala. Ao medir o EDT, um intervalo de 10 dB é usado, sendo que para equivalência ao T60 o EDT é multiplicado por 6. A Figura 3.4 exemplifica este conceito.

Figura 3.4 – Tempo de Decaimento Inicial (EDT).



Fonte: AV Info (1995).

Apesar de parecidos, o EDT expressa melhor a percepção do receptor ao tempo de reverberação da sala enquanto o T20, T30 e T60 são mais relacionados à quantidade de material absorvente do local (JARUSZEWSKA et al., 2015). Por ser medido logo nos primeiros instantes do decaimento da pressão sonora, o EDT torna-se um parâmetro bastante sensível às variações do campo difuso e a situações de grande ruído de fundo sendo, então, preferido na determinação da reverberação de ambientes com público presente.

Por fim, expressa-se que o valor obtido para o EDT é influenciado pela distribuição temporal das reflexões iniciais. Essa distribuição é fortemente dependente da posição que se encontra o receptor e a fonte e, por isso, é comum obter valores diferentes para o EDT ao longo da sala (DUNN et al., 2015).

### 3.1.5 Razão de Baixos ou *BassRatio* (BR)

A Razão de Baixos ou *BassRatio* (BR) é um parâmetro subjetivo relacionado à percepção do tempo de reverberação nas baixas frequências, abaixo de 250 Hz. Pode ser definido ainda como vivacidade dos graves ou reforço de graves. Segundo Beranek (1996), um TR nas baixas frequências muito longo ou muito curto comparado com um TR nas médias frequências pode afetar consideravelmente a percepção dos músicos. O parâmetro subjetivo BR pode ser avaliado através do parâmetro objetivo razão de graves (BR), conforme a Equação 3.5.

$$BR = \frac{T_{125 \text{ Hz}} + T_{250 \text{ Hz}}}{T_{500 \text{ Hz}} + T_{1000 \text{ Hz}}} \quad 3.5$$

Sendo que:

- $T_{125 \text{ Hz}}$ : Tempo de reverberação na banda de 125 Hz;
- $T_{250 \text{ Hz}}$ : Tempo de reverberação na banda de 250 Hz;
- $T_{500 \text{ Hz}}$ : Tempo de reverberação na banda de 500 Hz;
- $T_{1000 \text{ Hz}}$ : Tempo de reverberação na banda de 1000 Hz.

Beranek (1996) conceitua um critério de mérito para BR associado a valores médios, conforme apresentado na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Critério de mérito para BR.

<b>Categoria</b>	<b>BR</b>
Excelente	1,21
Boa	1,05
Regular	0,96
Pobre	0,88

Fonte: Figueiredo (2005).

### 3.1.6 Brilho (Br)

Um som claro, vibrante e rico em harmônicos, é chamado brilhante (AHNERT; SCHIMITD, 2005). O som brilhante de uma sala deriva da proeminência dos harmônicos superiores e do baixo decaimento para estas frequências, em outras palavras, as médias frequências são mais acentuadas e decaem vagarosamente, ou seja, trata-se de um parâmetro afetado pelo intervalo entre a chegada do som direto e as primeiras reflexões. Também está relacionado com a rapidez da chegada da porção significativa da energia nas primeiras frações de segundo (Clareza).

Jordan (1970) ainda descreve que esse parâmetro avalia a percepção dos sons agudos e a relação com a percepção das médias frequências. É medido pela razão entre a soma dos tempos de reverberação nas bandas de oitava de 2000 Hz e 4000 Hz e pela soma dos tempos de reverberação nas bandas de oitava de 500 Hz e 1000 Hz, conforme a Equação 3.6:

$$Br = \frac{T_{2000\text{ Hz}} + T_{4000\text{ Hz}}}{T_{500\text{ Hz}} + T_{1000\text{ Hz}}} \quad 3.6$$

Sendo que:

- $T_{500\text{ Hz}}$ : Tempo de reverberação na banda de 500 Hz;

- $T_{1000\text{ Hz}}$ : Tempo de reverberação na banda de 1000 Hz;
- $T_{2000\text{ Hz}}$ : Tempo de reverberação na banda de 2000 Hz;
- $T_{4000\text{ Hz}}$ : Tempo de reverberação na banda de 4000 Hz.

Quanto maior o brilho da sala, mais cristalino é o som, entretanto pode-se ter um brilho excessivo que pode ser incômodo para alguns. Um som intenso em alta frequência, claro e rico em harmônicos é denominado brilhante. Um som brilhante é indicado para música de órgão, mas totalmente inadaptada à compreensão da palavra. Uma sala com brilho, o amortecimento nas altas frequências deve-se quase que exclusivamente à absorção natural do ar. Beranek (1996) afirma que, para preservar o brilho em uma sala, o Br não pode estar abaixo de 0,70.

### 3.1.7 Clareza (C80 ou C50) e Definição (D50)

A Clareza (ou Claridade) é uma razão logarítmica entre a taxa de energia inicial e a taxa de energia do sinal restante, podendo ser expressa pelos descritores C50 e o C80, sendo que a diferença entre eles é justamente o tempo considerado para a separação destas duas partes da Resposta ao Impulso da Sala (RIS). No primeiro, é considerado o intervalo de 0 até 50 ms como sendo o som inicial e, no outro, esse limite é dado pelo tempo de 80 ms (BRANDAO, 2016). Acrescenta ainda Kuttruff (2000), o valor maior para o limite de tempo do C80 se deve ao fato de uma reflexão sonora ser menos perceptível para música do que para a fala.

A norma ISO3382-2:2008 utiliza a Clareza para poder caracterizar a qualidade acústica de salas destinadas à prática musical e para a fala e assim, este parâmetro é melhor aplicado pelos descritores C80 e C50 respectivamente, os quais podem ser calculados a partir das Equações 3.7 e 3.8.

$$C80 = 10 * \log \left( \frac{\int_0^{80ms} h^2(t) dt}{\int_{80ms}^{\infty} h^2(t) dt} \right) dB \quad 3.7$$

$$C50 = 10 * \log \left( \frac{\int_0^{50ms} h^2(t) dt}{\int_{50ms}^{\infty} h^2(t) dt} \right) dB \quad 3.8$$

Sendo que:

- $h(t)$  é a resposta impulsiva da sala em um determinado ponto.

A Definição é uma razão linear entre a energia do som inicial e a energia do som total e, assim como a Clareza, pode ser calculada considerando os tempos de 50 ms ( $D50$ ) e de 80 ms ( $D80$ ) de acordo com as Equações 3.9 e 3.10 (BRANDAO, 2016).

$$D50 = \frac{\int_0^{50ms} h^2(t) dt}{\int_{0ms}^{\infty} h^2(t) dt} \quad 3.9$$

$$D80 = \frac{\int_0^{80ms} h^2(t) dt}{\int_{0ms}^{\infty} h^2(t) dt} \quad 3.10$$

É possível notar uma relação entre os parâmetros de Clareza e Definição, a qual está expressa nas Equações 3.11 e 3.12 (ISO3382-2:2008):

$$C50 = 10 * \log \left( \frac{D50}{1 - D50} \right) dB \quad 3.11$$

$$C80 = 10 * \log \left( \frac{D80}{1 - D80} \right) dB \quad 3.12$$

Com relação à Equação 3.11, a norma ISO 3382-2 (ISO, 2008) informa que não é necessário medir estes dois descritores simultaneamente.

Para Beranek (1996), quando um músico fala em Definição ou Clareza, está referindo quanto ao grau de distinção entre um som e outro em uma performance musical. O valor da Definição está compreendido entre 0 e 100% e quanto maior for o valor de Definição, maior

será a capacidade do ouvinte em distinguir cada sílaba, sendo que acima de 50% já é considerado aceitável. Para a definição da Clareza em salas destinadas à palavra (C50), a energia sonora inicial é a contida no intervalo de tempo de 0 a 50 milissegundos. O C50 deve apresentar números positivos e maiores que zero.

Na Tabela 3.3, são apresentadas as relações categorizadas entre os descritores acústicos frente ao Índice de Transmissão da Fala. Estes resultados corroboram as conclusões obtidas no estudo de Nestoras e Dance (2013).

Tabela 3.3 – Relações entre C50 e D50 quanto à qualidade da fala.

<b>Categoria</b>	<b>C50 – dB *<sup>1</sup></b>	<b>D50 – % *<sup>2</sup></b>
Excelente	12 até 18	86 até 100
Bom	6 até 12	67 até 86
Regular	0 até 6	39 até 67
Pobre	-6 até 0	17 até 39
Ruim	-12 até -6	6 até 17

Fonte: Marshall (1994) \*<sup>1</sup>; Ansay; Zannin (2016) \*<sup>2</sup>

## 3.2 Metodologia de análise de dados

A técnica utilizada para a análise de resultados deste trabalho foi o Planejamento experimental fatorial. Esta análise, tem como objetivo verificar estatisticamente diversos fatores ligados ao posicionamento das PAS e a relação entre estes aspectos o desempenho acústico de um leiaute.

### 3.2.1 Análise variância (ANOVA)

A análise de variância avalia a igualdade das médias de diferentes níveis em que um fator é testado. Segundo Runger et al. (2009), a ANOVA trata de um teste de hipóteses onde a hipótese nula indica que as médias dos diferentes níveis ou tratamentos de um determinado

fator são iguais e a hipótese alternativa afirma que ao menos uma das médias analisadas é diferente das demais significativamente.

Grigolo et al. (2012) relata que, para uma boa utilização da ferramenta, é importante atentar para as suposições de normalidade, de independência e de que as populações apresentem variâncias iguais. Todavia, o autor conclui em seu trabalho que mesmo sendo violada alguma dessas condições, moderadamente, a ANOVA apresenta resultados satisfatórios por se tratar de um teste bastante robusto.

A ANOVA compreende um planejamento experimental de um fator. Um experimento planejado é um teste - ou uma série de testes - onde mudanças propositalmente são feitas em variáveis de entrada de um processo de modo a se observar mudanças correspondentes nas variáveis de saída. (MONTGOMERY, 2009).

Ainda segundo Montgomery (2009), experimentos fatoriais são utilizados quando se deseja tratar dois fatores simultaneamente para o conhecimento de níveis ótimos de operação de cada fator. Já quando existem vários fatores de interesse em um experimento, um planejamento fatorial se faz necessário. Nesse caso, todas as combinações possíveis dos níveis dos fatores estudados devem ser promovidas no experimento. O efeito de um fator é definido como a mudança no nível do fator.

Existem certos tipos especiais de planejamentos fatoriais. Bortolini (2012) aborda o planejamento fatorial  $2^k$ . Esse planejamento leva esse nome, pois trata de k fatores, cada um com dois níveis. Em seu estudo o autor conclui que este tipo de experimento é bastante interessante para a indústria uma vez que seu planejamento e sua análise são relativamente simples se comparado a experimentos com mais de dois níveis para cada fator.

Um teste F é qualquer teste estatístico no qual a estatística de teste tem uma distribuição F sob a hipótese nula. É usado com mais frequência ao comparar modelos estatísticos que foram ajustados a um conjunto de dados, a fim de identificar o modelo que melhor se ajusta à população da qual os dados foram amostrados. Os "testes F" exatos surgem principalmente quando os modelos foram ajustados aos dados usando mínimos quadrados.

O valor padrão de F de Snedecor ou  $F_{crítico}$ , comparado com o valor encontrado pela ANOVA leva em consideração o nível de confiança, o grau de liberdade associado a fonte de variação e o grau de liberdade associado ao erro. Por meio destes três aspectos, determina-se o valor de  $F_{crítico}$ . Vale ressaltar que se o valor de F encontrado pela ANOVA for maior que o  $F_{crítico}$ , o fator ou interação de fatores correspondentes exerce influência na variável resposta,

do contrário, o fator ou interação de fatores correspondente ao F obtido pela ANOVA que é menor que o  $F_{crítico}$  não tem significância no processo, não exercendo influência alguma sobre o mesmo do ponto de vista da otimização deste (ROSS, 1991). A partir desta definição, define-se o valor-p, estatística utilizada para sintetizar o resultado de um teste de hipóteses, cujos fatores/interações considerando significância de 95 % (valor-p menor que 0,05) causam efeitos significativos na variável resposta (MATTOS, 2004).

O p-valor determina a adequação de rejeitar a hipótese nula em um teste de hipótese. Os valores de p variam de 0 a 1. O valor de p é a probabilidade de se obter um teste estatístico que é pelo menos tão extremo quanto o valor calculado, se a hipótese nula é verdadeira. Antes de realizar quaisquer análises, determina-se o seu nível alfa ( $\alpha$ ). Um valor de nível utilizado é de 0,05. Se o p-valor de um teste estatístico é menor do que o seu nível, pode-se rejeitar a hipótese nula (*Minitab*® 19.2020.1). Em outras palavras, o p-valor está associado à um cálculo matemático que avalia a probabilidade estatística dos valores estarem dentro ou fora do intervalo de confiança adotado, que normalmente é de 95%. O valor do F avalia a relação entre as variâncias da resposta em relação ao fator de estudo. Trata-se de um cálculo estatístico que, por sua vez, está relacionado ao intervalo de confiança. Na ANOVA, os fatores p-valor e F precisam convergir da seguinte forma: p-valor “baixo” e F “alto”.

### 3.2.2 Planejamento de experimentos (DOE)

Também conhecido como Delineamento de Experimentos (*Design of Experiment - DOE*), é uma metodologia estatística utilizada como uma sistemática de resolução de problemas para a melhoria da qualidade e desempenho do processo, mostrando-se também muito importante no meio industrial. A essência de um DOE está na descoberta de variáveis que influenciam as características da qualidade em um processo, partindo da alteração das variáveis de entrada do mesmo e verificando seus efeitos na (s) variável (eis) de saída (MONTGOMERY, 2009).

Segundo Montgomery (2016), o planejamento diminui o tempo e otimiza a pesquisa, reduzindo a utilização de recursos e trazendo um resultado confiável (com cerca de 95% de confiança), de tal forma que a tomada de decisão por parte dos empresários torna-se mais assertiva e possibilita obter melhor resposta aos problemas enfrentados na disputa de mercado.

Os Planejamentos de Experimentos, embora muito úteis, são frequentemente esquecidos em aplicações de serviços (GEORGE, 2004). Pressupõe-se que na atual economia competitiva a utilização de uma ferramenta para tomada de decisão empresarial, por meio de procedimentos estatísticos, pode tornar-se uma importante solução de apoio para a gestão estratégica das empresas.

Um experimento planejado é um teste, ou uma série de testes, nos quais fatores de entrada são variados para compreender seu impacto sobre variáveis de saída (MONTGOMERY, 2016). Num ambiente de serviços, as respostas dos processos podem ser receita, retorno sobre o capital investido, tempo de ciclo, satisfação de clientes (GEORGE, 2004).

Souza (2005) descreve algumas vantagens para quem faz planejamento experimental, como: estudo de um número considerável de fatores, detecção das interações entre os fatores, definição dos níveis ótimos, melhoria e precisão de resultados e otimização dos resultados.

A técnica utilizada é baseada nas considerações racionais e relacionada com regras estatísticas e algébricas, as quais consideram que um número ( $n$ ) de fatores pode influenciar a variabilidade nos resultados ( $y$ ) dos processos, e todos estes fatores não são inevitavelmente identificados. Deve-se escolher um número de fatores controlados no experimento, e a procura dos fatores influentes consiste originalmente em fixar somente dois valores para cada fator e estes valores serão denominados níveis e ainda, estudar o maior número possível de fatores, mesmo aqueles que não parecem ser muito importantes (MONTGOMERY, 2016).

Os fatores devem ser detectados e estudados, para obter a melhor solução e para extrair um máximo de informações úteis com um mínimo de ensaios. Segundo George (2004), originalmente, o Planejamento de Experimentos é uma ferramenta para otimização de experimentos e refinamento de processos, baseada em conceitos estatísticos. Assim, esta ferramenta apoia eficazmente a tomada de decisão com relação à melhoria da qualidade de processos.

A identificação de variáveis independentes ou de entradas e variáveis dependentes ou de saídas, fundamentadas pelo conceito algébrico:  $y = f(x)$ , onde  $y$  é função de  $x$ , é importante para alinhar o modelo de gestão com os sistemas empresariais. Segundo Pande, Neuman e Cavanagh (2003), conceitos de álgebra, onde  $y$  é uma função de  $x$  descrevem um modelo de *loop* fechado, que consiste de sistemas para direcionar e manter as organizações no caminho do

sucesso empresarial, pois busca alinhar seus resultados aos objetivos definidos no planejamento estratégico.

## 4 METODOLOGIA

O estudo experimental deste trabalho consiste no método para medição dos parâmetros acústicos de um ambiente fechado e deve ser norteado pela NBR 3382-2, que versa sobre a medição de parâmetros de acústica de salas. Ela descreve sobre o número de medições, número de posições de microfone e fonte sonora, bem como incertezas relacionadas ao método de medição. Ainda são apresentadas duas formas de excitação da sala, método da resposta impulsiva e método do ruído interrompido.

Por sua vez, o experimento para avaliar a disposição dos materiais de absorção sonora deve ser conduzido pelo planejamento fatorial completo geral (MONTGOMERY, 2018), comparando os resultados com as aferições feitas em um medidor de pressão sonora.

Por fim, a análise dos resultados deve ser baseada na técnica de análise de variância (MONTGOMERY, 2018), cuja, estatisticamente, permite inferir se dois ou mais tipos de leiautes realmente apresentam diferença significativas.

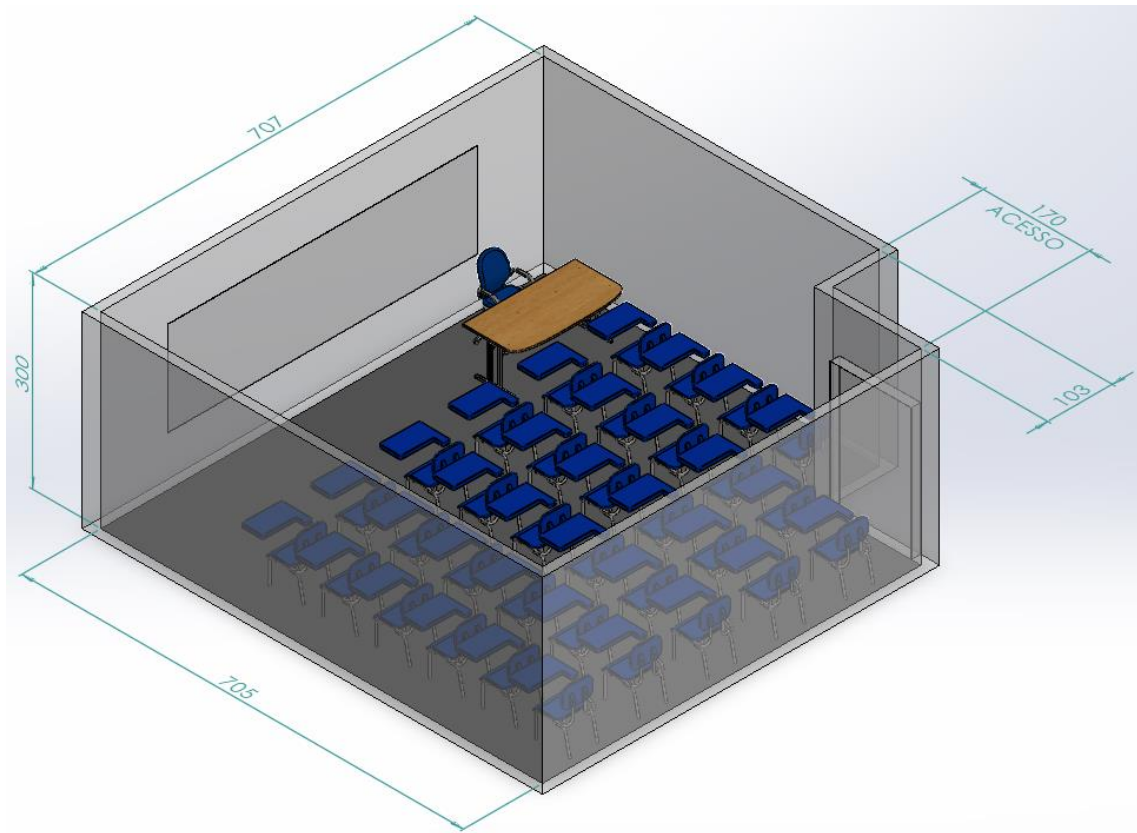
### 4.1 Especificações do ambiente

Diante do exposto, para realizar os experimentos com diferentes leiautes a serem estudados utilizou-se se a Sala 108 que se encontra no prédio B.5 da Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC), campus II da UFG. É importante frisar que o ambiente é uma sala de aula típica da universidade, que dispõe de todo mobiliário escolar padrão, apresentados na Tabela 4.1. A Figura 4.1 apresenta o leiaute da sala e suas dimensões em centímetros

Tabela 4.1 – Descrição da sala

<b>Características</b>	
<b>Localização:</b>	Prédio B.5 da Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação, campus II da UFG - Goiânia, GO
<b>Sala:</b>	108
<b>Paredes:</b>	Alvenaria
<b>Piso:</b>	Concreto polido
<b>Teto:</b>	Forro de gesso
<b>Dimensão:</b>	7,05 m X 7,07 m
<b>Altura:</b>	3,00 m
<b>Geometria:</b>	Quadrada com ressalto na entrada da porta
<b>Porta:</b>	Madeira de dimensão 1,30 m X 2,10 m
<b>Janelas:</b>	Esquadilha de alumínio, sem película, com dimensão total de 6,00 m X 1,40 m
<b>Mobiliário</b>	
<b>Cadeiras:</b>	36 cadeiras universitárias plásticas com prancheta em MDF 1 cadeira acolchoada
<b>Mesa:</b>	1 mesa de madeira
<b>Ar-condicionado:</b>	2 evaporadoras cassete
<b>Lousa:</b>	1 lousa de vidro branca, com dimensão de 5,00 m x 1,50 m
<b>Luminárias:</b>	9 luminárias de LED
<b>Outros:</b>	1 projetor

Figura 4.1 – Dimensões em cm da Sala 108 presente no prédio da Engenharia Mecânica - EMC/UFG.



## 4.2 Cadeia de instrumentação

Para a realização dos experimentos, foram utilizados os equipamentos apresentados na Figura 4.2 e relacionados abaixo:

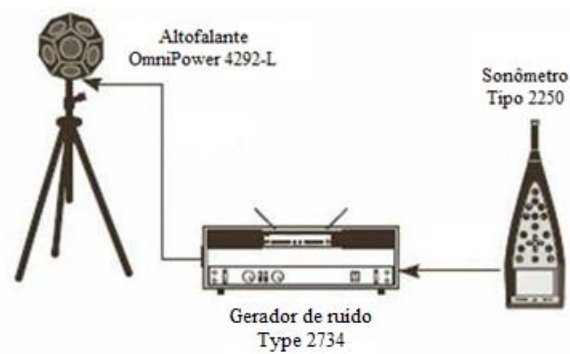
- Alto-falante omnidirecional dodecaedro *OmniPower 4292-L* da marca *Brüel & Kjær*;
- Medidor de pressão sonora tipo 2250 (calibrado no dia 10/03/2022 por laboratório acreditado pelo Inmetro) da marca *Brüel & Kjær*;
- Gerador de ruído *Brüel & Kjær* modelo *Type 2734* da marca *Brüel & Kjær*;

Figura 4.2 – Equipamentos utilizados.



O esquema de ligação é apresentado na Figura 4.3 a seguir.

Figura 4.3 – Esquema de ligação dos equipamentos utilizados no ensaio.



Fonte: *Briuel & Kjaer* (Adaptado) (2022).

As PAS são compostas por uma espuma de 50 mm de espessura fixadas a uma chapa de 3 mm espessura. Para sua confecção, uma chapa inteira de MDF cru foi recortada utilizando um arco de serra em 8 (oito) chapas com dimensão de 1,85 m de altura e 1,00 m de largura. Em seguida, utilizou as chapas recortadas como molde para o recorte das espumas. Após isso, utilizou uma fita dupla face para fazer a fixação da espuma acústica na chapa de MDF. A espessura da PAS é apresentada na Figura 4.4.

Figura 4.4 – Dimensão da espuma acústica e da chapa de MDF cru.



A espuma acústica foi adquirida da JC Decor (MG), possui uma densidade D28 e é composta em Poliuretano. A

Figura 4.5 ilustra a espuma conforme especificação do fabricante.

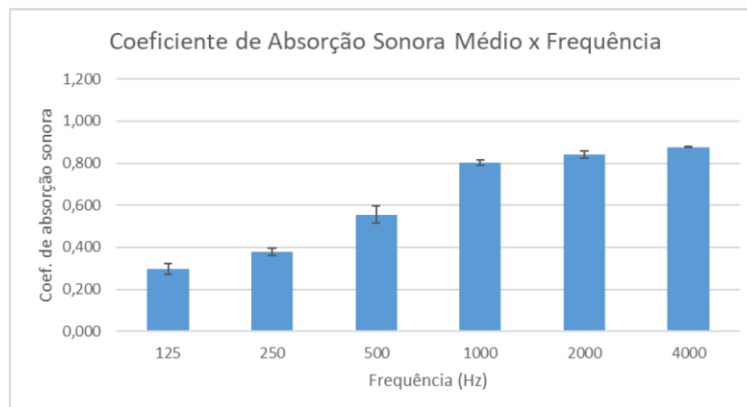
Figura 4.5 – Espuma acústica caixa de ovo - 1,90 x 1 m.



Fonte: JC Decor (2022)

As especificações acústicas da espuma (como o coeficiente de absorção sonora e o material) não foram fornecidas pelo revendedor, entretanto Barbosa (2021) utilizou a espuma em seu trabalho para aprofundar os estudos nos métodos possíveis de serem utilizados para obtenção do coeficiente de absorção sonora, comparando entre 3 métodos de obtenção do coeficiente de absorção sonora e obtendo o coeficiente de absorção sonora da espuma de poliuretano densidade D28 através do melhor método proposto por ele (Tubo de impedância tomando como base a norma ISO 10534-2:1998), apresentado na Figura 4.6.

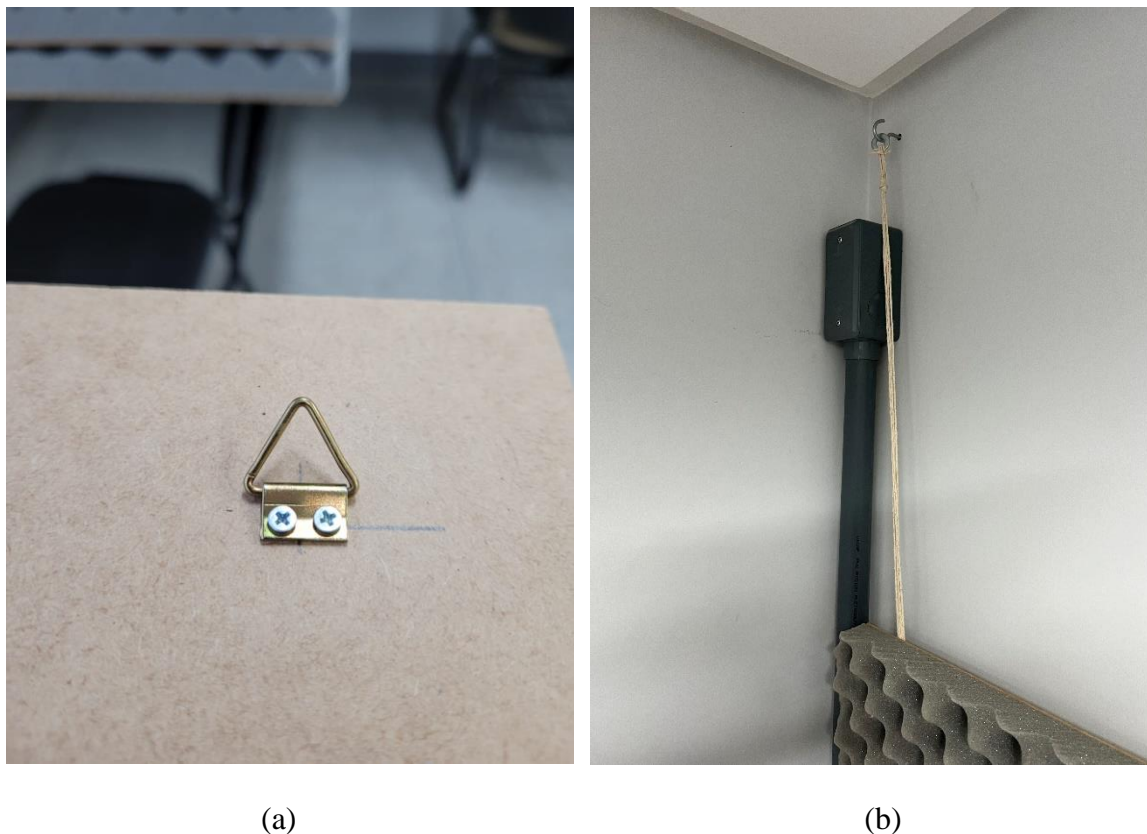
Figura 4.6– Coeficiente de absorção acústica medido para a espuma por Barbosa (2021).



Fonte: Barbosa (2021).

O posicionamento das PAS nas paredes foi feito através da ligação entre um barbante preso em uma ponta ao suporte colocado no MDF da placa (Figura 4.7a) e na outra ponta existe uma arruela que se prende ao o gancho fixado na parede (Figura 4.7b).

Figura 4.7 – Posicionamento da PAS na parede. a) Suporte na placa de MDF. b) Gancho preso na parede.



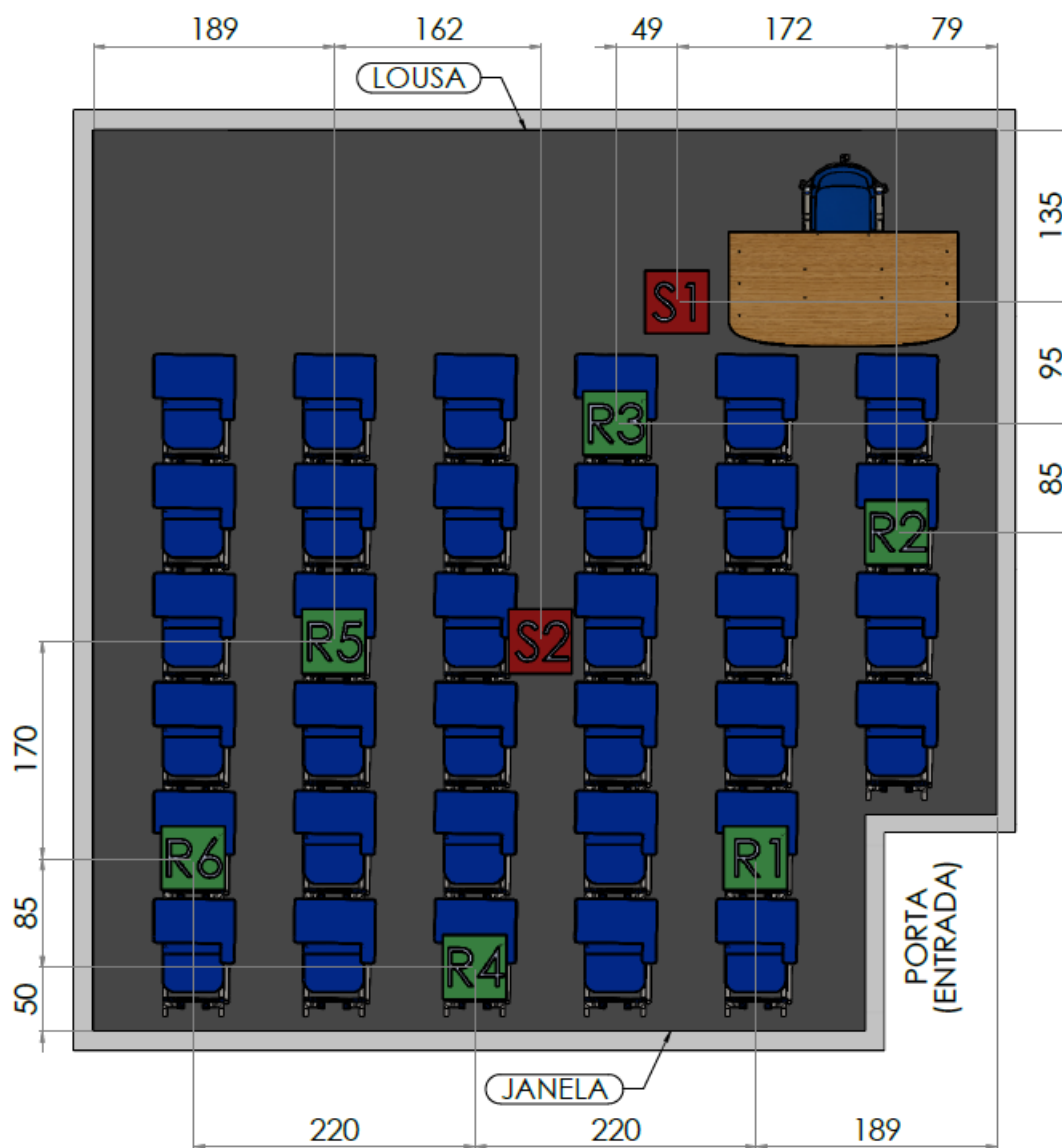
O tempo médio gasto para a medição em cada leiaute foi de 15 minutos, contado a partir da montagem do leiaute até a medição no ultimo ponto. Reforça o cuidado necessário na manipulação das PAS, uma vez que são placas compostas por espumas que danificam facilmente e possuem grandes dimensões, trazendo assim certa complexidade em sua fixação nas paredes.

### 4.3 Determinação dos parâmetros

Baseado na ISO 3382-2 foram selecionados 2 pontos distintos para a fonte e 6 pontos para o receptor, sendo os posicionamentos determinados aleatoriamente. Na Figura 4.8 está o mapa desses pontos, onde, S1 e S2 o posicionamento da fonte, e R1, R2, R3, R4, R5 e R6 o posicionamento do receptor. Para cada posição combinada de fonte e receptor foram realizadas

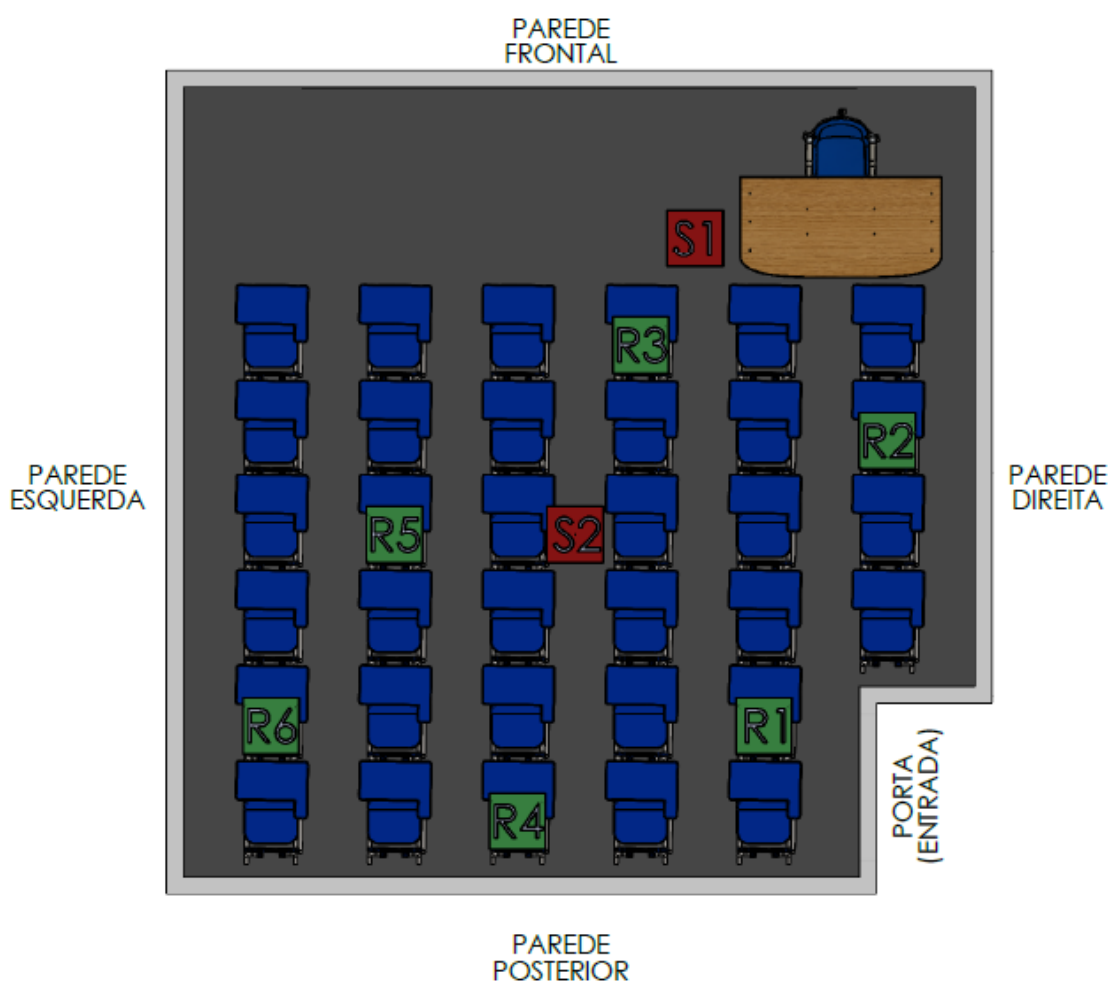
três réplicas. Os ensaios foram aleatorizados a fim de equilibrar o efeito de condições estranhas ou incontrolláveis que podem afetar os resultados de um experimento. Portanto, para cada leiaute foram realizadas 36 medições. Destaca-se que apesar da escolha aleatória da posição da fonte e do receptor, foi feita uma marcação nas cadeiras para auxiliar nas réplicas do ensaio e que as posições da fonte foram similares ao posicionamento típico de um professor na sala de aula.

Figura 4.8 – Posicionamento da fonte e do receptor. Dimensões em cm.



Destaca-se ainda que, as superfícies das paredes foram nomeadas seguindo o ponto de vista da porta, sendo parede esquerda, direita, posterior e frontal (Ver Figura 4.9).

Figura 4.9 – Representação das paredes.



A fonte de ruído omnidirecional foi programada para gerar ruído rosa a 100 dB de pressão sonora a 1 metro. O sonômetro possui um módulo de “Tempo de Reverberação” que permitiu obter os parâmetros T20, T30, EDT e através deles calcular os parâmetros apresentados, como Brilho (Br), a Razão de Baixos (BR), a Clareza (C50) e a Definição (D50). Destaca-se, que nos pontos de medição, receptor, foi configurado para apresentar as respostas obtidas em bandas de 1/1 oitava nas frequências centrais de 125, 250, 500, 1000, 2000 e 4000 Hz.

O planejamento do experimento foi realizado utilizando o programa computacional estatístico Minitab®, bem como a análise do experimento. A Tabela 4.2 expõe as informações dos fatores.

Tabela 4.2 – Informações dos fatores

Informações dos Fatores		
Fator	Níveis	Valores
Configuração	15	ABCD; ABCE; ABCF; ABDE; ABDF; ABEF; ACDE; ACDF; ACEF; ADEF; BCDE; BCDF; BCEF; BDEF; CDEF
Fonte	2	1; 2
Receptor	6	1; 2; 3; 4; 5; 6

Fonte: Extraído do Minitab®.

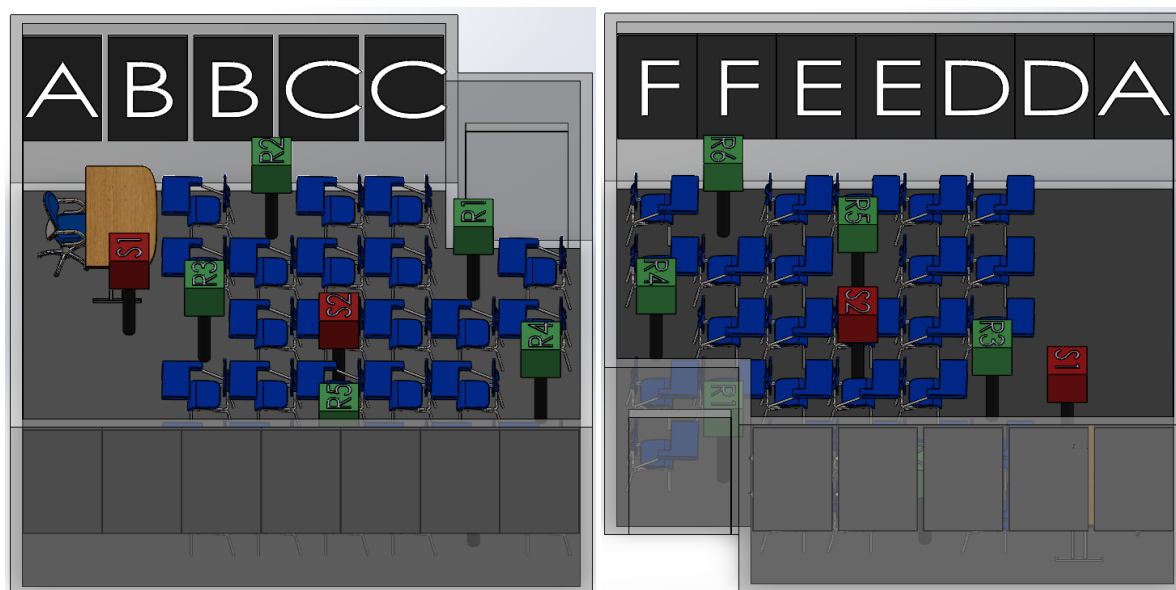
Expressa-se que os valores do fator configuração são explicados no próximo item. Enquanto, os valores da fonte 1 e 2 são as posições da fonte apresentadas na Figura 4.8, bem como os valores do receptor 1; 2; 3; 4; 5 e 6 também estão presentes na Figura 4.8.

## 4.4 Leiaute dos ensaios

Um dos fatores estudados é o fator configuração. Para este fator, definiu-se que seria necessário a variação do leiaute, fazendo com que as posições das PAS fossem alteradas, a fim de estudar essa variação.

Para a determinação do leiaute, segmentou-se as paredes laterais de forma que elas pudessem receber a maior quantidade possível de PAS. Com intuito de aumentar a área de absorção sem aumentar excessivamente a quantidade de variáveis, as PAS foram posicionadas em pares em cada posição. Desta forma, a parede direita possui as posições A, B e C, e a parede esquerda as posições A, D, E e F. A Figura 4.10 ilustra como foi essa divisão. Note que as posições B, C, D, E e F são apresentadas em pares na mesma parede, enquanto a posição do par A possui uma parte na parede direita e outra parte na parede esquerda.

Figura 4.10 – Representação das posições. a) Posições na parede direita da sala. b) Posições na parede esquerda da sala



(a)

(b)

A orientação das PAS foi padronizada verticalmente em relação à altura da sala, para que fosse possível colocar uma maior quantidade de PAS e assim aumentar a área de absorção sonora.

Uma vez que a posição e a orientação foram definidas, restou criar um planejamento no qual fizesse a combinação das posições através da quantidade de PAS que se tinha disponível (8 PAS). Assim, foram criadas 15 configurações (conforme apresentadas na Tabela 4.2) de leiaute a serem estudadas, totalizando em um experimento com 540 medições. No Apêndice A encontram-se várias fotos contendo as 15 configurações distintas com as PAS posicionadas.

## 4.5 Tratamento dos dados

Os dados coletados nos ensaios foram exportados em formato *.xlsx* e em seguida importados para o *software* Minitab®, onde foram realizadas a análise de variância (ANOVA) e análise do planejamento experimental (DOE).

Além disso, buscando fazer a análise através de outros parâmetros, por meio das Equações (Erro! Fonte de referência não encontrada.) a (Erro! Fonte de referência não

**encontrada.9)** utilizando o *software* de edição de planilhas eletrônicas Microsoft Excel®, calculou se o Brilho (Br), a Razão de Baixos (BR), a Clareza (C50) e a Definição (D50) dos dados dos ensaios.

Ao final, com o intuito de agrupar os dados obtidos e assim expor as respostas de forma mais clara, classificou-se as frequências conforme Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Classificação das frequências em banda de oitava.

<b>Classificação</b>	<b>Frequência (Hz)</b>
<b>Baixa</b>	125
	250
<b>Média</b>	500
	1000
<b>Alta</b>	2000
	4000

## **5 RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Nesta seção é apresentada uma análise técnica e crítica dos leiautes com base nas respostas obtidas para os parâmetros estudados (T20, T30, EDT, BR, Br, C50 e D50) para as frequências das bandas de 1/1 oitava centradas em 125, 250, 500, 1000, 2000 e 4000 Hz.

Mais detalhadamente, os resultados dessa dissertação buscam a partir da análise estatística (ANOVA), disponível no Apêndice B, caracterizar os leiautes de sala de aula que possuem melhores características acústicas, quantificar a variação do ambiente acústico e classificar os leiautes que estiverem dentro dos parâmetros acústicos ideais para sala de aula.

### **5.1 Tempo de Reverberação**

As Tabelas Tabela 5.1 a Tabela 5.3 apresentam os valores medidos para o tempo de reverberação (T20, T30 e EDT) de cada leiaute nas faixas de frequência em estudo. Os valores são referentes às médias espaciais das medições, ou seja, a média aritmética entre os valores obtidos para a interação das 2 posições de fonte e 6 posições de receptor. Sendo que, o melhor desempenho de uma configuração significa que ela possui o menor TR. Por outro lado, quanto maior o TR, pior será o desempenho.

Tabela 5.1 – Tempo de Reverberação Médio (T20).

Configuração	T20					
	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
ABCD	2,18	1,83	1,39	0,97	0,92	0,88
ABCE	2,23	1,83	1,33	0,93	0,90	0,85
ABCF	2,17	1,86	1,35	0,93	0,89	0,85
ABDE	2,18	1,80	1,34	0,97	0,91	0,87
ABDF	2,22	1,83	1,34	0,96	0,92	0,87
ABEF	2,14	1,86	1,32	0,94	0,90	0,85
ACDE	2,15	1,82	1,31	0,93	0,89	0,85
ACDF	2,10	1,82	1,30	0,91	0,87	0,84
ACEF	2,14	1,83	1,28	0,91	0,88	0,83
ADEF	2,11	1,77	1,36	0,93	0,87	0,85
BCDE	2,12	1,78	1,35	0,94	0,90	0,85
BCDF	2,15	1,80	1,32	0,93	0,88	0,85
BCEF	2,21	1,85	1,35	0,96	0,91	0,87
BDEF	2,09	1,73	1,35	0,94	0,87	0,85
CDEF	2,09	1,82	1,35	0,94	0,88	0,85
<b>Melhor desempenho</b>	BDEF	BDEF	ACEF	ACDF	ACDF	ACEF
<b>Pior desempenho</b>	ABCE	ABEF	ABCD	ABDE	ABCD	ABCD

Tabela 5.2 – Tempo de Reverberação Médio (T30).

Configuração	T30					
	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
ABCD	2,27	1,83	1,39	0,98	0,92	0,88
ABCE	2,25	1,89	1,35	0,95	0,89	0,86
ABCF	2,23	1,91	1,36	0,94	0,88	0,85
ABDE	2,30	1,83	1,34	0,97	0,91	0,87
ABDF	2,30	1,86	1,36	0,96	0,92	0,87
ABEF	2,20	1,86	1,35	0,95	0,89	0,85
ACDE	2,25	1,87	1,32	0,94	0,89	0,86
ACDF	2,20	1,88	1,31	0,91	0,87	0,84
ACEF	2,28	1,86	1,32	0,91	0,87	0,84
ADEF	2,23	1,77	1,35	0,95	0,87	0,85
BCDE	2,21	1,86	1,35	0,95	0,89	0,86
BCDF	2,26	1,85	1,33	0,93	0,88	0,85
BCEF	2,25	1,89	1,37	0,98	0,91	0,88
BDEF	2,21	1,82	1,36	0,94	0,87	0,85
CDEF	2,24	1,81	1,36	0,95	0,88	0,85
<b>Melhor desempenho</b>	ACDF	ADEF	ACDF	ACEF	ACDF	ACEF
<b>Pior desempenho</b>	ABDE	ABCF	ABCD	ABCD	ABCD	ABCD

Tabela 5.3 – Tempo de Reverberação Médio (EDT).

Configuração	EDT					
	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
ABCD	2,20	1,88	1,41	1,03	0,92	0,86
ABCE	2,32	1,80	1,34	0,97	0,92	0,84
ABCF	2,21	1,77	1,28	0,94	0,90	0,84
ABDE	2,15	1,85	1,34	1,02	0,92	0,85
ABDF	2,31	1,85	1,30	0,99	0,93	0,85
ABEF	2,17	1,88	1,33	0,96	0,90	0,83
ACDE	2,28	1,95	1,33	0,97	0,92	0,82
ACDF	2,23	1,94	1,32	0,92	0,89	0,84
ACEF	2,25	1,83	1,27	0,94	0,87	0,82
ADEF	2,24	1,77	1,33	0,93	0,89	0,82
BCDE	2,01	1,85	1,35	0,95	0,90	0,84
BCDF	2,31	1,86	1,30	0,93	0,90	0,83
BCEF	2,26	1,83	1,37	0,97	0,93	0,87
BDEF	2,27	1,85	1,35	0,96	0,87	0,82
CDEF	2,29	1,88	1,29	0,97	0,89	0,83
<b>Melhor desempenho</b>	BCDE	ADEF	ACEF	ACDF	ACEF	BDEF
<b>Pior desempenho</b>	ABCE	ACDE	ABCD	ABCD	ABDF	BCEF

O desvio padrão das medições está representado nas Figuras Figura 5.1 a Figura 5.3.

Figura 5.1 – Gráfico do Desvio Padrão para T20.

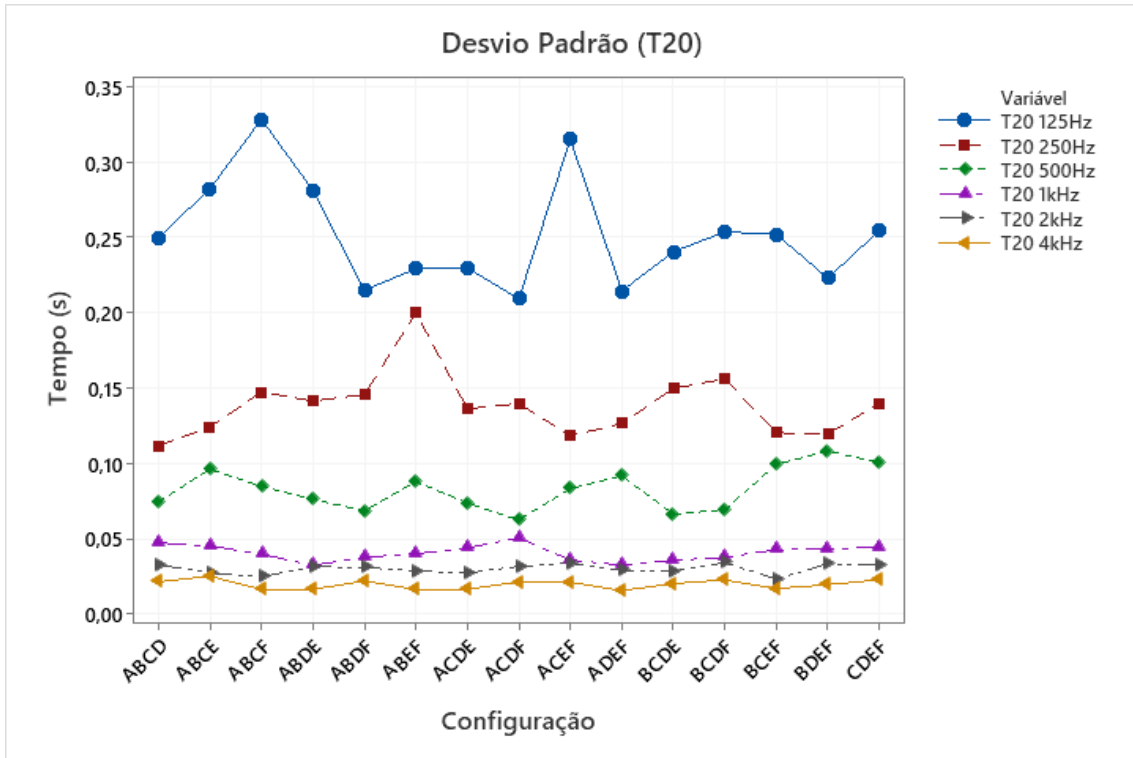


Figura 5.2 – Gráfico do Desvio Padrão para T30.

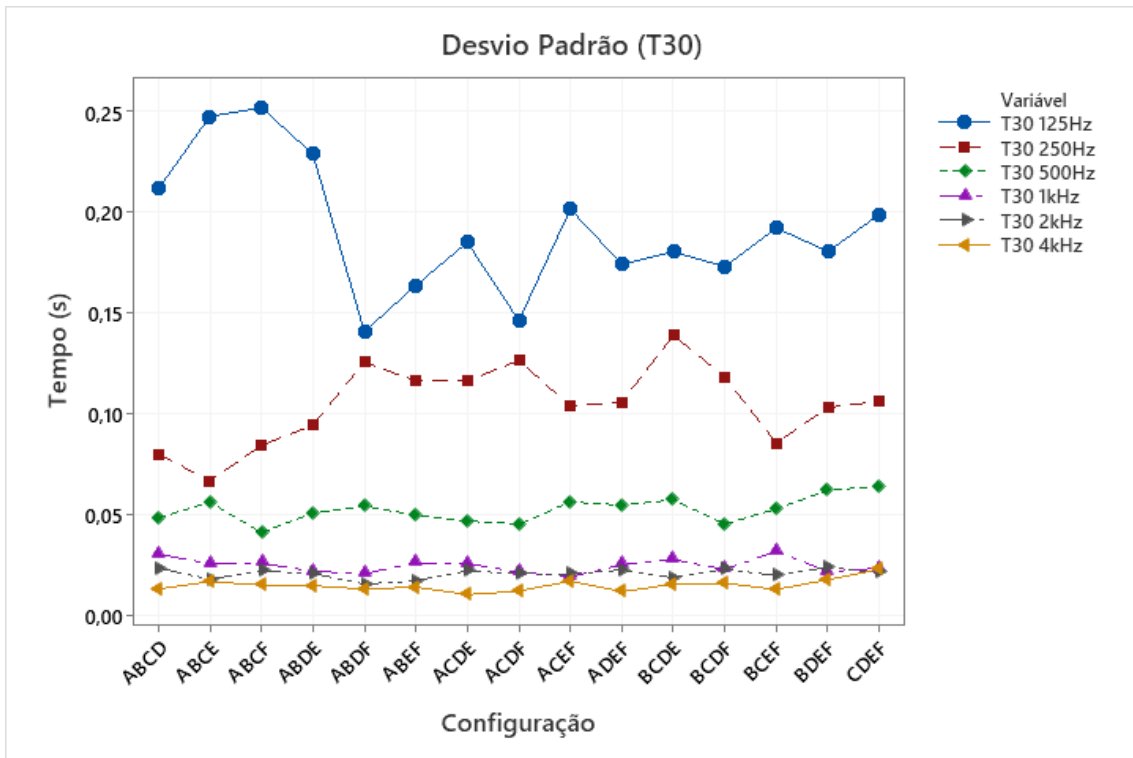
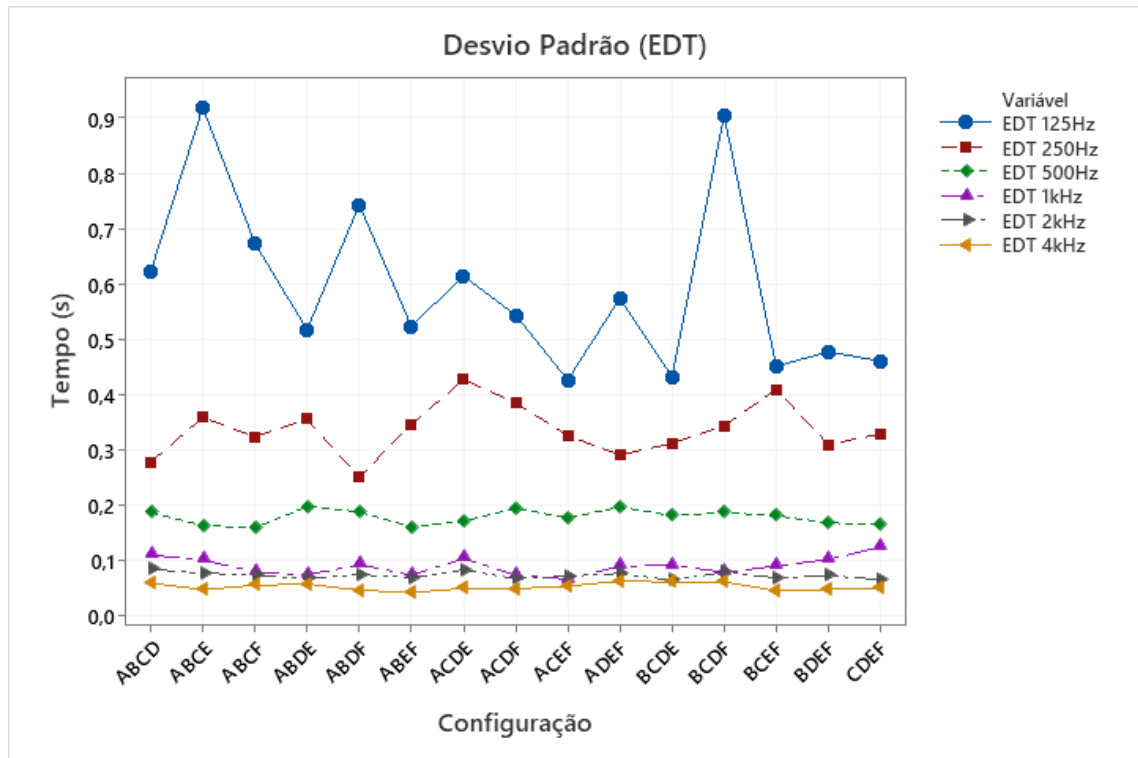


Figura 5.3 – Gráfico do Desvio Padrão para EDT.



Como observado nas Figuras Figura 5.1 a Figura 5.3, o coeficiente de absorção sonora varia com a frequência da onda. Por isso, o tempo de reverberação, juntamente com o desvio padrão, também varia com a frequência. Geralmente, o tempo de reverberação é maior em baixas frequências, porque elas têm uma absorção sonora menos eficaz do que frequências mais elevadas, ou ainda a maior parte dos materiais absorve melhor as altas frequências. As Figuras Figura 5.4 a Figura 5.6 e ilustram a comparação da sala de aula com diferentes leiautes incluindo o valor de referência de 0,5 s recomendado pela NBR 12179:1992.

Figura 5.4 – Gráfico do Tempo de Reverberação (T20).

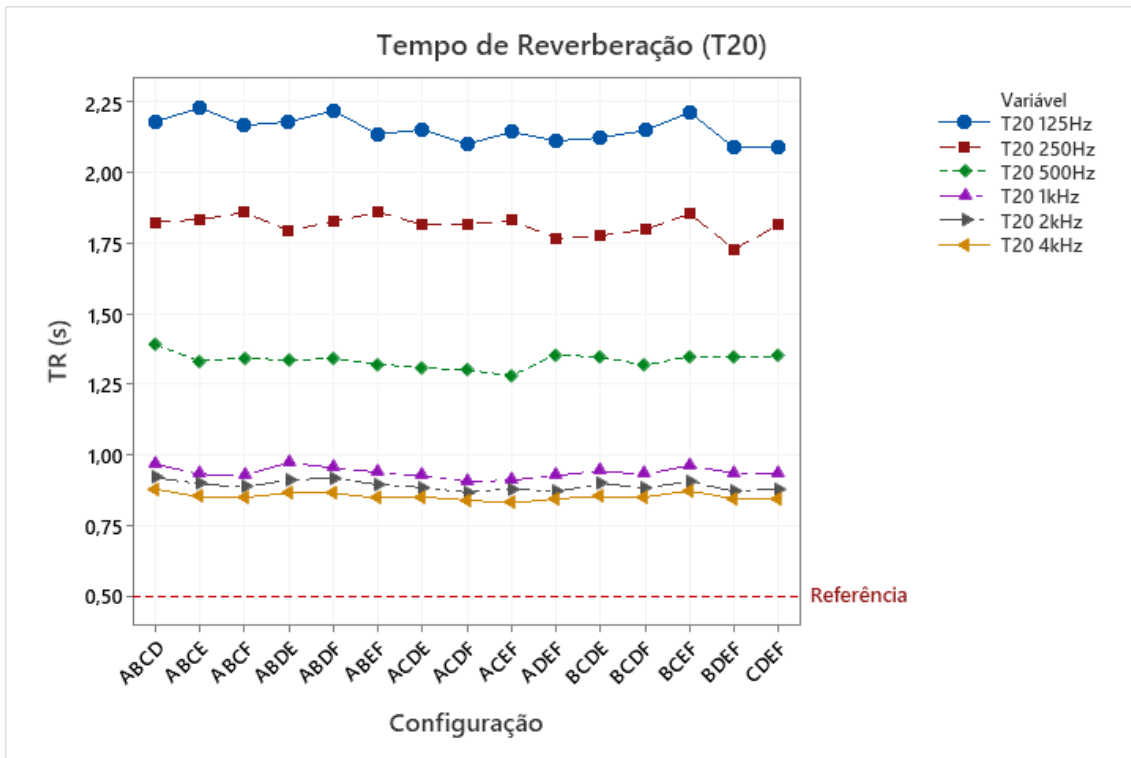


Figura 5.5 – Gráfico do Tempo de Reverberação (T30).

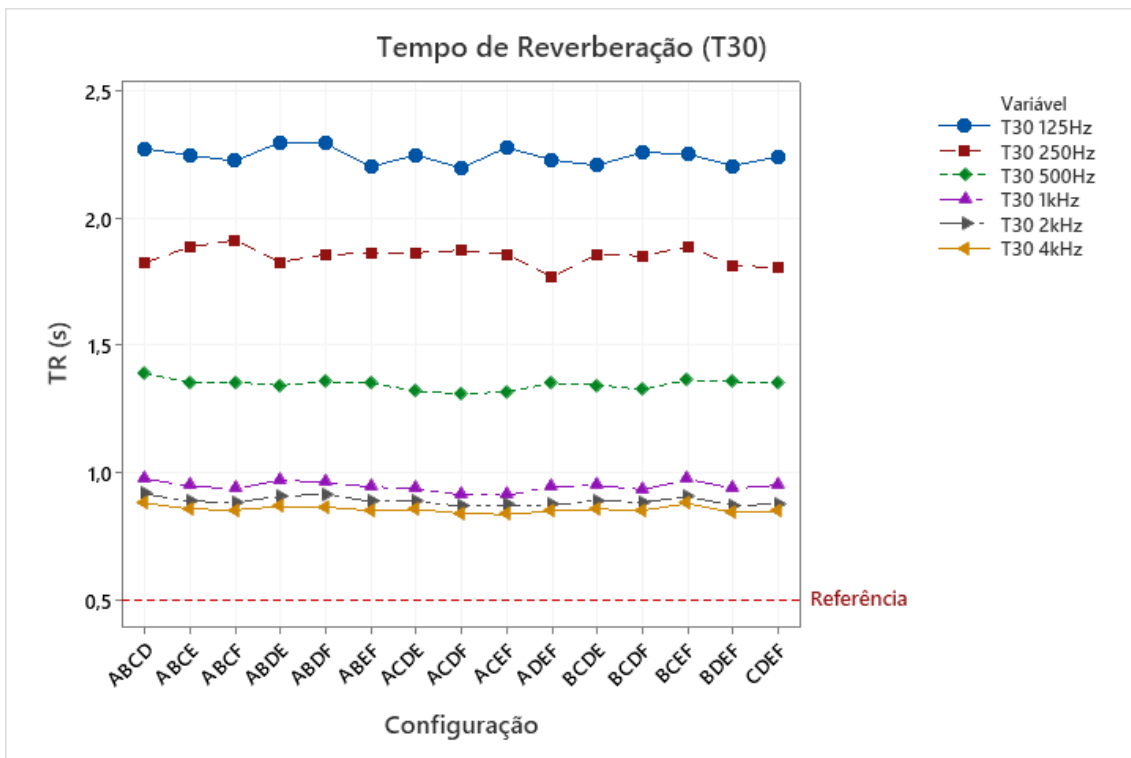
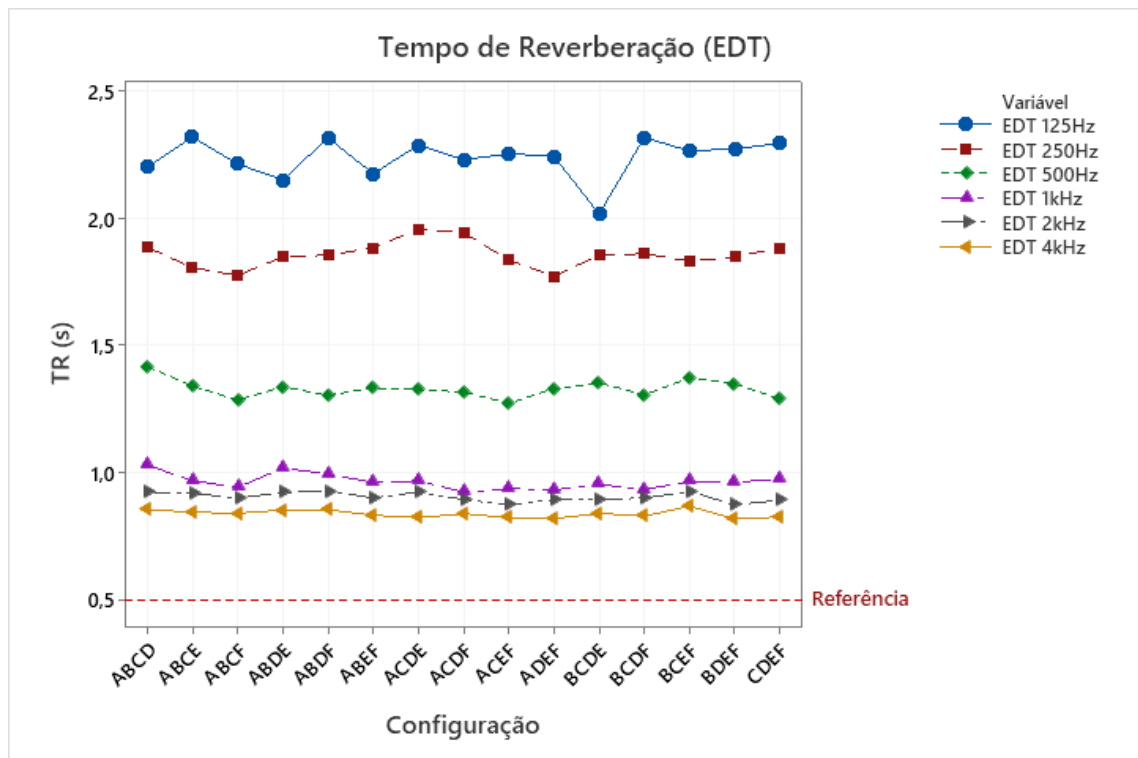


Figura 5.6 – Gráfico do Tempo de Reverberação (EDT).



O comportamento dos três parâmetros estudados foi similar, sendo que para as baixas frequências o TR se mostrou elevado. A frequência de 500Hz apresentou um TR mediano. Já as frequências de 1000Hz, 2000Hz e 4000Hz apresentaram os melhores tempos de reverberação.

Em relação a configuração, a Tabela 5.4 expõe as configurações que obtiveram o melhor ou pior desempenho (menor e maior tempo de reverberação, respectivamente) nas faixas de frequência.

Tabela 5.4 – Desempenho das configurações.

Configuração	T20			T30			EDT			Geral
	Baixa	Média	Alta	Baixa	Média	Alta	Baixa	Média	Alta	
<b>ABCD</b>		-	--		--	--		--		PIOR
<b>ABCE</b>	-						-			
<b>ABCF</b>				-						
<b>ABDE</b>		-		-						
<b>ABDF</b>									-	
<b>ABEF</b>	-									
<b>ACDE</b>							-			
<b>ACDF</b>		+	+	+	+	+		+		MELHOR
<b>ACEF</b>		+	+		+	+		+	+	MELHOR
<b>ADEF</b>				+			+			
<b>BCDE</b>							+			
<b>BCDF</b>										
<b>BCEF</b>									-	
<b>BDEF</b>	++								+	
<b>CDEF</b>										

(+) Melhor desempenho na frequência

(-) Pior desempenho na frequência

(+ +) Melhor desempenho na faixa

(- -) Pior desempenho na faixa

Desta forma, é possível avaliar que o TR nas configurações ACDF e ACEF empatam na média geral (ambos apresentam o melhor desempenho em 6 frequências), por isso considera-se que ambas as configurações possuem o melhor desempenho acústico. Por outro lado, a configuração ABCD apresentou o pior desempenho acústico.

Observou-se que as posições A-C-D estão presentes em uma das melhores configurações (ACDF) e na pior configuração (ABCD). Deste modo, o gráfico de contorno, apresentado nas Figuras Figura 5.7 a Figura 5.9 expõem a variação do TR ao fixar as posições A-C-D com material de absorção sonora e variando a posição complementar da configuração nas outras três posições, isto é, B-E-F.

Figura 5.7 – Gráfico de Contorno (T20).

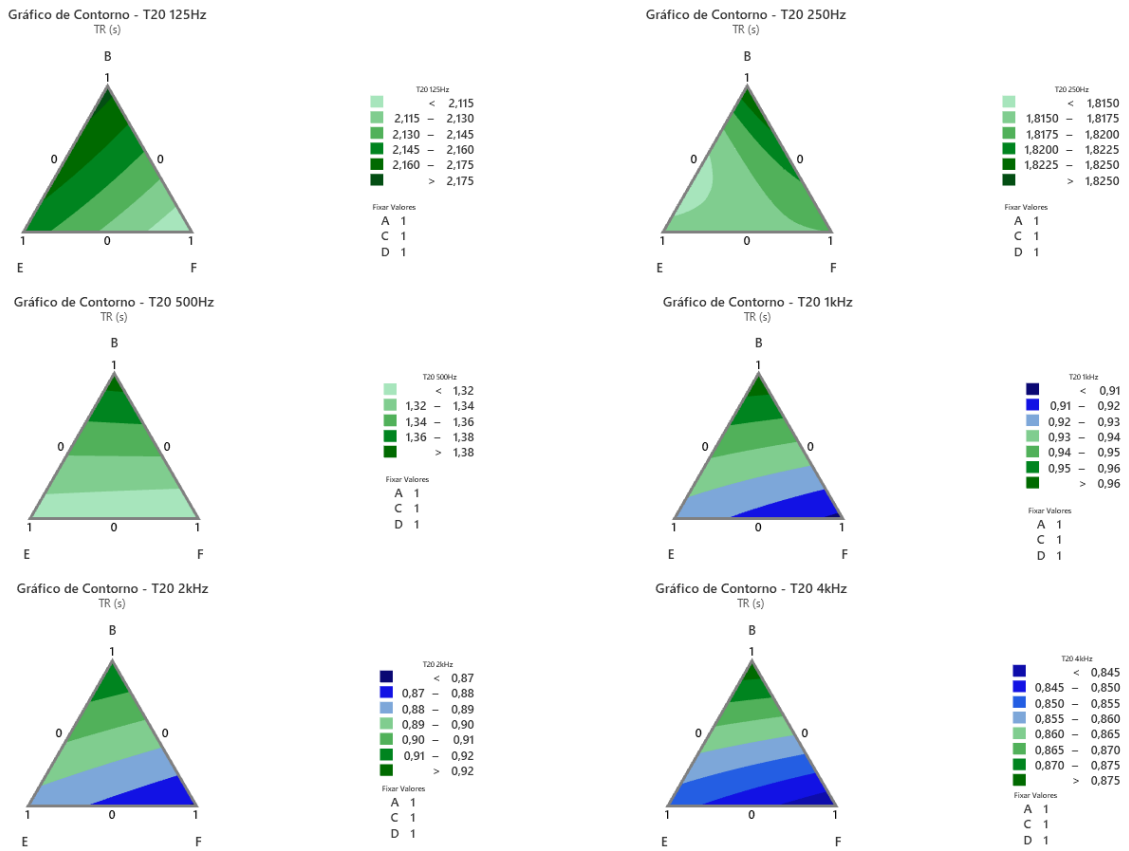
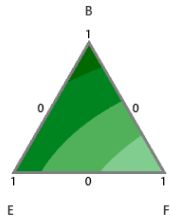


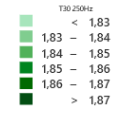
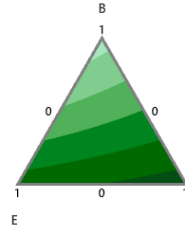
Figura 5.8 – Gráfico de Contorno (T30).

Gráfico de Contorno - T30 125Hz  
TR (s)



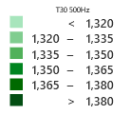
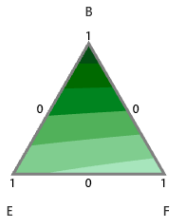
Fixar Valores  
A 1  
C 1  
D 1

Gráfico de Contorno - T30 250Hz  
TR (s)



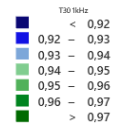
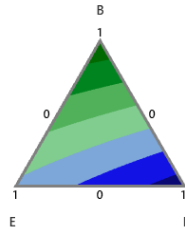
Fixar Valores  
A 1  
C 1  
D 1

Gráfico de Contorno - T30 500Hz  
TR (s)



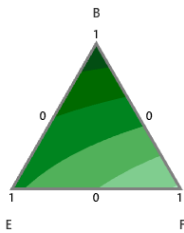
Fixar Valores  
A 1  
C 1  
D 1

Gráfico de Contorno - T30 1kHz  
TR (s)



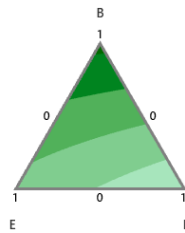
Fixar Valores  
A 1  
C 1  
D 1

Gráfico de Contorno - T30 2kHz  
TR (s)



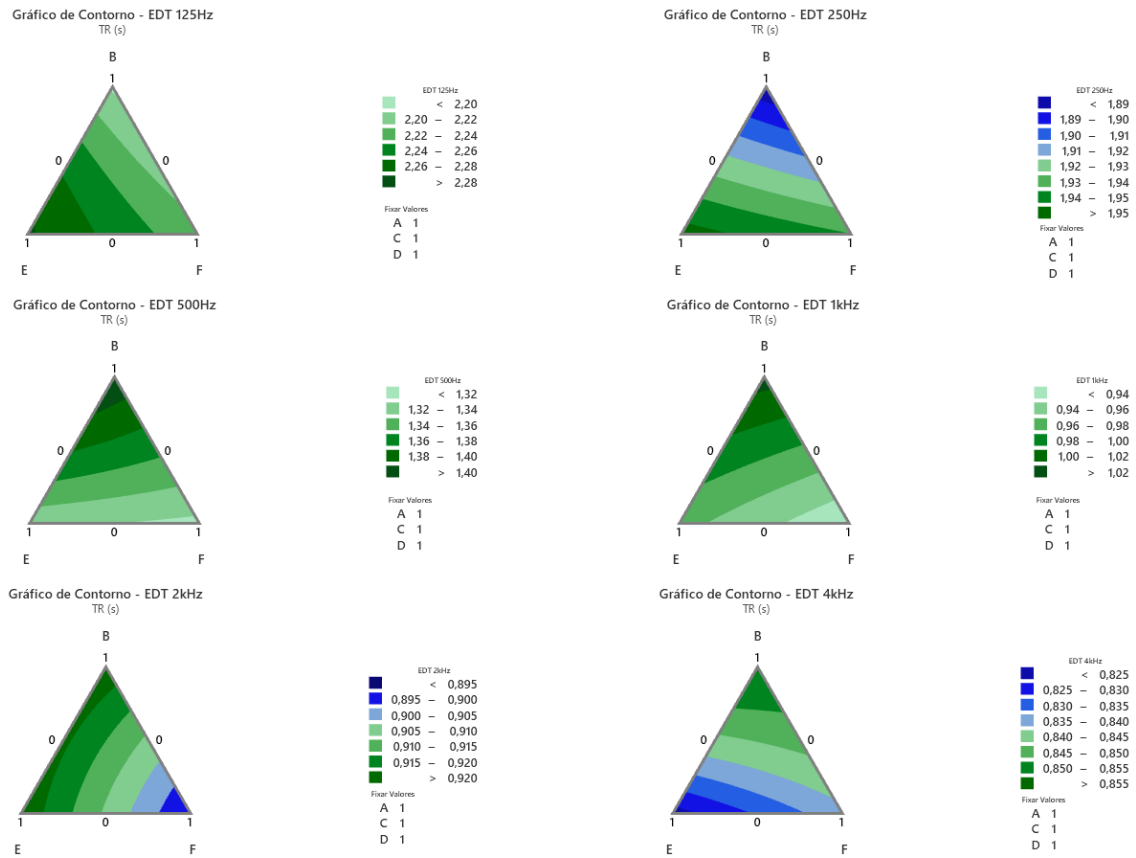
Fixar Valores  
A 1  
C 1  
D 1

Gráfico de Contorno - T30 4kHz  
TR (s)



Fixar Valores  
A 1  
C 1  
D 1

Figura 5.9 – Gráfico de Contorno (EDT).



Da análise dos gráficos, constata-se que quando a configuração é fixada em ACDF, na maioria dos gráficos, expostos nas Figuras Figura 5.7 a Figura 5.9, atingiu os menores valores (melhor desempenho) e por outro lado, quando a configuração é fixada em ABCD, em sua maioria, ela atingiu os maiores valores (pior desempenho). Ressalta que a configuração ACDF apresenta placas nas posições mais próximas a lousa e mais ao fundo da sala, enquanto a configuração ABCD apresenta placas posicionadas apenas na região mais próxima a lousa, como apresentado nas Figura 5.10 e Figura 5.11, respectivamente.

Figura 5.10 – Leiaute ACDF. a) Disposição na parede direita b) Disposição na parede esquerda.



(a)

(b)

Figura 5.11 – Leiaute ABCD. a) Disposição na parede direita b) Disposição na parede esquerda



(a)

(b)

Para finalizar a análise do TR, as Figuras Figura 5.12 a Figura 5.14 apresentam os gráficos de efeitos principais para T20, T30 e EDT nas faixas de frequência de estudo.

Figura 5.12 – Gráfico de Efeitos Principais (T20).

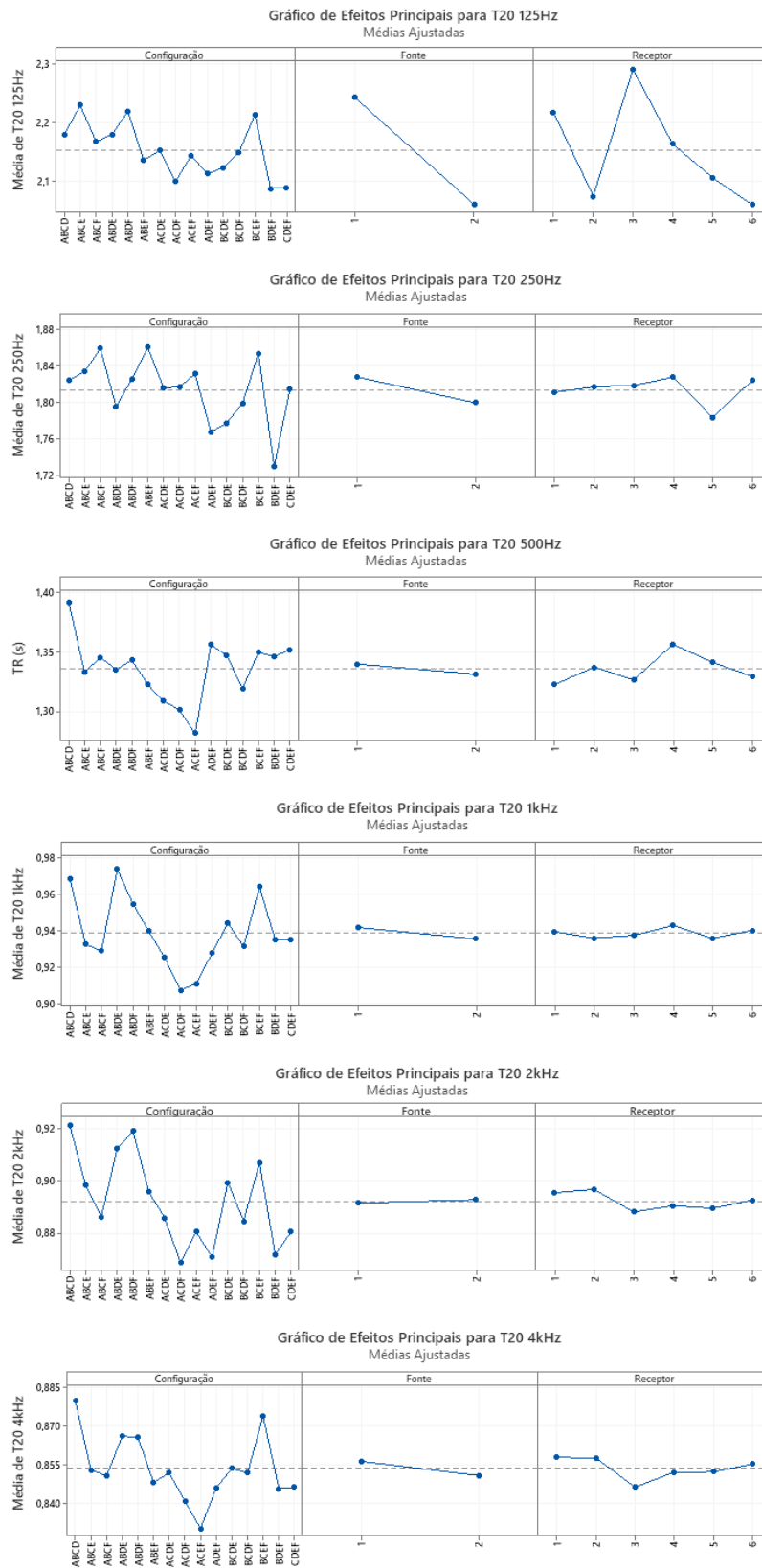


Figura 5.13 – Gráfico de Efeitos Principais (T30).

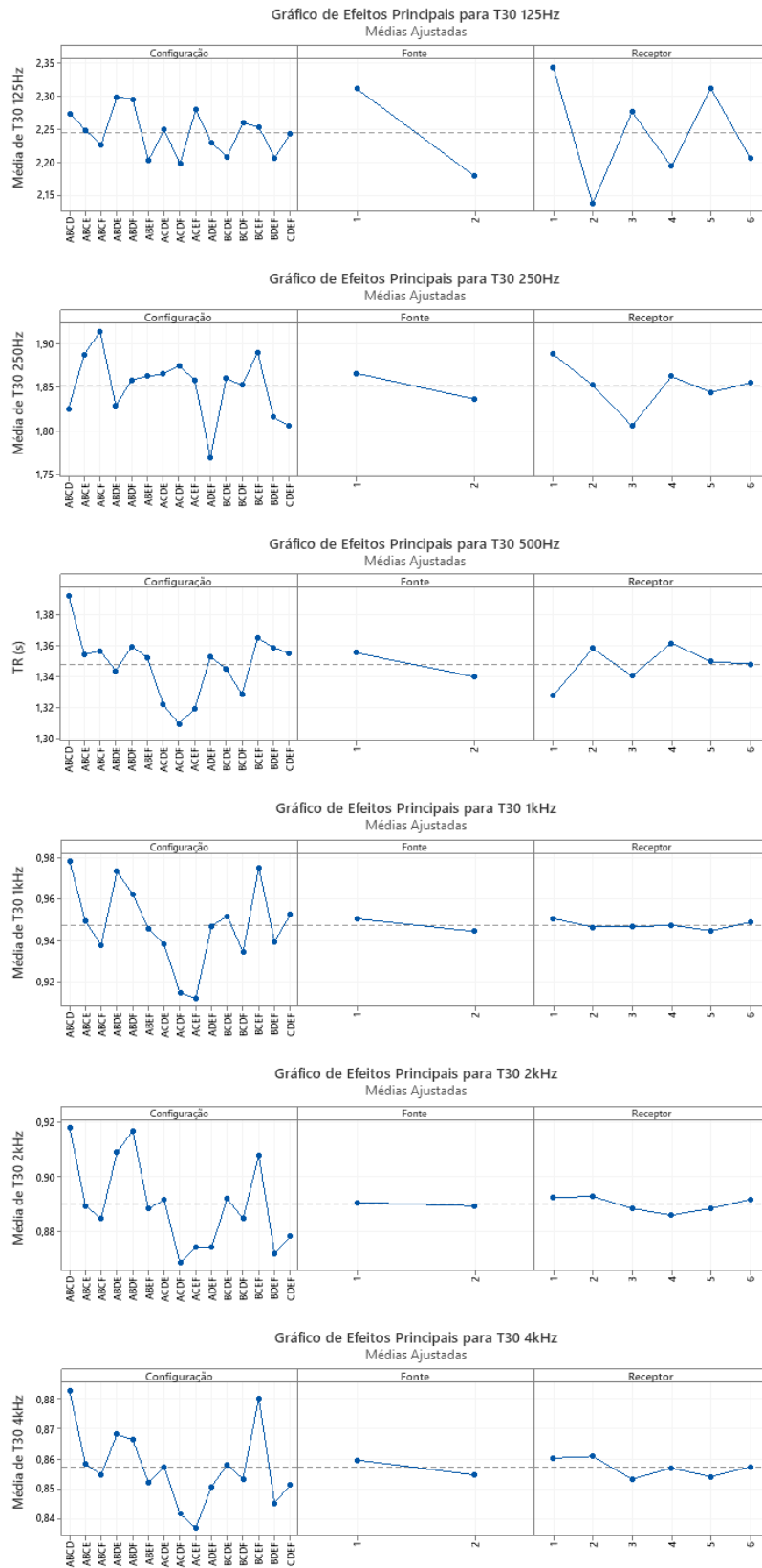
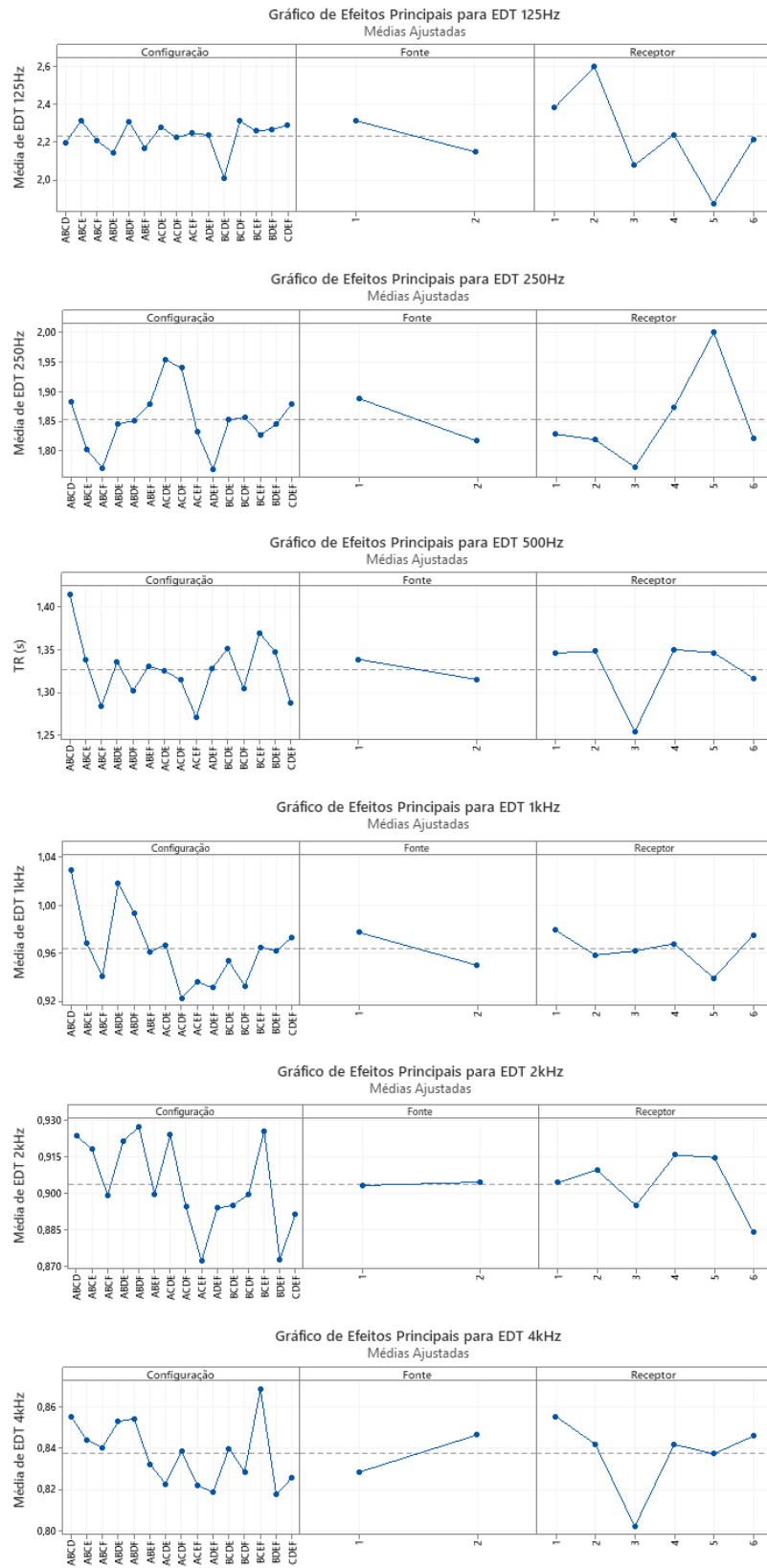


Figura 5.14 – Gráfico de Efeitos Principais (EDT).



Ressalta a grande significância da configuração, principalmente com o aumento da frequência. Para T20 e T30 as baixas frequências apresentam uma considerável parcela de significância da interação Configuração e Receptor. Para EDT, como já era esperado, a interação Configuração e Receptor possui grande significância em todas as faixas de frequência. Em suma, segue Tabela 5.5 que apresenta o exposto.

Tabela 5.5 – Fatores significativos para o Tempo de Reverberação.

		Fatores Significativos						
		A	B	C	A*B	A*C	B*C	A*B*C
T20	125 Hz	X	X	X	X	X	X	
	250 Hz	X	X			X	X	X
	500 Hz	X		X	X	X		X
	1 kHz	X						
	2 kHz	X						
	4 kHz	X	X	X			X	
T30	125 Hz		X	X	X		X	
	250 Hz	X	X	X	X	X		X
	500 Hz	X	X	X		X	X	X
	1 kHz	X	X		X			
	2 kHz	X						
	4 kHz	X	X	X				
EDT	125 Hz		X	X			X	
	250 Hz		X	X		X	X	
	500 Hz			X			X	
	1 kHz	X	X	X		X	X	
	2 kHz	X		X			X	
	4 kHz	X	X	X			X	

X: Significância (95% de Confiança)

A: Configuração

B: Fonte

C: Receptor

Pela análise dos gráficos e tabelas, fica evidente que a configuração (leiaute) tem uma grande significância no desempenho acústico e isso resulta em melhores configurações (ACDF) e piores configurações (ABCD).

## 5.2 Brilho e Razão de Baixos

Ao analisar o experimento através dos outros parâmetros acústicos, obteve-se as Tabelas Tabela 5.6 e Tabela 5.7 que apresentam os valores e a classificação das configurações relacionados ao Brilho e a Razão de Baixos, respectivamente. Para classificar os valores calculados utilizou-se o Critério de Beranek, que aponta que quanto maior o valor calculado, melhor será o desempenho. Sendo assim, a classificação nas tabelas abaixo aponta como melhor desempenho a configuração que obteve os maiores valores para Br e BR. De forma análoga, quanto menor o valor calculado, pior será sua classificação.

Tabela 5.6 – Brilho (Br).

<b>Brilho (Br)</b>		
<b>Configuração</b>	<b>Br (T20)</b>	<b>Br (T30)</b>
<b>ABCD</b>	0,763	0,760
<b>ABCE</b>	0,773	0,759
<b>ABCF</b>	0,764	0,758
<b>ABDE</b>	0,770	0,767
<b>ABDF</b>	0,777	0,768
<b>ABEF</b>	0,771	0,757
<b>ACDE</b>	0,778	0,774
<b>ACDF</b>	0,774	0,769
<b>ACEF</b>	0,780	0,767
<b>ADEF</b>	0,752	0,750
<b>BCDE</b>	0,765	0,762
<b>BCDF</b>	0,772	0,768
<b>BCEF</b>	0,770	0,764
<b>BDEF</b>	0,753	0,747
<b>CDEF</b>	0,755	0,750
<b>Geral</b>	0,768	0,761
<b>Pior desempenho</b>	ADEF	BDEF
<b>Melhor desempenho</b>	ACEF	ACDE

Tabela 5.7 – Razão de Baixos (BR).

<b>Razão de Baixos (BR)</b>				
<b>Configuração</b>	<b>BR (T20)</b>	<b>Classificação (T20)</b>	<b>BR (T30)</b>	<b>Classificação (T30)</b>
<b>ABCD</b>	1,697	Excelente	1,729	Excelente
<b>ABCE</b>	1,794	Excelente	1,796	Excelente
<b>ABCF</b>	1,771	Excelente	1,805	Excelente
<b>ABDE</b>	1,722	Excelente	1,782	Excelente
<b>ABDF</b>	1,761	Excelente	1,789	Excelente
<b>ABEF</b>	1,767	Excelente	1,769	Excelente
<b>ACDE</b>	1,776	Excelente	1,820	Excelente
<b>ACDF</b>	1,774	Excelente	1,831	Excelente
<b>ACEF</b>	1,813	Excelente	1,854	Excelente
<b>ADEF</b>	1,699	Excelente	1,739	Excelente
<b>BCDE</b>	1,703	Excelente	1,772	Excelente
<b>BCDF</b>	1,755	Excelente	1,817	Excelente
<b>BCEF</b>	1,758	Excelente	1,771	Excelente
<b>BDEF</b>	1,674	Excelente	1,750	Excelente
<b>CDEF</b>	1,707	Excelente	1,754	Excelente
<b>Geral</b>	1,74	Excelente	1,79	Excelente
<b>Pior desempenho</b>		BDEF		ABCD
<b>Melhor desempenho</b>		ACEF		ACEF

Para sumarizar os dados obtidos, tem-se as Figura 5.15 e Figura 5.16 que ilustram o Brilho e a Razão de Baixos, respectivamente, em relação ao Critério de Beranek. Lembra-se que para Brilho o recomendado é 0,7 enquanto para a Razão de Baixos a classificação está presente na Tabela 3.2, sendo excelente acima de 1,21.

Figura 5.15 – Gráfico do Brilho (Br).

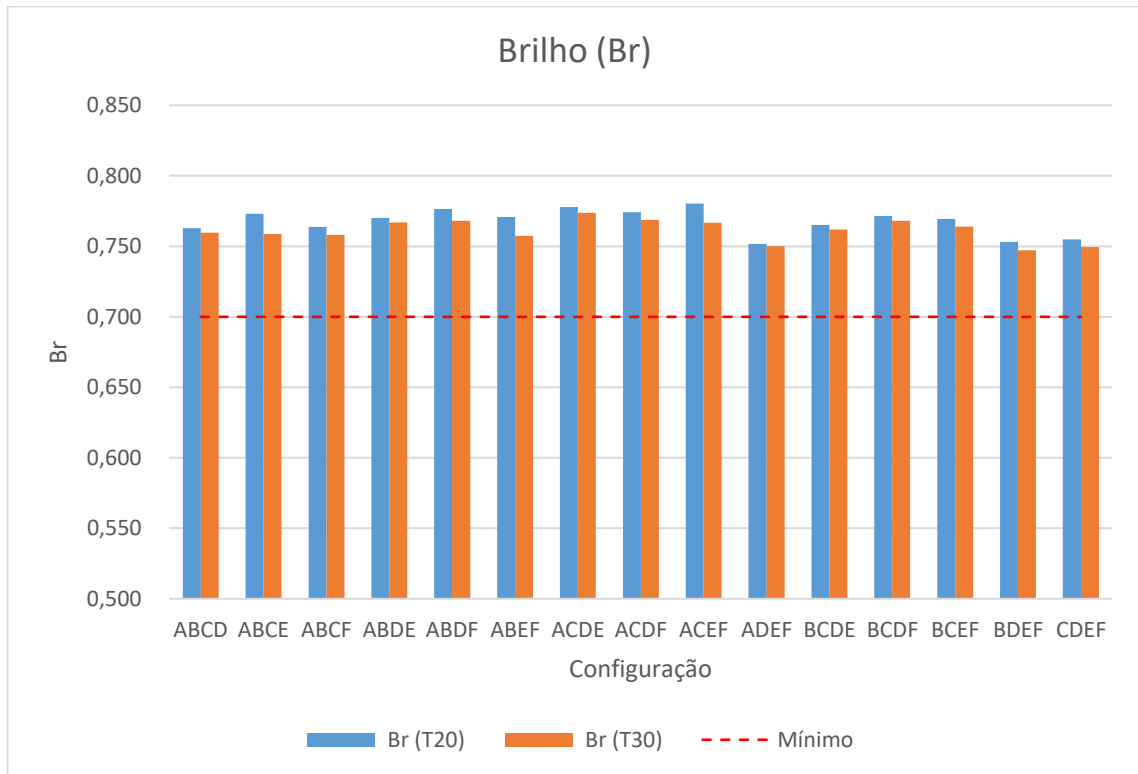
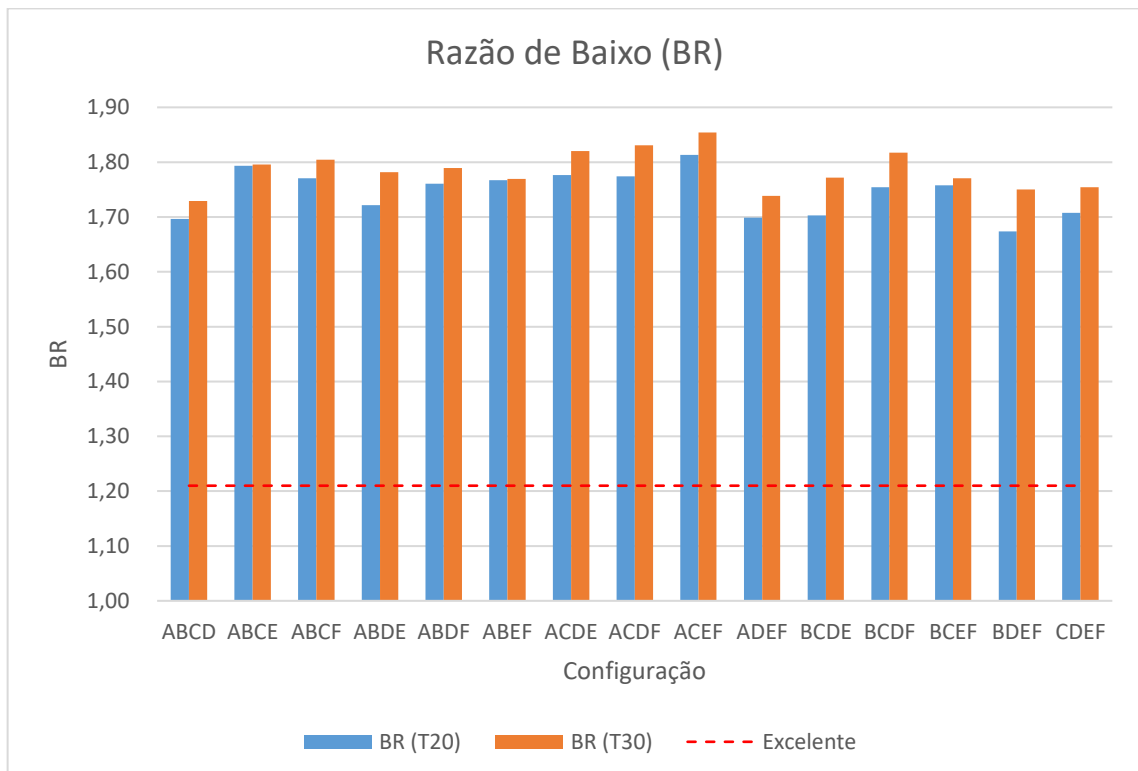


Figura 5.16 – Gráfico da Razão de Baixo (BR).



Ante o exposto, nota-se que o experimento produziu excelentes valores para o Brilho e para a Razão de Baixos, uma vez que, não só as configurações com o melhor desempenho (para Br foram ACEF e ACDE), mas também as configurações com o pior desempenho (ADEF, BDEF e ABCD) se mostraram muito acima do critério usado como referência.

### 5.3 Clareza e Definição

Por fim, restou analisar os últimos parâmetros destacados nesse trabalho. Através do Critério de Beranek, obteve-se a classificação das médias da Clareza e da Definição, expostas nas Tabelas Tabela 5.8 e Tabela 5.9. Reforça-se que a classificação está presente na Tabela 3.3.

Tabela 5.8 – Clareza (C50).

Configuração	Clareza (C50)						Média	Classificação
	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz		
ABCD	-1,80	-0,40	1,29	3,42	3,95	4,44	1,81	Regular
ABCE	-1,84	-0,17	1,61	3,87	3,99	4,57	2,00	Regular
ABCF	-1,69	-0,35	1,62	3,94	4,31	4,71	2,09	Regular
ABDE	-1,65	-0,28	1,76	3,40	3,90	4,56	1,95	Regular
ABDF	-2,17	-0,63	1,85	3,66	4,09	4,61	1,90	Regular
ABEF	-1,96	-0,36	1,38	3,73	4,22	4,67	1,95	Regular
ACDE	-1,99	-0,48	1,65	3,77	4,15	4,79	1,98	Regular
ACDF	-1,60	-0,50	1,98	4,15	4,33	4,72	2,18	Regular
ACEF	-1,86	-0,46	2,03	4,27	4,41	4,82	2,20	Regular
ADEF	-1,60	-0,02	1,66	4,06	4,40	4,91	2,23	Regular
BCDE	-1,57	-0,17	1,37	3,77	4,25	4,70	2,06	Regular
BCDF	-1,72	-0,23	1,54	3,92	4,22	4,75	2,08	Regular
BCEF	-1,87	-0,46	1,67	3,81	3,92	4,43	1,92	Regular
BDEF	-1,89	-0,41	1,58	3,98	4,39	4,78	2,07	Regular
CDEF	-1,87	-0,45	1,67	3,93	4,35	4,77	2,07	Regular
<b>Geral</b>	<b>-1,81</b>	<b>-0,36</b>	<b>1,64</b>	<b>3,84</b>	<b>4,19</b>	<b>4,68</b>	<b>2,03</b>	<b>Regular</b>

Tabela 5.9 – Definição (D50).

Definição (D50)								
Configuração	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz	Média	Classificação
<b>ABCD</b>	40%	48%	57%	69%	71%	73%	60%	Regular
<b>ABCE</b>	40%	49%	59%	71%	71%	74%	61%	Regular
<b>ABCF</b>	40%	48%	59%	71%	73%	75%	61%	Regular
<b>ABDE</b>	41%	48%	60%	69%	71%	74%	60%	Regular
<b>ABDF</b>	38%	46%	60%	70%	72%	74%	60%	Regular
<b>ABEF</b>	39%	48%	58%	70%	72%	75%	60%	Regular
<b>ACDE</b>	39%	47%	59%	70%	72%	75%	61%	Regular
<b>ACDF</b>	41%	47%	61%	72%	73%	75%	62%	Regular
<b>ACEF</b>	40%	47%	61%	73%	73%	75%	62%	Regular
<b>ADEF</b>	41%	50%	59%	72%	73%	76%	62%	Regular
<b>BCDE</b>	41%	49%	58%	70%	73%	75%	61%	Regular
<b>BCDF</b>	40%	49%	59%	71%	72%	75%	61%	Regular
<b>BCEF</b>	40%	47%	59%	71%	71%	73%	60%	Regular
<b>BDEF</b>	39%	48%	59%	71%	73%	75%	61%	Regular
<b>CDEF</b>	40%	47%	59%	71%	73%	75%	61%	Regular
<b>Geral</b>	40%	48%	59%	71%	72%	75%	61%	Regular

Paralelamente, gerou-se os gráficos com as linhas de referência traçadas. As Figuras Figura 5.17 e Figura 5.18 apresentam os dados em relação ao Critério de Beranek.

Figura 5.17 – Gráfico da Clareza (C50).

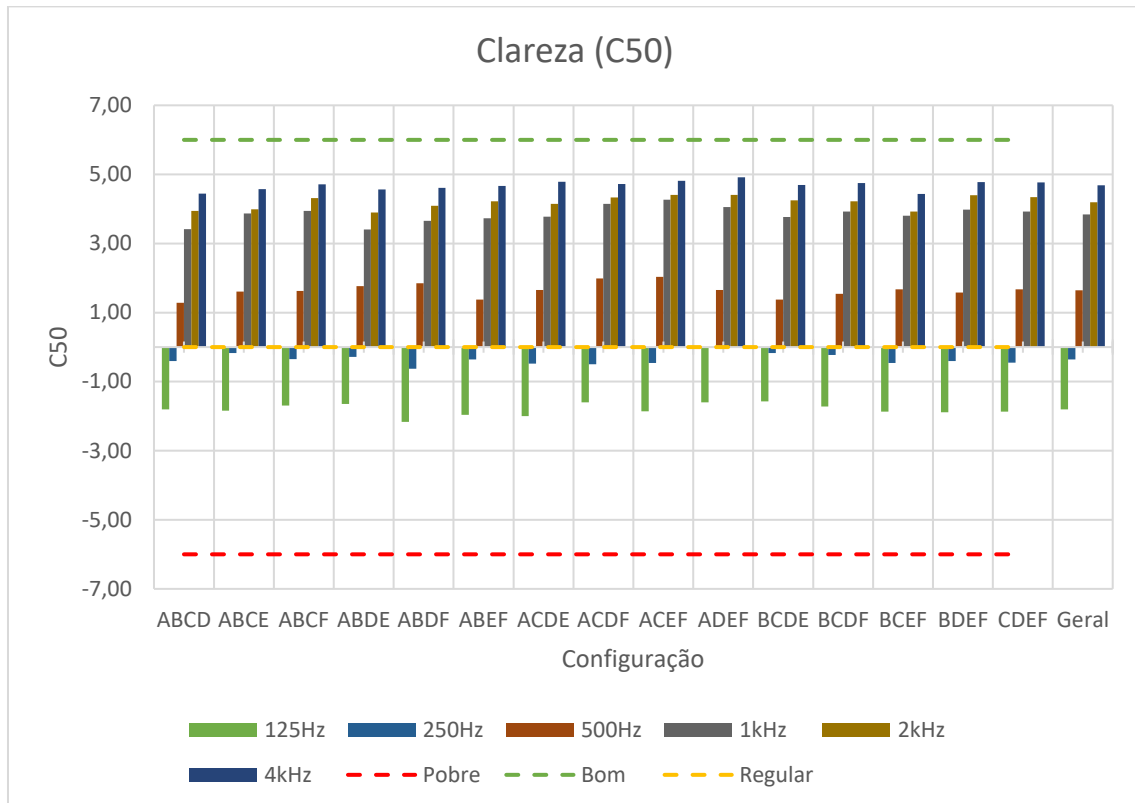
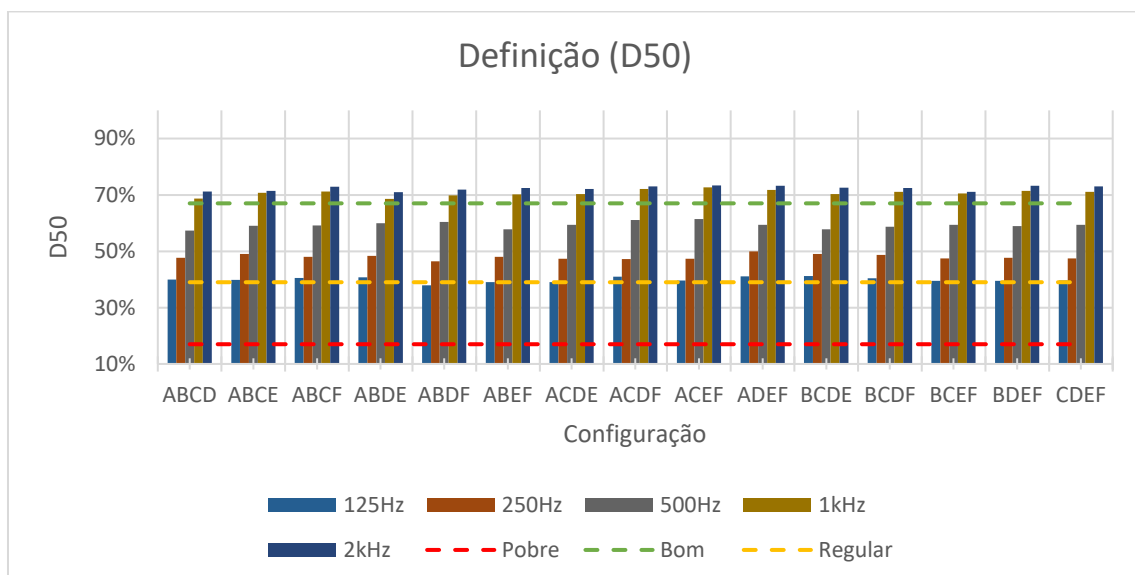


Figura 5.18 – Gráfico da Definição (D50).



Dessa forma, ao analisar cada configuração individualmente, verifica-se que com o aumento da frequência há uma melhora no desempenho acústico, reforçando a constatação

inicial que altas frequências possuem uma performance melhor que baixas frequências.

## 5.4 Desempenho geral

A fim de identificar os melhores layouts baseados nas configurações utilizadas no experimento, é apresentado na Tabela 5.10 um quadro geral que destaca os melhores e piores desempenhos de parâmetro para todas as frequências estudadas.

Tabela 5.10 – Quadro de Desempenho Geral.

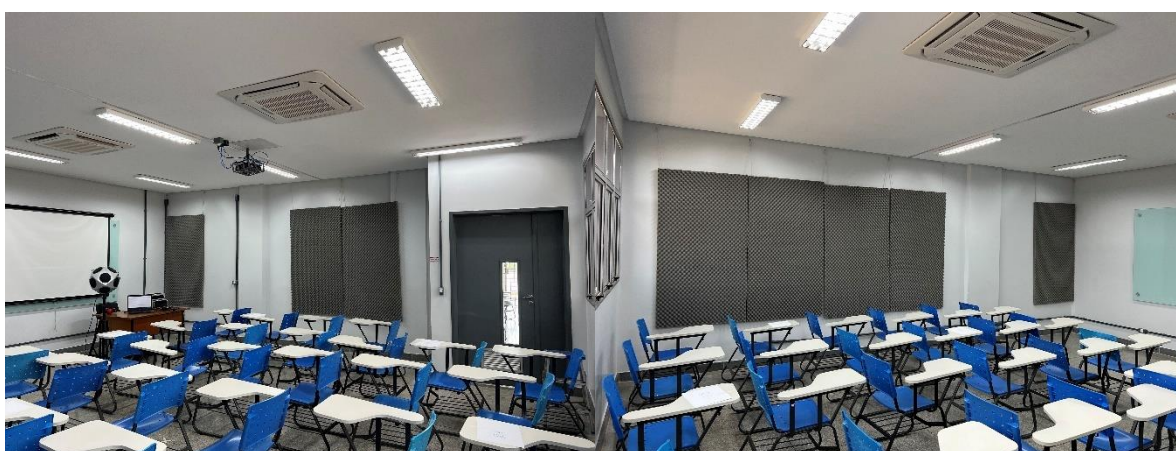
	Configuração														
	ABCD	ABCE	ABCF	ABDE	ABDF	ABEF	ACDE	ACDF	ACEF	ADEF	BCDE	BCDF	BCEF	BDEF	CDEF
T20	125Hz	-													+
	250Hz					-									+
	500Hz	-							+						
	1kHz			-				+							
	2kHz	-						+							
	4kHz	-							+						
T30	125Hz			-				+							
	250Hz		-							+					
	500Hz	-						+							
	1kHz	-							+						
	2kHz	-						+							
	4kHz	-							+						
EDT	125Hz	-										+			
	250Hz						-			+					
	500Hz	-							+						
	1kHz	-						+							
	2kHz				-				+						
	4kHz												-	+	
Br	T20								+	-					
	T30						+								-
BR	T20								+						-
	T30	-							+						
C50	125Hz				-							+			
	250Hz				-					+					
	500Hz	-							+						
	1kHz				-				+						
	2kHz				-				+						
	4kHz									+			-		
D50	125Hz				-							+			
	250Hz				-					+					
	500Hz				-					+					
	1kHz				-				+						
	2kHz				-				+						
	4kHz									+			-		
<b>Geral</b>	-							+							

(+) Melhor desempenho

(-) Pior desempenho

Dessa forma, ao analisar o quadro, observou-se que a configuração ACEF se destacou por ter o melhor desempenho geral. Do mesmo modo, a configuração ABCD se mostrou como a configuração com o pior desempenho acústico. Em termos gerais, a configuração ACEF apresenta placas distribuídas na sala, com presença nas posições mais próximas a lousa e mais ao fundo da sala (ver Figura 5.19) e a configuração ABCD apresenta placas concentradas na parede direita e mais próximas a lousa, não tendo nenhuma placa nas posições mais ao fundo da sala (ver Figura 5.20).

Figura 5.19 – Leiaute ACEF. a) Disposição na parede direita b) Disposição na parede esquerda.



(a)

(b)

Figura 5.20 – Leiaute ABCD. a) Disposição na parede direita b) Disposição na parede esquerda



(a)

(b)

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Tendo em vista a os resultados e as discussões dos ensaios, são tratadas nesse capítulo algumas conclusões a respeito das análises e sugestões de trabalhos futuros.

### 6.1 Conclusão

Este trabalho teve os seguintes objetivos: avaliar acusticamente a variação do leiaute com PAS na Sala 108 situada no prédio B.5 da Engenharia Mecânica, campus II da UFG, posteriormente proceder com uma análise de significância dos parâmetros acústicos através do Planejamento Fatorial dos Experimentos para verificar como outras condições das salas interferem em cada um dos descritores e por fim, sugerir o melhor leiaute para a sala de aula nos padrões do ambiente estudado. Para cada um dos objetivos, foram elencadas as conclusões obtidas, que são discorridas em sequência.

A qualidade acústica da sala foi verificada aplicando-se os parâmetros T20, T30, EDT, Br, BR, C50 e D50. Os resultados mostraram que o posicionamento das PAS tem influência direta no desempenho acústico da sala, uma vez que o fator configuração se mostrou como o mais significativa na maioria dos leiautes e em grande parte das frequências. Ademais, a análise de variância mostrou significância dos fatores FONTE e RECEPTOR em vários leiautes. Notou-se uma semelhança entre as respostas de T20 e T30, fundamentado por sua relação com as características da sala, e um comportamento singular para EDT, apoiado por sua relação mais próxima com a posição da fonte e do receptor.

Sucintamente, definiu-se por meio dos experimentos que a configuração ACEF teve o melhor desempenho na média de todos os parâmetros, se destacando assim como o melhor leiaute para a sala estudada. Da mesma forma, notou-se que a configuração ABCD se destacou negativamente por apresentar os piores resultados nos parâmetros estudados, tornando-se assim o pior leiaute para esse tipo de sala. Além disso, de modo geral, observou-se que a configuração com placas mais próximas ao quadro e mais ao fundo da sala se destacou por ter o melhor desempenho acústico para a sala estudada. Por outro lado, a configuração com placas apenas mais próximas ao quadro apresentou as piores respostas, caracterizando-se assim como o pior leiaute para a mesma sala.

Com relação aos demais descritores, os leiautes obtiveram bons resultados para a Razão de Baixos e para o Brilho, utilizando o Critério de Beranek. A Clareza e a Definição foram classificadas como regular, utilizando o critério citado.

Finalmente, em termos gerais, enfatiza-se algumas dificuldades do estudo, como o planejamento do experimento em relação as posições das PAS, uma vez que devido a quantidade de placas e quantidade de posições, o planejamento completo se mostrou por várias vezes inviável devido a quantidade de medições. Inclui-se ainda a dificuldade em manipular as PAS, por tratar de espumas que danificam facilmente e possuem grandes dimensões, além de demandarem um tempo considerável para variar os leiautes. Relacionados a isso, tem-se a complexidade em fixar as PAS nas paredes.

## 6.2 Sugestões para trabalhos futuros

Ao longo do desenvolvimento deste trabalho, puderam ser identificadas algumas possibilidades de melhoria e de continuação a partir de futuras pesquisas, as quais incluem:

- Ademais à técnica de análise de variância, sugere-se utilizar também a técnica de redes neurais, objetivando não somente a análise dos dados, mas também a comparação das técnicas aplicadas em acústica de salas, conforme Nascimento (2019), que aplicou com sucesso e obteve bons resultados. Ademais, redes neurais podem fornecer um metamodelo para futuros experimentos;
- De fato, leiautes com uma maior área de absorção sonora proporcionaram melhores dados. Assim, em trabalhos futuros é indicado o uso de um maior número de PAS;
- Buscar um método para melhorar a fixação das PAS nas paredes, melhorando o tempo de variação do leiaute;
- Repetir o estudo em outra sala típica da UFG para verificar a consistência dos resultados para outras salas. Isto é, certificar que placas próximas ao quadro e no fundo da sala são melhores que apenas próximas ao quadro em qualquer leiaute de sala de aula do prédio.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHNERT, W.; SCHIMITD, W. Fundamentals to perform acoustical measurements. Appendix to EASERA, 2005.

ALCANTARA, L. C. G. Avaliação do Conforto Acústico de Residências Populares Utilizando Análise Estatística de Energia. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro.

AMERICAN NATIONAL STANDARD INSTITUTE (ANSI). ANSI/ASA S12.60-2010/PART 1: Acoustical Performance criteria, Design Requirements, and guidelines for Schools, Part 1: Permanent Schools. Acoustic Society of America, 2010.

AMORIM, A. E. B. Formas geométricas e qualidade acústica de salas de aula: Estudo de caso em Campinas-SP. Universidade Estadual de Campinas, 2007.

ANSAY, S.; ZANNIN, P. H. T. Using the Parameters of Definition, D50, and Reverberation Time, RT, to Investigate the Acoustic Quality of Classrooms. Canadian Acoustics, v. 44, n. 4, p. 6-11, 2016.

AROEIRA, C. Analisador De Vibrações 1: A Relação Entre Tempo E Frequência. DMC: Engenharia e Sistemas Ibéricos, Lda, [s. l.], 29 dez. 2020. Disponível em: <https://www.dmc.pt/analizador-de-vibracoes-1-tempo-e-frequencia-www-dmc-pt/>. Acesso em: 25 jun. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 3382: Acústica – Medição de parâmetros de acústica de salas. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12179: Tratamento acústico em recintos fechados. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro: ABNT, 1992.

AV INFO. Reverberation Time Measurements. 1995. Imagem. Disponível em: [https://av-info.eu/index.html?https&&av-info.eu/acoustic/RT\\_meetingrooms.html](https://av-info.eu/index.html?https&&av-info.eu/acoustic/RT_meetingrooms.html). Acesso em: 17 jun. 2022.

BADAN, Marco Aurélio Brazão Costa. Virtual microphone based on the vibroacoustic signal of emitting source. 2015. 140 f. Tese (Doutorado em Engenharias) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2015. DOI <https://doi.org/10.14393/ufu.te.2015.75>.

BARBOSA, M. S. N. Medição do coeficiente de absorção sonora de uma espuma de acústica pela técnica de aproximação de ondas planas in situ. Orientador: Marlipe Garcia Fagundes Neto. 2021. 49 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Goiás, UFG, 2021.

BARRON, F. Randall, Industrial Noise Control and Acoustics, Technical University of Louisiana, 2003.

BERANEK, L. L. Concert & Opera Hall: How they sound. The Journal of the Acoustical Society of America, v.99, n.5, p 2637-2637, 1996.

BISTAFA, S.R.; BRADLEY, J.S. Predicting reverberation times in a simulated classroom. The Journal of the Acoustical Society of America, v.108, n.4, p.1721–1731, 2000.

BISTAFA, S.R.; BRADLEY, J.S. Predicting speech metrics in a simulated classroom with varied sound absorption. The Journal of the Acoustical Society of America, v.109, p.1474–1482, 2001.

BORTOLINI, J. Estudo de experimentos fatorialis 2k aplicados em um processo industrial. 2012. 143 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2012.

BRAND, T. Speech Intelligibility. In: Handbook of Signal Processing in Acoustics. Oldenburg, Germany: Springer New York, 2008. p. 197–204.

BRANDÃO, E. Acústica de salas: projeto de modelagem. 1. ed. São Paulo: Blücher, 2016.

BRÜEL & KJÆR. DIRAC Room Acoustics Software Type 7841 Manual. Denmark, 2013.

CARVALHO, A. P. OLIVEIRA, Acústica Ambiental e de Edifícios, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Edição 8.3, Porto, 2012.

CARVALHO, R. P. Acústica arquitetônica. Brasília: Thesaurus, 2006.

COSTA, E. C. Fenômenos relativos a propagação do som. In: COSTA, Ennio Cruz da. Acústica técnica. São Paulo: Blucher, 2003. p. 30-33

DUNN F., HARTMANN W. M., CAMPBELL D. M., FLETCHER N. H. Springer handbook of acoustics. Springer, 2015.

FALCÃO, L. C. L. O que é tempo de reverberação? Concepção Acústica, [s. l.], 23 maio 2019. Disponível em: <https://www.concepcaoacustica.com/post/o-que-e-tempo-de-reverberacao>. Acesso em: 29 jul. 2022.

FERNANDES, João Candido. Acústica e Ruídos. Bauru: Unesp, 2002. v. 102. Disponível em: <<http://www.feb.unesp.br/jcandido/acustica/apostila.htm>>. Acesso em: 29 out. 2017.

FIGUEIREDO, F. 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.

GERGES, S. N. Y. Ruído: Fundamentos e Controle. Florianópolis: NR Ed, 2a ed, 2000.

GOMES, M. H. D. A.; BERTOLI, S. R. Auralization for classroom acoustics. 12<sup>th</sup> International Congress on Sound and Vibration. Anais...Lisboa: 12th International Congress on Sound and Vibration, 2005.

GREENLAND E. E., SHIELD B. M. A survey of acoustic conditions in semi-open plan classrooms in the United Kingdom. J. Acoust. Soc. Am. 2011;130(3):1399-410.

GRIGOLO, V. E.; OLIVEIRA, G. A. Análise de variância (ANOVA) em aplicações agroindustriais. XVII Seminário de Iniciação Científica e Tecnologia da UTFPR, 2012.

HODGSON, M.; NOSAL, E.-M. Effect of noise and occupancy on optimal reverberation times for speech intelligibility in classrooms. The Journal of the Acoustical Society of America, v. 111, n. 2, p. 931, 2002.

HUSTAD, K. C. A closer look at transcription intelligibility for speakers with dysarthria: evaluation of scoring paradigms and linguistic errors made by listeners. Am J Speech Lang Pathol. 2006; 15:268-77.

IEC 60268-16. Sound System Equipment - Part 16: Objective Rating of Speech Intelligibility by Speech Transmission Index. International Electrotechnical Commission: Geneva, Switzerland, 2020.

ISBERT, A. C. Diseño acústico de espacios arquitectónicos. UPC ed.Barcelona: [s.n.].

JARUSZEWSKA, K.; RYCHTARIKOVA, M.; WULFRANK T.; JABLONSKA J.; BOECK M. ArAc-Multibook of Architectural Acoustics. Energy Procedia, v. 78, p. 8-12, 2015.

JORDAN, V. L. Acoustical Criteria for Auditoriums and Their Relation to Model Techniques. J. Acoust. Soc. Amer., vol. 47, 408-412, 1970.

KENT, R. D.; WEISMER, G.; KENT, J. F.; ROSENBEK, J. C. Toward phonetic intelligibility testing in dysarthria. J Speech Hear Disord. 1989;54:482-99.

LARSON DAVIS (New York, USA). Reverberation Time Measurements: Understanding RT60 in Room Acoustics. 2021. Imagem. Disponível em: [LONG, M. Architectural Acoustics. California, USA: Elsevier Academic Press, 2006.](https://www.larsondavis.com/learn/building-acoustics/Reverberation-Time-in-Room-Acoustics#:~:text=If%20the%20time%20for%20the,is%20called%20a%20T30%20measurement. Acesso em: 15 jun. 2022.</a></p></div><div data-bbox=)

MARSHALL, L. G. An acoustics measurement program for evaluating auditoriums based on the early/late sound energy ratio. The Journal of the Acoustical Society of America, v. 96, n. 4, p. 2251-2261, 1994.

MATTOS, V. L. D. Identificação de efeitos de dispersão em experimentos com poucas replicações. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2004.

MEDEIROS, S. K.; SOUSA, M. M.; DE OLIVEIRA, E. L.. Análise Acústica Da Quadra Da Comunidade Católica Shalom De Mossoró. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciência e Tecnologia) - Universidade Federal Rural do Semi-Árido

MIR, S.H.; ABDU, A.A. Investigation of sound-absorbing material configuration of a smart classroom utilizing computer modeling. Building Acoustics, v.12, n.3, p.175–188, 2005.

MONTGOMERY, D. C. Design and Analysis of Experiments. 7th Ed., New York: Wiley, 2008, 656p.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros, 4.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

NASCIMENTO, E. O. Influência Dos Parâmetros Acústicos In Situ Na Avaliação Da Inteligibilidade Da Fala Em Salas De Aula Via Redes Neurais Artificiais. Orientador: Paulo Henrique Trombetta Zannin. 2019. 162 p. Dissertação (Pós - Graduação em Engenharia Mecânica) - UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ, [S. l.], 2019.

NESTORAS, C.; DANCE, S. The Interrelationship Between Room Acoustics Parameters as Measured in University Classrooms Using Four Source Configurations. Building Acoustics, v. 20, n. 1, p. 43-53, 2013.

PAIXAO, G. F. ; FAGUNDES NETO, M. G. . Projeto e Construção de um Tubo de Impedância para Medição do Coeficiente de Absorção Sonora pela ISO 10534-2:1998. In: 18º CONPEEX - Congresso de Pesquisa, Ensino e Extensão, 2021, Goiânia-GO. A transversalidade da ciência, tecnologia e inovações para o planeta. Goiânia-GO: Universidade Federal de Goiás, 2021. p. 1283-1283.

PASSERI JR, L. Acústica Arquitetônica de Auditórios, Teatros e Cinemas. Apostila (Curso de Acústica) – Câmara de Arquitetos e Consultores, São Paulo, 2005.

PEREIRA, R. N. Caracterização Acústica de Salas. [s.l.] Universidade Técnica de Lisboa, 2010.

RAEDER, A.; NAKAZATO, M. Study case on the acoustic quality of classrooms in Brazil. INTER-NOISE 2018 -47th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering: Impact of Noise Control Engineering, 2018.

ROMEIRO, C. M. Hardware para paralelização de Malhas de Guias de Ondas Digitais, Dissertação de mestrado apresentada ao programa e pós graduação. Universidade de Aveiro: Departamento de eletrônica, telecomunicações e informática, 2001.

ROSS, P. J. Aplicações das Técnicas Taguchi na Engenharia da Qualidade. Editora Makron, McGraw-Hill. São Paulo, 1991.

ROSSING, T. (Ed.). Springer handbook of acoustics. Springer Science & Business Media, 2007.

SHIN, K., HAMMOND, J. K., Fundamentals of Signal Processing for Sound and Vibration Engineers, John Wiley & Sons, 2008.

SILVA JR, R. S.; MILTÃO, M. S. R. O fenômeno acústico e o ensino médio: utilização de instrumentos musicais como incentivo para o ensino de acústica; o caso do cavaquinho. Caderno de Física da UFES, Feira de Santana-BA, vol. 13, nº 2, 1-36, jul-dez 2015.

SILVA, C. M. F. O Tempo de Reverberação e a Inteligibilidade da Palavra - Caso de estudo: salas de aula da FEUP. [s.l.] Universidade do Porto, Portugal, 2013.

SOUZA, I. K. Análise dos efeitos de forma e de absorção sonora em salas de aula retangulares utilizando simulação computacional. 2019. 200 p. Dissertação (mestrado) (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019.

VAN ECK, Nees; WALTMAN, Ludo. Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. Scientometrics, v. 84, n. 2, p. 523–538, 2009.

VIELLIARD, J. M. E., & SILVA, M. L. DA. 2010. Bioacústica - bases teóricas e regras práticas de uso em ornitologia. In: von Matter, S., Straube, F., Accordi, I., Piacentini, V. & Cândido-Jr., J. F. (Eds.), Ornitologia e Conservação: Ciência Aplicada, Técnicas de Pesquisa e Levantamento. pp. 313–326. Rio de Janeiro, RJ: Technical books.

VORAN, S. Estimation of Speech Intelligibility and Quality. In: Handbook of Signal Processing in Acoustics. Springer New York, 2008. p. 483–520.

## 8 APÊNDICE A – LEIAUTE DOS ENSAIOS

Leiaute ABCD. a) Disposição na parede direita b) Disposição na parede esquerda.



(a)

(b)

Leiaute ABCE. a) Disposição na parede direita b) Disposição na parede esquerda.



(a)

(b)

Leiaute ABCF. a) Disposição na parede direita b) Disposição na parede esquerda.



(a)

(b)

Leiaute ABDE. a) Disposição na parede direita b) Disposição na parede esquerda.



(a)

(b)

Leiaute ABDF. a) Disposição na parede direita b) Disposição na parede esquerda.



(a)

(b)

Leiaute ABEF. a) Disposição na parede direita b) Disposição na parede esquerda.



(a)

(b)

Leiaute ACDE. a) Disposição na parede direita b) Disposição na parede esquerda.



(a)

(b)

Leiaute ACDF. a) Disposição na parede direita b) Disposição na parede esquerda.



(a)

(b)

Leiaute ACEF. a) Disposição na parede direita b) Disposição na parede esquerda.



(a)

(b)

Leiaute ADEF. a) Disposição na parede direita b) Disposição na parede esquerda.



(a)

(b)

Leiaute BCDE. a) Disposição na parede direita b) Disposição na parede esquerda.



(a)

(b)

Leiaute BCDF. a) Disposição na parede direita b) Disposição na parede esquerda.



(a)

(b)

Leiaute BCEF. a) Disposição na parede direita b) Disposição na parede esquerda.



(a)

(b)

Leiaute BDEF. a) Disposição na parede direita b) Disposição na parede esquerda.



(a)

(b)

Leiaute CDEF. a) Disposição na parede direita b) Disposição na parede esquerda.



(a)

(b)

## 9 APÊNDICE B – ANÁLISE DE VARIÂNCIA

<b>Análise de Variância - T20 (125Hz)</b>					
<b>Fonte</b>	<b>GL</b>	<b>SQ (Aj.)</b>	<b>QM (Aj.)</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor-P</b>
<b>Modelo</b>	181	20,559	0,114	2,830	0,000
<b>Blocos</b>	2	0,539	0,269	6,720	0,001
<b>Linear</b>	20	9,171	0,459	11,440	0,000
<b>Configuração</b>	14	1,058	0,076	1,880	0,027
<b>Fonte</b>	1	4,505	4,505	112,340	0,000
<b>Receptor</b>	5	3,608	0,722	18,000	0,000
<b>Interações de 2 fatores</b>	89	7,675	0,086	2,150	0,000
<b>Configuração*Fonte</b>	14	1,630	0,116	2,900	0,000
<b>Configuração*Receptor</b>	70	3,910	0,056	1,390	0,029
<b>Fonte*Receptor</b>	5	2,135	0,427	10,650	0,000
<b>Interações de 3 fatores</b>	70	3,175	0,045	1,130	0,237
<b>Configuração*Fonte*Receptor</b>	70	3,175	0,045	1,130	0,237
<b>Erro</b>	358	14,355	0,040		
<b>Total</b>	539	34,914			

<b>Análise de Variância - T20 (250Hz)</b>					
<b>Fonte</b>	<b>GL</b>	<b>SQ (Aj.)</b>	<b>QM (Aj.)</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor-P</b>
<b>Modelo</b>	181	4,733	0,026	1,510	0,001
<b>Blocos</b>	2	0,014	0,007	0,390	0,677
<b>Linear</b>	20	0,869	0,043	2,510	0,000
<b>Configuração</b>	14	0,648	0,046	2,680	0,001
<b>Fonte</b>	1	0,108	0,108	6,250	0,013
<b>Receptor</b>	5	0,113	0,023	1,310	0,261
<b>Interações de 2 fatores</b>	89	2,147	0,024	1,390	0,019
<b>Configuração*Fonte</b>	14	0,406	0,029	1,670	0,059
<b>Configuração*Receptor</b>	70	1,509	0,022	1,250	0,104
<b>Fonte*Receptor</b>	5	0,233	0,047	2,690	0,021
<b>Interações de 3 fatores</b>	70	1,704	0,024	1,410	0,025
<b>Configuração*Fonte*Receptor</b>	70	1,704	0,024	1,410	0,025
<b>Erro</b>	358	6,191	0,017		
<b>Total</b>	539	10,924			

---

**Análise de Variância - T20 (500Hz)**


---

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
<b>Modelo</b>	<b>181</b>	1,919	0,011	1,780	0,000
<b>Blocos</b>	<b>2</b>	0,006	0,003	0,540	0,584
<b>Linear</b>	<b>20</b>	0,425	0,021	3,570	0,000
<b>Configuração</b>	<b>14</b>	0,348	0,025	4,170	0,000
<b>Fonte</b>	<b>1</b>	0,010	0,010	1,630	0,202
<b>Receptor</b>	<b>5</b>	0,068	0,014	2,290	0,045
<b>Interações de 2 fatores</b>	<b>89</b>	0,916	0,010	1,730	0,000
<b>Configuração*Fonte</b>	<b>14</b>	0,157	0,011	1,880	0,028
<b>Configuração*Receptor</b>	<b>70</b>	0,717	0,010	1,720	0,001
<b>Fonte*Receptor</b>	<b>5</b>	0,043	0,008	1,430	0,214
<b>Interações de 3 fatores</b>	<b>70</b>	0,570	0,008	1,370	0,036
<b>Configuração*Fonte*Receptor</b>	<b>70</b>	0,570	0,008	1,370	0,036
<b>Erro</b>	<b>358</b>	2,132	0,006		
<b>Total</b>	<b>539</b>	4,050			

---

**Análise de Variância - T20 (1000Hz)**


---

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
<b>Modelo</b>	<b>181</b>	0,524	0,003	1,880	0,000
<b>Blocos</b>	<b>2</b>	0,015	0,008	4,900	0,008
<b>Linear</b>	<b>20</b>	0,201	0,010	6,510	0,000
<b>Configuração</b>	<b>14</b>	0,192	0,014	8,900	0,000
<b>Fonte</b>	<b>1</b>	0,005	0,005	3,470	0,063
<b>Receptor</b>	<b>5</b>	0,003	0,001	0,440	0,818
<b>Interações de 2 fatores</b>	<b>89</b>	0,170	0,002	1,240	0,092
<b>Configuração*Fonte</b>	<b>14</b>	0,025	0,002	1,140	0,325
<b>Configuração*Receptor</b>	<b>70</b>	0,143	0,002	1,320	0,054
<b>Fonte*Receptor</b>	<b>5</b>	0,002	0,000	0,290	0,916
<b>Interações de 3 fatores</b>	<b>70</b>	0,138	0,002	1,280	0,080
<b>Configuração*Fonte*Receptor</b>	<b>70</b>	0,138	0,002	1,280	0,080
<b>Erro</b>	<b>358</b>	0,552	0,002		
<b>Total</b>	<b>539</b>	1,076			

---

**Análise de Variância - T20 (2000Hz)**


---

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
<b>Modelo</b>	<b>181</b>	0,322	0,002	2,080	0,000
<b>Blocos</b>	<b>2</b>	0,032	0,016	18,450	0,000
<b>Linear</b>	<b>20</b>	0,153	0,008	8,930	0,000
<b>Configuração</b>	<b>14</b>	0,147	0,011	12,300	0,000
<b>Fonte</b>	<b>1</b>	0,000	0,000	0,250	0,617
<b>Receptor</b>	<b>5</b>	0,005	0,001	1,220	0,298
<b>Interações de 2 fatores</b>	<b>89</b>	0,073	0,001	0,950	0,602
<b>Configuração*Fonte</b>	<b>14</b>	0,008	0,001	0,640	0,835
<b>Configuração*Receptor</b>	<b>70</b>	0,061	0,001	1,020	0,433
<b>Fonte*Receptor</b>	<b>5</b>	0,004	0,001	0,830	0,528
<b>Interações de 3 fatores</b>	<b>70</b>	0,065	0,001	1,090	0,299
<b>Configuração*Fonte*Receptor</b>	<b>70</b>	0,065	0,001	1,090	0,299
<b>Erro</b>	<b>358</b>	0,306	0,001		
<b>Total</b>	<b>539</b>	0,629			

---

**Análise de Variância - T20 (4000Hz)**


---

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
<b>Modelo</b>	<b>181</b>	0,158	0,001	2,330	0,000
<b>Blocos</b>	<b>2</b>	0,014	0,007	18,770	0,000
<b>Linear</b>	<b>20</b>	0,095	0,005	12,640	0,000
<b>Configuração</b>	<b>14</b>	0,082	0,006	15,690	0,000
<b>Fonte</b>	<b>1</b>	0,004	0,004	10,810	0,001
<b>Receptor</b>	<b>5</b>	0,008	0,002	4,490	0,001
<b>Interações de 2 fatores</b>	<b>89</b>	0,032	0,000	0,960	0,572
<b>Configuração*Fonte</b>	<b>14</b>	0,003	0,000	0,610	0,860
<b>Configuração*Receptor</b>	<b>70</b>	0,024	0,000	0,910	0,686
<b>Fonte*Receptor</b>	<b>5</b>	0,005	0,001	2,780	0,018
<b>Interações de 3 fatores</b>	<b>70</b>	0,017	0,000	0,640	0,989
<b>Configuração*Fonte*Receptor</b>	<b>70</b>	0,017	0,000	0,640	0,989
<b>Erro</b>	<b>358</b>	0,134	0,000		
<b>Total</b>	<b>539</b>	0,292			

**Análise de Variância – T30 (125Hz)**

<b>Fonte</b>	<b>GL</b>	<b>SQ (Aj.)</b>	<b>QM (Aj.)</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor-P</b>
<b>Modelo</b>	<b>181</b>	11,849	0,065	2,750	0,000
<b>Blocos</b>	<b>2</b>	0,488	0,244	10,240	0,000
<b>Linear</b>	<b>20</b>	5,664	0,283	11,890	0,000
<b>Configuração</b>	<b>14</b>	0,546	0,039	1,640	0,067
<b>Fonte</b>	<b>1</b>	2,347	2,347	98,550	0,000
<b>Receptor</b>	<b>5</b>	2,771	0,554	23,270	0,000
<b>Interações de 2 fatores</b>	<b>89</b>	3,626	0,041	1,710	0,000
<b>Configuração*Fonte</b>	<b>14</b>	0,661	0,047	1,980	0,018
<b>Configuração*Receptor</b>	<b>70</b>	2,068	0,030	1,240	0,109
<b>Fonte*Receptor</b>	<b>5</b>	0,897	0,179	7,530	0,000
<b>Interações de 3 fatores</b>	<b>70</b>	2,073	0,030	1,240	0,106
<b>Configuração*Fonte*Receptor</b>	<b>70</b>	2,073	0,030	1,240	0,106
<b>Erro</b>	<b>358</b>	8,526	0,024		
<b>Total</b>	<b>539</b>	20,376			

**Análise de Variância – T30 (250Hz)**

<b>Fonte</b>	<b>GL</b>	<b>SQ (Aj.)</b>	<b>QM (Aj.)</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor-P</b>
<b>Modelo</b>	<b>181</b>	3,561	0,020	2,270	0,000
<b>Blocos</b>	<b>2</b>	0,018	0,009	1,030	0,358
<b>Linear</b>	<b>20</b>	1,131	0,057	6,540	0,000
<b>Configuração</b>	<b>14</b>	0,686	0,049	5,660	0,000
<b>Fonte</b>	<b>1</b>	0,118	0,118	13,660	0,000
<b>Receptor</b>	<b>5</b>	0,327	0,065	7,550	0,000
<b>Interações de 2 fatores</b>	<b>89</b>	1,464	0,016	1,900	0,000
<b>Configuração*Fonte</b>	<b>14</b>	0,286	0,020	2,360	0,004
<b>Configuração*Receptor</b>	<b>70</b>	1,108	0,016	1,830	0,000
<b>Fonte*Receptor</b>	<b>5</b>	0,070	0,014	1,610	0,157
<b>Interações de 3 fatores</b>	<b>70</b>	0,949	0,014	1,570	0,005
<b>Configuração*Fonte*Receptor</b>	<b>70</b>	0,949	0,014	1,570	0,005
<b>Erro</b>	<b>358</b>	3,098	0,009		
<b>Total</b>	<b>539</b>	6,659			

**Análise de Variância – T30 (500Hz)**

<b>Fonte</b>	<b>GL</b>	<b>SQ (Aj.)</b>	<b>QM (Aj.)</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor-P</b>
<b>Modelo</b>	<b>181</b>	0,864	0,005	2,060	0,000
<b>Blocos</b>	<b>2</b>	0,004	0,002	0,810	0,447
<b>Linear</b>	<b>20</b>	0,323	0,016	6,980	0,000
<b>Configuração</b>	<b>14</b>	0,221	0,016	6,820	0,000
<b>Fonte</b>	<b>1</b>	0,033	0,033	14,140	0,000
<b>Receptor</b>	<b>5</b>	0,069	0,014	6,000	0,000
<b>Interações de 2 fatores</b>	<b>89</b>	0,317	0,004	1,540	0,003
<b>Configuração*Fonte</b>	<b>14</b>	0,045	0,003	1,380	0,160
<b>Configuração*Receptor</b>	<b>70</b>	0,246	0,004	1,520	0,008
<b>Fonte*Receptor</b>	<b>5</b>	0,026	0,005	2,280	0,047
<b>Interações de 3 fatores</b>	<b>70</b>	0,220	0,003	1,360	0,039
<b>Configuração*Fonte*Receptor</b>	<b>70</b>	0,220	0,003	1,360	0,039
<b>Erro</b>	<b>358</b>	0,827	0,002		
<b>Total</b>	<b>539</b>	1,691			

**Análise de Variância – T30 (1000Hz)**

<b>Fonte</b>	<b>GL</b>	<b>SQ (Aj.)</b>	<b>QM (Aj.)</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor-P</b>
<b>Modelo</b>	<b>181</b>	0,328	0,002	3,320	0,000
<b>Blocos</b>	<b>2</b>	0,011	0,005	10,020	0,000
<b>Linear</b>	<b>20</b>	0,199	0,010	18,210	0,000
<b>Configuração</b>	<b>14</b>	0,192	0,014	25,120	0,000
<b>Fonte</b>	<b>1</b>	0,005	0,005	9,210	0,003
<b>Receptor</b>	<b>5</b>	0,002	0,000	0,690	0,632
<b>Interações de 2 fatores</b>	<b>89</b>	0,073	0,001	1,500	0,005
<b>Configuração*Fonte</b>	<b>14</b>	0,023	0,002	3,060	0,000
<b>Configuração*Receptor</b>	<b>70</b>	0,044	0,001	1,140	0,217
<b>Fonte*Receptor</b>	<b>5</b>	0,006	0,001	2,120	0,063
<b>Interações de 3 fatores</b>	<b>70</b>	0,045	0,001	1,170	0,179
<b>Configuração*Fonte*Receptor</b>	<b>70</b>	0,045	0,001	1,170	0,179
<b>Erro</b>	<b>358</b>	0,196	0,001		
<b>Total</b>	<b>539</b>	0,524			

**Análise de Variância – T30 (2000Hz)**

<b>Fonte</b>	<b>GL</b>	<b>SQ (Aj.)</b>	<b>QM (Aj.)</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor-P</b>
<b>Modelo</b>	<b>181</b>	0,220	0,001	3,010	0,000
<b>Blocos</b>	<b>2</b>	0,041	0,021	51,170	0,000
<b>Linear</b>	<b>20</b>	0,136	0,007	16,800	0,000
<b>Configuração</b>	<b>14</b>	0,132	0,009	23,360	0,000
<b>Fonte</b>	<b>1</b>	0,000	0,000	0,530	0,467
<b>Receptor</b>	<b>5</b>	0,003	0,001	1,710	0,131
<b>Interações de 2 fatores</b>	<b>89</b>	0,024	0,000	0,670	0,989
<b>Configuração*Fonte</b>	<b>14</b>	0,002	0,000	0,390	0,976
<b>Configuração*Receptor</b>	<b>70</b>	0,021	0,000	0,740	0,936
<b>Fonte*Receptor</b>	<b>5</b>	0,001	0,000	0,400	0,847
<b>Interações de 3 fatores</b>	<b>70</b>	0,019	0,000	0,680	0,974
<b>Configuração*Fonte*Receptor</b>	<b>70</b>	0,019	0,000	0,680	0,974
<b>Erro</b>	<b>358</b>	0,144	0,000		
<b>Total</b>	<b>539</b>	0,364			

**Análise de Variância – T30 (4000Hz)**

<b>Fonte</b>	<b>GL</b>	<b>SQ (Aj.)</b>	<b>QM (Aj.)</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor-P</b>
<b>Modelo</b>	<b>181</b>	0,131	0,001	3,340	0,000
<b>Blocos</b>	<b>2</b>	0,017	0,009	39,450	0,000
<b>Linear</b>	<b>20</b>	0,091	0,005	20,990	0,000
<b>Configuração</b>	<b>14</b>	0,083	0,006	27,470	0,000
<b>Fonte</b>	<b>1</b>	0,003	0,003	15,370	0,000
<b>Receptor</b>	<b>5</b>	0,004	0,001	3,990	0,002
<b>Interações de 2 fatores</b>	<b>89</b>	0,014	0,000	0,730	0,962
<b>Configuração*Fonte</b>	<b>14</b>	0,002	0,000	0,600	0,865
<b>Configuração*Receptor</b>	<b>70</b>	0,011	0,000	0,730	0,948
<b>Fonte*Receptor</b>	<b>5</b>	0,001	0,000	1,170	0,325
<b>Interações de 3 fatores</b>	<b>70</b>	0,009	0,000	0,570	0,997
<b>Configuração*Fonte*Receptor</b>	<b>70</b>	0,009	0,000	0,570	0,997
<b>Erro</b>	<b>358</b>	0,077	0,000		
<b>Total</b>	<b>539</b>	0,208			

---

**Análise de Variância – EDT (125Hz)**


---

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
<b>Modelo</b>	<b>181</b>	91,800	0,507	1,680	0,000
<b>Blocos</b>	<b>2</b>	0,893	0,446	1,480	0,229
<b>Linear</b>	<b>20</b>	34,851	1,743	5,780	0,000
<b>Configuração</b>	<b>14</b>	3,200	0,229	0,760	0,714
<b>Fonte</b>	<b>1</b>	3,695	3,695	12,260	0,001
<b>Receptor</b>	<b>5</b>	27,956	5,591	18,550	0,000
<b>Interações de 2 fatores</b>	<b>89</b>	36,375	0,409	1,360	0,028
<b>Configuração*Fonte</b>	<b>14</b>	4,552	0,325	1,080	0,375
<b>Configuração*Receptor</b>	<b>70</b>	21,059	0,301	1,000	0,487
<b>Fonte*Receptor</b>	<b>5</b>	10,764	2,153	7,140	0,000
<b>Interações de 3 fatores</b>	<b>70</b>	19,680	0,281	0,930	0,630
<b>Configuração*Fonte*Receptor</b>	<b>70</b>	19,680	0,281	0,930	0,630
<b>Erro</b>	<b>358</b>	107,900	0,301		
<b>Total</b>	<b>539</b>	199,699			

---

**Análise de Variância – EDT (250Hz)**


---

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
<b>Modelo</b>	<b>181</b>	28,064	0,155	1,640	0,000
<b>Blocos</b>	<b>2</b>	0,161	0,081	0,850	0,428
<b>Linear</b>	<b>20</b>	4,866	0,243	2,570	0,000
<b>Configuração</b>	<b>14</b>	1,350	0,096	1,020	0,433
<b>Fonte</b>	<b>1</b>	0,697	0,697	7,360	0,007
<b>Receptor</b>	<b>5</b>	2,818	0,564	5,950	0,000
<b>Interações de 2 fatores</b>	<b>89</b>	14,975	0,168	1,780	0,000
<b>Configuração*Fonte</b>	<b>14</b>	2,233	0,159	1,680	0,057
<b>Configuração*Receptor</b>	<b>70</b>	9,350	0,134	1,410	0,024
<b>Fonte*Receptor</b>	<b>5</b>	3,392	0,678	7,170	0,000
<b>Interações de 3 fatores</b>	<b>70</b>	8,062	0,115	1,220	0,131
<b>Configuração*Fonte*Receptor</b>	<b>70</b>	8,062	0,115	1,220	0,131
<b>Erro</b>	<b>358</b>	33,891	0,095		
<b>Total</b>	<b>539</b>	61,954			

**Análise de Variância – EDT (500Hz)**

<b>Fonte</b>	<b>GL</b>	<b>SQ (Aj.)</b>	<b>QM (Aj.)</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor-P</b>
<b>Modelo</b>	<b>181</b>	<b>7,473</b>	<b>0,041</b>	<b>1,470</b>	<b>0,001</b>
<b>Blocos</b>	<b>2</b>	<b>0,320</b>	<b>0,160</b>	<b>5,690</b>	<b>0,004</b>
<b>Linear</b>	<b>20</b>	<b>1,386</b>	<b>0,069</b>	<b>2,470</b>	<b>0,001</b>
<b>Configuração</b>	<b>14</b>	<b>0,670</b>	<b>0,048</b>	<b>1,700</b>	<b>0,053</b>
<b>Fonte</b>	<b>1</b>	<b>0,075</b>	<b>0,075</b>	<b>2,670</b>	<b>0,103</b>
<b>Receptor</b>	<b>5</b>	<b>0,641</b>	<b>0,128</b>	<b>4,560</b>	<b>0,000</b>
<b>Interações de 2 fatores</b>	<b>89</b>	<b>3,760</b>	<b>0,042</b>	<b>1,500</b>	<b>0,005</b>
<b>Configuração*Fonte</b>	<b>14</b>	<b>0,393</b>	<b>0,028</b>	<b>1,000</b>	<b>0,453</b>
<b>Configuração*Receptor</b>	<b>70</b>	<b>2,487</b>	<b>0,036</b>	<b>1,260</b>	<b>0,090</b>
<b>Fonte*Receptor</b>	<b>5</b>	<b>0,879</b>	<b>0,176</b>	<b>6,260</b>	<b>0,000</b>
<b>Interações de 3 fatores</b>	<b>70</b>	<b>2,007</b>	<b>0,029</b>	<b>1,020</b>	<b>0,440</b>
<b>Configuração*Fonte*Receptor</b>	<b>70</b>	<b>2,007</b>	<b>0,029</b>	<b>1,020</b>	<b>0,440</b>
<b>Erro</b>	<b>358</b>	<b>10,059</b>	<b>0,028</b>		
<b>Total</b>	<b>539</b>	<b>17,532</b>			

**Análise de Variância – EDT (1000Hz)**

<b>Fonte</b>	<b>GL</b>	<b>SQ (Aj.)</b>	<b>QM (Aj.)</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor-P</b>
<b>Modelo</b>	<b>181</b>	<b>2,215</b>	<b>0,012</b>	<b>1,640</b>	<b>0,000</b>
<b>Blocos</b>	<b>2</b>	<b>0,013</b>	<b>0,007</b>	<b>0,880</b>	<b>0,415</b>
<b>Linear</b>	<b>20</b>	<b>0,664</b>	<b>0,033</b>	<b>4,440</b>	<b>0,000</b>
<b>Configuração</b>	<b>14</b>	<b>0,475</b>	<b>0,034</b>	<b>4,540</b>	<b>0,000</b>
<b>Fonte</b>	<b>1</b>	<b>0,099</b>	<b>0,099</b>	<b>13,240</b>	<b>0,000</b>
<b>Receptor</b>	<b>5</b>	<b>0,090</b>	<b>0,018</b>	<b>2,420</b>	<b>0,036</b>
<b>Interações de 2 fatores</b>	<b>89</b>	<b>0,971</b>	<b>0,011</b>	<b>1,460</b>	<b>0,009</b>
<b>Configuração*Fonte</b>	<b>14</b>	<b>0,071</b>	<b>0,005</b>	<b>0,680</b>	<b>0,793</b>
<b>Configuração*Receptor</b>	<b>70</b>	<b>0,762</b>	<b>0,011</b>	<b>1,460</b>	<b>0,015</b>
<b>Fonte*Receptor</b>	<b>5</b>	<b>0,137</b>	<b>0,027</b>	<b>3,680</b>	<b>0,003</b>
<b>Interações de 3 fatores</b>	<b>70</b>	<b>0,567</b>	<b>0,008</b>	<b>1,080</b>	<b>0,314</b>
<b>Configuração*Fonte*Receptor</b>	<b>70</b>	<b>0,567</b>	<b>0,008</b>	<b>1,080</b>	<b>0,314</b>
<b>Erro</b>	<b>358</b>	<b>2,676</b>	<b>0,007</b>		
<b>Total</b>	<b>539</b>	<b>4,892</b>			

**Análise de Variância – EDT (2000Hz)**

<b>Fonte</b>	<b>GL</b>	<b>SQ (Aj.)</b>	<b>QM (Aj.)</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor-P</b>
<b>Modelo</b>	<b>181</b>	1,186	0,007	1,280	0,024
<b>Blocos</b>	<b>2</b>	0,018	0,009	1,800	0,168
<b>Linear</b>	<b>20</b>	0,241	0,012	2,360	0,001
<b>Configuração</b>	<b>14</b>	0,172	0,012	2,400	0,003
<b>Fonte</b>	<b>1</b>	0,000	0,000	0,050	0,828
<b>Receptor</b>	<b>5</b>	0,069	0,014	2,700	0,021
<b>Interações de 2 fatores</b>	<b>89</b>	0,520	0,006	1,140	0,197
<b>Configuração*Fonte</b>	<b>14</b>	0,092	0,007	1,290	0,212
<b>Configuração*Receptor</b>	<b>70</b>	0,329	0,005	0,920	0,654
<b>Fonte*Receptor</b>	<b>5</b>	0,099	0,020	3,870	0,002
<b>Interações de 3 fatores</b>	<b>70</b>	0,407	0,006	1,140	0,222
<b>Configuração*Fonte*Receptor</b>	<b>70</b>	0,407	0,006	1,140	0,222
<b>Erro</b>	<b>358</b>	1,826	0,005		
<b>Total</b>	<b>539</b>	3,012			

**Análise de Variância – EDT (4000Hz)**

<b>Fonte</b>	<b>GL</b>	<b>SQ (Aj.)</b>	<b>QM (Aj.)</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor-P</b>
<b>Modelo</b>	<b>181</b>	0,861	0,005	2,260	0,000
<b>Blocos</b>	<b>2</b>	0,009	0,004	2,060	0,129
<b>Linear</b>	<b>20</b>	0,312	0,016	7,410	0,000
<b>Configuração</b>	<b>14</b>	0,118	0,008	4,010	0,000
<b>Fonte</b>	<b>1</b>	0,043	0,043	20,620	0,000
<b>Receptor</b>	<b>5</b>	0,150	0,030	14,270	0,000
<b>Interações de 2 fatores</b>	<b>89</b>	0,381	0,004	2,030	0,000
<b>Configuração*Fonte</b>	<b>14</b>	0,025	0,002	0,840	0,628
<b>Configuração*Receptor</b>	<b>70</b>	0,169	0,002	1,150	0,214
<b>Fonte*Receptor</b>	<b>5</b>	0,187	0,037	17,810	0,000
<b>Interações de 3 fatores</b>	<b>70</b>	0,159	0,002	1,080	0,321
<b>Configuração*Fonte*Receptor</b>	<b>70</b>	0,159	0,002	1,080	0,321
<b>Erro</b>	<b>358</b>	0,753	0,002		
<b>Total</b>	<b>539</b>	1,614			