



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO

Carolina Zandavalli Maluf de Araujo

**Avaliação de salas de aula em ambiente universitário: perspectivas de projeto
para condicionamento acústico**

Florianópolis
2025

Carolina Zandavalli Maluf de Araujo

**Avaliação de salas de aula em ambiente universitário: perspectivas de projeto
para condicionamento acústico**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo (Pós-ARQ) da Universidade Federal de Santa Catarina para obtenção do título de Mestre em Arquitetura e Urbanismo.

Orientador(a): Prof. Dr. Fernando Simon Westphal

Florianópolis

2025

Ficha catalográfica gerada por meio de sistema automatizado gerenciado pela BU/UFSC.

Dados inseridos pelo próprio autor.

Zandavalli, Carolina

Avaliação de salas de aula em ambiente universitário:
perspectivas de projeto para condicionamento acústico /
Carolina Zandavalli ; orientador, Fernando Simon Westphal,
2025.

114 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em
Arquitetura e Urbanismo, Florianópolis, 2025.

Inclui referências.

1. Arquitetura e Urbanismo. 2. Acústica de salas. 3.
salas de aula. I. Westphal, Fernando Simon. II.
Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-
Graduação em Arquitetura e Urbanismo. III. Título.

Carolina Zandavalli Maluf de Araujo

**Avaliação de salas de aula em ambiente universitário: perspectivas de projeto
para condicionamento acústico**

O presente trabalho em nível de Mestrado foi avaliado e aprovado, em 29 de agosto de 2025, pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof.(a) Maria Fernanda de Oliveira, Dra.
Universidade Estadual de Campinas

Prof. Martin Gabriel Ordenes Mizgier, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Certificamos que esta é a versão original e final do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de Mestre em Arquitetura e Urbanismo.



Documento assinado digitalmente
Maira Longhinotti Felipe
Data: 16/09/2025 11:12:42-0300
CPF: ***.406.999-**
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Coordenação do Programa de Pós-Graduação



Documento assinado digitalmente
Fernando Simon Westphal
Data: 16/09/2025 15:37:42-0300
CPF: ***.834.649-**
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof. Fernando Simon Westphal, Dr.
Orientador

Florianópolis, 2025

Dedico esse trabalho a minha família e todas as acústicas e
acústicos que se dedicam a “ouvir” os espaços.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todas as pessoas que dedicaram um pouco de seu tempo para contribuir com essa pesquisa, funcionários da UFSC, alunos e professores.

Ao professor Dr. Fernando Simon Westphal por toda a trajetória de orientação do trabalho e ajuda com os equipamentos, autorizações, transporte e procedimento de cada medição *in-loco*.

À professora Dra. Maria Fernanda de Oliveira, por todo aprendizado e disponibilidade quando fui aluna especial na Unicamp e posteriormente como membro da banca de defesa. Agradecimentos também ao prof. Dr. Martin Ordenes Mizgier pelo aceite e contribuições na banca de defesa e aos professores Dr. Rafael Prado Cartana e Dra. Bianca Carla Dantas Araujo, respectivamente na banca de qualificação.

Aos colegas e professores do Pós-ARQ, pelo conhecimento compartilhado e aos colegas do Labcon, por todo o apoio e parceria.

À Carla, exemplo de mãe e professora, quem me mostrou desde cedo o universo acadêmico e os caminhos de uma universidade, mesmo que pequena eu não passasse pela catraca.

À minha irmã Camila pela compreensão e parceria nos momentos essenciais.

A todos os familiares que acreditaram em mim e deixaram suas mensagens de apoio durante essa jornada.

E a cada acústica e acústico que acredita em espaços melhores pensando no conforto e na qualidade sonora.

RESUMO

A acústica nas salas de aula, essencial para um ambiente de aprendizado eficaz, está diretamente relacionada às dimensões e à geometria do espaço de ensino. Esse tem o propósito de propiciar a transmissão de conteúdo, abrangendo como principal atividade o uso da palavra falada. O presente trabalho teve como objetivo avaliar o condicionamento acústico de salas de aula da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), por meio de medições *in loco*, cálculos e simulações computacionais. Foram identificadas amostras de salas de aula padrão, utilizando como critério a taxa de ocupação de alunos. O ruído residual e o tempo de reverberação foram medidos, conforme a norma ABNT ISO 3382 o que permitiu a validação dos modelos digitais simulados no software I-Simpa e obtenção do parâmetro $D_{(50)}$. As salas avaliadas apresentaram condição acústica insatisfatória, com tempo de reverberação acima de 1,0 segundo, em desacordo com as normas técnicas. Foram propostas e simuladas intervenções para a correção da qualidade acústica, visando adequar as salas aos valores recomendados pelas normas ABNT NBR 12179 e DIN 18041. As estratégias de tratamento com painéis perfurados e baffles lineares demonstraram resultados satisfatórios, alcançando níveis de tempo de reverberação abaixo de 0,6 segundos nas faixas de frequência relevantes para a fala (500Hz – 2000Hz).

Palavras-chave: Condicionamento acústico, acústica de salas, sala de aula, tempo de reverberação.

ABSTRACT

Acoustics in classrooms, essential for an effective learning environment, are directly related to the dimensions and geometry of the teaching space. The purpose of this is to facilitate the transmission of content, with the use of the spoken word as the primary activity. The present work aimed to evaluate the acoustic conditioning of classrooms at the Federal University of Santa Catarina (UFSC) through *in-situ* measurements, calculations, and computational simulations. Standard classroom samples were identified, using the student occupancy rate as a criterion. The background noise and reverberation time were measured, according to the ABNT ISO 3382 standard, which allowed for the validation of digital models simulated in the I-Simpa software and the acquisition of the D_{50} parameter. The evaluated classrooms showed unsatisfactory acoustic conditions, with a reverberation time above 1,0 second, in disagreement with technical standards. Interventions to correct the acoustic quality were proposed and simulated, aiming to adapt the rooms to the values recommended by the ABNT NBR 12179 and DIN 18041 standards. The treatment strategies with perforated panels and linear baffles showed satisfactory results, reaching reverberation time levels below 0,6 seconds in the relevant frequency ranges for speech (500Hz - 2000Hz).

Keywords: Acoustic conditioning, room acoustics, classroom, reverberation time.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Referência de TR da NBR 12179 (1992)	24
Figura 2. Área de Bolt	30
Figura 3. Exemplo de dimensionamento de salas a partir de Bolt (1946)	31
Figura 4. Esquema gráfico da elaboração da <i>string</i> de busca.....	33
Figura 5. Diagrama de Fluxo PRISMA	36
Figura 6. Mapa coroplético da população da Revisão Sistemática PRISMA 2020....	40
Figura 7. Diagrama metodológico da dissertação	54
Figura 8. Localização das salas de aula	57
Figura 9. Prédio do Centro Tecnológico (CTC)	58
Figura 10. Departamento de Ciências Socioeconômicas (CSE)	58
Figura 11. Departamento de Ciências Jurídicas (CCJ)	59
Figura 12. Departamento de Ciências Humanas e Filosóficas (CFH)	59
Figura 13. Salas de aula	60
Figura 14. Esquema dos métodos de medição <i>in loco</i>	63
Figura 15. Registros fotográficos das medições <i>in loco</i> (Salas CSE111 e CFH334)	65
Figura 16. Locação de pontos salas do CTC	65
Figura 17. Locação dos pontos das salas do CSE	66
Figura 18. Locação dos pontos sala do CCJ.....	66
Figura 19. Locação dos pontos da sala do CFH	67
Figura 20. Diagrama de etapas da simulação computacional	68
Figura 21. Modelagem no Sketchup e modelo importado para o I-SIMPA.....	69
Figura 22. Desenho esquemático do sistema de painel acústico perfurado	93
Figura 23. Desenho esquemático do sistema dos baffles lineares.....	93
Figura 24. Desenho esquemático do sistema dos forros acústicos.....	94
Figura 25. Planta e corte da solução de tratamento da Sala EEL010	95
Figura 26. Planta e corte da solução de tratamento da Sala CSE111	97
Figura 27. Planta e corte da solução de tratamento da Sala CSE106	98
Figura 28. Planta e corte da solução de tratamento da Sala CCJ003.....	99
Figura 29. Planta e corte da solução de tratamento da Sala CTC204	101
Figura 30. Planta e corte da solução de tratamento Sala CFH334	102

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Relação de trabalhos e foco de avaliação	51
Gráfico 2. Relação de ocorrências de salas de aula por capacidade de alunos	56
Gráfico 3. Área de Bolt X Proporções das salas de aula da UFSC	74
Gráfico 4. Distribuição modal	75
Gráfico 5. Métodos de ensaio x TR ótimo	78
Gráfico 6. Resultados TR por configuração de Fonte e Microfone	79
Gráfico 7. TR (médio) salas de aula – medição in loco	81
Gráfico 8. Ruído residual	82
Gráfico 9. Valores de JND Médios para 500Hz e 2000Hz	84
Gráfico 10. Definição (D_{50}) – I-SIMPA	85
Gráfico 11. ALCons%	87
Gráfico 12. Relação Sinal-Ruído (SNR) por sala e distância da fonte (m)	88
Gráfico 13. TR Corrigido Sala EEL010	96
Gráfico 14. TR Corrigido Sala CSE111	96
Gráfico 15. TR Corrigido Sala CSE106	98
Gráfico 16. TR Corrigido Sala CCJ003	100
Gráfico 17. TR Corrigido Sala CTC204	100
Gráfico 18. TR Corrigido Sala CFH334	102
Gráfico 19. D_{50} após tratamento	103
Gráfico 20. Valores de T_{30} ensaiados x simulados	114

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Critérios de elegibilidade dos estudos selecionados	35
Quadro 2. Síntese da revisão de literatura	53
Quadro 3. Materiais construtivos das salas de aula	61
Quadro 4. Equipamentos para medições <i>in loco</i>	63
Quadro 5. Valores de referência para JND	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Tempo ótimo de reverberação para palavra falada	24
Tabela 2. Resumo dos resultados.....	37
Tabela 3. Levantamento de Teses e Dissertações	49
Tabela 4: Exemplos de salas de aula	56
Tabela 5. Variáveis climatológicas externas.....	67
Tabela 6. Coeficientes de absorção dos materiais.....	70
Tabela 7. Coeficientes de espalhamento dos materiais	70
Tabela 8. TR ótimo mínimo para salas ocupadas e desocupadas	72
Tabela 9. Proporções das salas e Frequência de Shroeder	75
Tabela 10. Valores de T_{60} calculado	76
Tabela 11. Resultados de TR simulados.....	84
Tabela 12. Coeficientes de absorção dos materiais de tratamento	94
Tabela 13. Comparativo TR antes e depois	104
Tabela 14. Valores de T_{30} medidos - Ruído interrompido	113
Tabela 15. Valores de T_{30} medidos - Ruído impulsivo	113

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

IEC	International Electrotechnical Commission
ISO	International Organization for Standardization
NBR	Norma Brasileira
DIN	Deutsches Institut Für Normung
UNI	Ente Italiano di Normazione
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
TR	Tempo de Reverberação (s)
EDT	International Organization for Standardization
D ₅₀	Definição (%)
C ₅₀	Clareza (%)
JND	Just Noticeable Difference ou Limiar Diferenciável (unidade)
STI	Speech Intelligibility Index ou Índice de Inteligibilidade da Fala
NPS	Sound Pressure Level ou Nível de Pressão Sonora (dB)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	17
1.1	OBJETIVOS	18
1.1.1	Objetivo Geral.....	19
1.1.2	Objetivos Específicos	19
1.2	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	19
2	CONDICIONAMENTO ACÚSTICO EM SALAS DE AULA	21
2.1	NORMAS E REGULAMENTAÇÕES SOBRE CONDICIONAMENTO ACÚSTICO DE SALAS	21
2.2	PARÂMETROS ACÚSTICOS PARA AVALIAÇÃO DE SALAS DE AULA ..	22
2.2.1	Tempo de reverberação.....	22
2.2.2	Ruído residual	25
2.2.3	Definição (D50).....	25
2.2.4	Inteligibilidade da fala.....	26
2.2.4.1	<i>Perda da fala (AICons%)</i>	<i>26</i>
2.2.4.2	<i>Relação sinal-ruído (SNR).....</i>	<i>27</i>
2.3	AVALIAÇÃO COM BASE EM FUNDAMENTOS DA ACÚSTICA PARA SALAS DE DIMENSÕES REGULARES	28
2.3.1	Métodos de dimensionamento e distribuição modal.....	30
2.3.1.1	<i>Carta de Bolt</i>	<i>30</i>
2.3.1.2	<i>Crítérios de Bonello</i>	<i>31</i>
2.3.2	Frequência de Schroeder	32
2.3.3	Considerações sobre os modos normais para salas de aula	32
3	REVISÃO DE LITERATURA	33
3.1	REVISÃO SISTEMÁTICA UTILIZANDO O MÉTODO PRISMA 2020	34
3.1.1	Crítérios de elegibilidade	34
3.1.2	Busca literária	35
3.1.3	Extração e análise dos dados	36
3.1.4	Resultados.....	36
3.1.4.1	<i>População</i>	<i>40</i>
3.1.4.2	<i>Avaliações objetivas e subjetivas</i>	<i>40</i>
3.1.4.3	<i>Avaliações com métodos integrados</i>	<i>41</i>
3.1.4.4	<i>Avaliação de condicionamento acústico de salas de aula.....</i>	<i>41</i>

3.1.4.5	<i>Ênfase no processo de obtenção de parâmetros acústicos</i>	42
3.1.4.6	<i>Testes com intervenções e comparativo de materiais</i>	44
3.1.4.7	<i>Considerações de saúde do usuário</i>	46
3.1.4.8	<i>Considerações econômicas</i>	48
3.2	LEVANTAMENTO DE TESES E DISSERTAÇÕES NO BRASIL	49
3.2.1	Conclusões acerca da revisão de literatura	52
4	METODOLOGIA	54
4.1	LEVANTAMENTO E SELEÇÃO DAS SALAS DE AULA	55
4.1.1	Seleção de amostras de salas de aula	55
4.1.2	Características arquitetônicas das salas e prédios	57
4.2	MEDIÇÕES ACÚSTICAS <i>IN LOCO</i>	61
4.2.1	Medição do ruído residual	61
4.2.2	Medição do Tempo de reverberação (T_{30})	62
4.2.3	Equipamentos	63
4.2.4	Posições de microfones e fontes sonoras	64
4.2.5	Medições do estudo-piloto	64
4.2.6	Medições <i>in loco</i>	65
4.2.6.1	<i>Aspectos ambientais do local</i>	67
4.3	SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS	67
4.3.1	Modelagem das salas	68
4.3.2	Coeficientes de Absorção	69
4.3.3	Coeficientes de Espalhamento	70
4.3.4	Just Noticeable Differences (JND)	71
4.3.5	Correção do Tempo de Reverberação para salas ocupadas e vazias ..	72
5	RESULTADOS	73
5.1	AVALIAÇÃO ANALÍTICA COM BASE NAS DIMENSÕES E TEMPO DE REVERBERAÇÃO DAS SALAS DE AULA	73
5.1.1	Gráfico de Bolt	73
5.1.2	Cálculo dos modos normais e critérios de Bonello	74
5.1.3	Frequência de Schroeder	75
5.1.4	Tempo de Reverberação Calculado	76
5.2	ESTUDO-PILOTO	77
5.2.1	Resultados dos métodos comparados com TR ótimo	77
5.3	MEDIÇÕES <i>IN LOCO</i>	78

5.3.1	Tempo de reverberação medido (T_{30})	79
5.3.2	Ruído residual	81
5.4	SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS	83
5.4.1	Resultados simulados de Tempo de Reverberação (T_{30})	83
5.4.2	Validação da simulação com base no JND	84
5.5	DEFINIÇÃO (D_{50})	85
5.6	INTELIGIBILIDADE DA FALA	86
5.6.1	Análise da Perda de Articulação de Consoantes (ALCons%)	86
5.6.2	Relação Sinal-Ruído (SNR)	87
5.7	CONSIDERAÇÕES ACERCA DOS RESULTADOS	89
6	PROPOSTAS DE INTERVENÇÃO	90
6.1	ESTRATÉGIAS DE CORREÇÃO	90
6.1.1	Painéis de madeira perfurados	90
6.1.2	Baffles lineares	91
6.1.3	Forros acústicos	92
6.1.4	Propriedades e aplicação	92
6.2	PROPOSTAS DE CORREÇÃO	94
6.2.1	Correção da sala EEL010	95
6.2.2	Correção da sala CSE111	96
6.2.3	Correção da sala CSE106	97
6.2.4	Correção da sala CCJ003	99
6.2.5	Correção da sala CTC204	100
6.2.6	Correção da sala da Sala CFH334	101
6.3	VALORES D_{50} SIMULADOS COM TRATAMENTO	103
6.4	ANTES E DEPOIS DAS PROPOSTAS DE CORREÇÃO	103
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	105
7.1	LIMITAÇÕES DA PESQUISA	106
7.2	TRABALHOS FUTUROS	106
	REFERÊNCIAS	107
	ANEXO A – RESULTADOS DO ESTUDO-PILOTO	113

1 INTRODUÇÃO

A arquitetura quando associada ao estudo do desempenho e conforto nos ambientes construídos, viabiliza a realização de atividades com qualidade e produtividade. No âmbito desses temas pontua-se o condicionamento acústico como necessário não só em projetos que comportam atividades musicais, apresentações e estúdios de gravação, mas principalmente, espaços de aprendizagem como as salas de aula (Pinho et al. (2016).

Para a avaliação desses espaços internos, é preciso analisar os principais fatores que influenciam no comportamento sonoro e que conseqüentemente, podem afetar a integridade da mensagem transmitida. Isso requer um olhar atento no processo de desenvolvimento do projeto arquitetônico, que envolve o dimensionamento, escolha de materiais e sistemas construtivos que podem potencializar ou dificultar a distribuição do som (Levandoski; Zannin, 2022).

A palavra falada, por sua vez, exerce uma função primordial de trabalho dentro de uma sala de aula, sendo a principal fonte de transmissão do conhecimento. Uma satisfatória apreensão da fala significa que o som chega ao ouvinte sem distorções, havendo inteligibilidade (Ikeda, 2019).

Uma sala ruidosa, no entanto, com excesso de reflexão e pouca absorção do som, compromete não só a compreensão da fala, mas sim toda a dinâmica escolar de alunos e professores, prejudicando o desempenho acadêmico e a saúde da voz (Ikeda, 2019).

Isso pede atenção principalmente em relação à quantidade de materiais altamente reflexivos numa sala de aula convencional, visto a não exigência de diretrizes especiais. Salas de aula adequadas, necessitam de tratamento acústico, o que também deveria estar previsto em diretrizes orçamentárias (Deliberador, 2010).

O Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação (FNDE), por exemplo, que disponibiliza projetos arquitetônicos e recursos para construção de escolas no Brasil, cita como sugestão materiais reflexivos como cerâmica, alumínio e vidro. Esses materiais corroboram para o alto nível de reverberação, reforçando a pouca atenção com o condicionamento acústico das salas (Dos Santos; Masson; Lopes, 2017).

Em termos de condicionamento acústico, o tempo de reverberação é visto como o parâmetro acústico de partida para muitas decisões de tratamento acústico.

De fácil mensuração e amplamente difundido na literatura, serve de base para a avaliação da inteligibilidade e aprofundamento dos demais parâmetros acústicos.

Nas universidades, a priorização por salas maiores e o descompasso da qualidade em prol do número de alunos, cursos e disciplinas, repercute na acomodação de salas cada vez menos adequadas para práticas de ensino (Porto e Régner, 2003).

A partir do contexto exposto, aplicando para a perspectiva de universidades federais brasileiras e utilizando como estudo de caso a Universidade Federal de Santa Catarina, buscou-se responder a seguinte problematização: Como as salas de aula padrão da UFSC se comportam em relação ao condicionamento acústico e quais influências do projeto arquitetônico devem ser consideradas para esse resultado?

A justificativa para a escolha do tema advém principalmente das dificuldades no ensino e na aprendizagem em salas de aula ruidosas, demonstradas nas pesquisas científicas (Deliberador; Kowaltowski, 2018); a presença de estudos e publicações voltadas majoritariamente para espaços de atividades técnicas de música e auditórios (Figueiredo, 2005; Vergara; Marros; Paul, 2016), carecendo de foco em espaços básicos de maior utilização, como as salas de aula expositivas; e a ausência de normas técnicas brasileiras, até o momento, para o condicionamento acústico de salas de aula com padrões nacionais, necessitando do amparo de normas e regulações estrangeiras.

O que as pesquisas mostraram foi que as avaliações de condicionamento acústico deveriam estar presentes nas etapas iniciais de projeto de espaços de ensino, mesmo que no grau de complexidade preliminar e acessível.

Neste trabalho, foram expostas metodologias e análises demonstrando formas de obter conclusões sobre a qualidade acústica de uma sala de aula desde etapas analíticas até o aprofundamento de uma medição em campo e interação com simulações computacionais, para fornecer diagnósticos de correção.

1.1 OBJETIVOS

Os objetivos foram separados em: objetivo geral e objetivos específicos listados em tópicos.

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral do trabalho foi avaliar o condicionamento acústico de salas de aula da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), por meio de medições *in loco*, cálculos e simulações computacionais, para desenvolver propostas de correção.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Identificar as características padrão das salas de aula da UFSC;
- Identificar e justificar, com base na literatura, quais parâmetros acústicos devem ser medidos e analisados para a avaliação do condicionamento acústico das salas de aula;
- Obter experimentalmente os valores dos parâmetros acústicos das amostras a partir da medição *in loco* para análise e validação do modelo digital;

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esse trabalho foi dividido em sete partes: seis capítulos e as considerações finais. A primeira parte apresentou o contexto introdutório, justificativas e objetivos da pesquisa.

A segunda parte descreve os principais conceitos e parâmetros acústicos de avaliação de salas; é feita uma análise da geometria a partir de cálculos analíticos, com a finalidade de estudo preliminar; e a aplicabilidade de normas técnicas.

A terceira parte engloba a pesquisa bibliográfica com uma revisão sistemática de literatura utilizando o método PRISMA 2020, traçando um panorama dos trabalhos sobre o tema e um levantamento das teses e dissertações do acervo digital “Periódico da CAPES” para compreender também o contexto dos trabalhos nacionais.

A quarta parte descreveu o processo metodológico, levantamento e seleção das salas de aula para caracterização do objeto de estudo, etapas das medições *in loco*, desenvolvimento do modelo de simulação computacional adotado como estudo piloto para elaboração de propostas de intervenção.

A quinta parte apresentou os resultados alcançados nas etapas de cálculos analíticos e dados coletados nas medições *in loco*, comparativo com recomendações das normas técnicas e resultados dos estudos de simulação.

A sexta parte apresentou as propostas de intervenção a partir da avaliação do condicionamento acústico das seis salas de aula.

O último capítulo trouxe as considerações finais, limitações do estudo e perspectivas para trabalhos futuros.

2 CONDICIONAMENTO ACÚSTICO EM SALAS DE AULA

O condicionamento acústico pode ser entendido como uma intervenção que ocorre no interior de um ambiente com o objetivo de adequá-lo acusticamente para um determinado tipo de uso (ABNT, 2025). Com base nessa definição, o trabalho do condicionamento acústico em salas de aula trata-se da adequação acústica para as atividades de ensino e palavra falada.

A área da acústica que compreende o comportamento do som no interior de um ambiente é chamada de acústica de salas, que por sua vez, tem como objeto de estudo o condicionamento acústico (Brandão, 2016).

Ao tratar de acústica de salas e condicionamento acústico, assume-se que o foco de estudo está no som produzido e propagado no interior do ambiente, o que difere dos estudos de isolamento e transmissão sonora entre ambientes adjacentes, voltados a restringir a passagem de ruído por elementos construtivos (Bistafa, 2018).

Dessa forma, serão abordadas as normas e regulamentações para análise e avaliação de salas e os principais parâmetros acústicos, direcionados para o uso de ambientes de ensino.

2.1 NORMAS E REGULAMENTAÇÕES SOBRE CONDICIONAMENTO ACÚSTICO DE SALAS

A presença de normas técnicas e diretrizes legais de projetos é o que regulariza e torna consistente uma avaliação acústica. Alguns países como Portugal (Pinho et al., 2016) e Itália (Berardi; Iannace e Trematerra, 2019) possuem leis e diretrizes de condicionamento acústico exigidas para o projeto de salas de aula, demonstrando a importância e o quanto isso corrobora para a melhoria do desempenho escolar.

No cenário brasileiro até o momento dessa pesquisa, apenas a normativa ABNT NBR 10152 traz parâmetros objetivos com referência a salas de aula, descrevendo níveis de pressão sonora (NPS) aceitáveis (ABNT, 2017b).

A norma alemã DIN 18041 é um importante referencial, pois estabelece com maior embasamento valores objetivos para o contexto de espaços de ensino, assim como orientações, valores de coeficientes de absorção e diretrizes de cálculo para salas de geometria regular e irregular (DIN, 2016).

A inteligibilidade, importante fator na transmissão do ensino através da palavra falada, possui como principal norma de aplicação a IEC 60268, com versão traduzida para a língua portuguesa na ABNT NBR IEC 60268:16 (ABNT, 2018).

O processo de avaliação de condicionamento acústico, detalhando equipamentos e metodologias de ensaio é globalmente contemplado pelo conjunto de normas ISO 3382, em suas partes 1, 2 e 3. A primeira parte da norma foca em espaços de espetáculos, trazendo os parâmetros acústicos de salas e a segunda parte acrescenta orientações a respeito das salas normais, “*ordinary rooms*” (ABNT, 2017a). A terceira parte, com estudos mais recentes, abrange espaços de escritórios tipo *open-office*, ampliando a abordagem para outros tipos de ambientes fechados, logo, não será destacada nesse trabalho.

2.2 PARÂMETROS ACÚSTICOS PARA AVALIAÇÃO DE SALAS DE AULA

Para avaliar acusticamente o espaço de uma sala, são adotados parâmetros predefinidos pelas normas técnicas citadas no tópico “2.1”, que delimitam valores de referência. As normas ISO ABNT 3382:1 e ISO ABNT 3382:2 (ABNT, 2017a) citam os principais descritores para avaliação de salas, servindo de orientação para este trabalho em conjunto com os estudos selecionados pela revisão de literatura expressos no capítulo seguinte.

2.2.1 Tempo de reverberação

O cálculo do tempo de reverberação é um parâmetro que por si só, já permite análises preliminares do conforto acústico, pois serve como base para o cálculo de outros parâmetros.

De acordo com a norma ABNT NBR 16313, o tempo de reverberação (T_{60}) corresponde ao período decorrido para que o nível de pressão sonora (NPS) em um ambiente consiga decair 60 dB após interrupção da emissão sonora (ABNT, 2025).

Além da faixa dinâmica de 60 dB, na prática as medições podem ocorrer em faixas menores, sendo extrapoladas para um tempo de decaimento de 60 dB. Os rótulos mais utilizados são: T_{20} , em que T é obtido a partir do tempo no qual a curva de decaimento primeiro alcança 5 dB e depois 25 dB abaixo do instante inicial; e T_{30}

quando os valores de decaimento vão de 5 dB a 35 dB abaixo do nível inicial (ABNT, 2017a).

Diversos estudos propuseram fórmulas e métodos para o cálculo do tempo de reverberação (Eyring, 1930; Millington, 1932; Sette, 1933). Entre eles, destaca-se o trabalho pioneiro de W. C. Sabine (1922), considerado o marco inicial nesse campo. Neste estudo, optou-se por utilizar a equação de Sabine (Bistafa, 2018), Equação 1, para as demonstrações analíticas, em razão da menor complexidade geométrica das salas avaliadas, materiais de baixa absorção e volumes inferiores a 300 m³.

$$T_{60} = 0,161 \frac{V}{A} \quad (1)$$

Onde:

T_{60} = tempo de reverberação,

0,161 = constante de Sabine,

V - volume do ambiente em m³,

A = área de absorção equivalente

.

A área de absorção equivalente, Equação 2, resulta da soma de cada superfície exposta da sala, calculada a partir da multiplicação da área de cada elemento construtivo (S_i) pelo seu respectivo coeficiente de absorção sonora (α_i). O coeficiente de absorção varia de 0 a 1, indicando a fração da energia sonora absorvida pelo material, sendo o valor “0” para uma superfície totalmente refletora e “1,0” para uma superfície completamente absorvente (Kuttruf, 2016).

$$A = \sum S_i \cdot \alpha_i \quad (2)$$

Onde:

S_i = área exposta de cada da superfície em m²

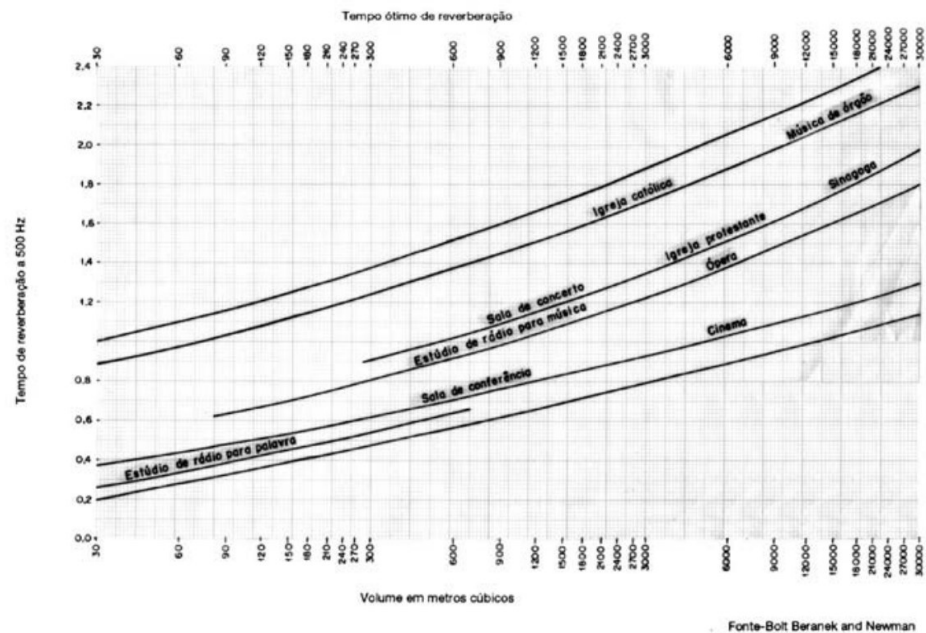
α_i = coeficiente de absorção sonora

No Brasil, a norma de orientação sobre tratamento acústico em recintos fechados, vigente até o momento desse trabalho, é a ABNT NBR 12179 (ABNT, 1992).

De acordo com a norma, o “tempo ótimo de reverberação”, ou seja, o tempo de reverberação considerado ideal para uma determinada atividade em um determinado recinto, com volume inferior a 300m³, é de até 0,6 segundos, demonstrado na Figura 1, que mostra o gráfico de referência apresentado pela norma.

A norma utiliza como referência a frequência de 500 Hz, derivada dos primeiros estudos de W. C. Sabine sobre o tempo de reverberação (Sabine, 1922). Essa condição aplica-se para salas de conferências, visto que a norma citada não indica valores para atividade exclusiva de sala de aula.

Figura 1. Referência de TR da NBR 12179 (1992)



Fonte: ABNT, 1992.

Para complementar os indicativos da norma ABNT NBR 12179, tendo em vista suas limitações e desatualização, foram utilizadas: a normativa alemã DIN 18041 (DIN, 2016) e a normativa italiana UNI 11532-2 (UNI, 2020), que indicam valores específicos para atividade de discurso em salas de aula, complementando os cálculos de avaliação de TR, Tabela 1.

Tabela 1. Tempo ótimo de reverberação para palavra falada

	TR (s)	Volume	Referência
NBR 12179	0,4 a 0,6	120 - 300m ³	500 Hz, recinto ocupado
DIN 18041 e UNI 11532-2	0,44 a 0,66	100 – 300m ³	Tolerância de 80% a 120% em 500Hz, 80% ocupação

Fonte: Adaptado de ABNT (1992), DIN (2016) e UNI (2020).

2.2.2 Ruído residual

O ruído residual, ou *background noise*, é o nível de pressão sonora (NPS) medido em dB, do som remanescente no ambiente, definido como: “Som remanescente em uma determinada posição e em uma determinada situação, quando um ou mais sons específicos são suprimidos do som total” (ABNT, 2025, p.2).

Som total por sua vez, é o conjunto de todos os sons que chegam a um ponto em determinado momento; e o som específico é a parte do som total que pode ser identificada da fonte de interesse (ABNT, 2015).

O cálculo do ruído residual é bastante importante para estimar a inteligibilidade, dentre outros parâmetros acústicos, auxiliando no procedimento de avaliação de salas.

A ABNT NBR 10152 traz recomendações de valores de referência de pressão sonora para atividades educacionais, sendo esses entre 35 dB a 45dB (ABNT, 2017b).

2.2.3 Definição (D50)

O termo "Definição" também conhecido como D_{50} , mede a razão entre a energia contida nas primeiras reflexões pela energia total da resposta impulsiva (Brandão, 2016).

A Equação 3 (Bistafa, 2018) expressa a fórmula de definição do descritor D_{50} :

$$D_{50} = \frac{\int_0^{\infty} p^2(t), dt}{\int_0^{50,ms} p^2(t), dt} \times 100\% \quad (3)$$

Onde:

$p(t)$ = pressão sonora instantânea da resposta impulsiva medida no ponto de medição

$p^2(t)$ = energia acústica instantânea;

$\int_0^{50,ms} p^2(t), dt$ = energia acumulada nos primeiros 50 ms após a chegada do som direto.

$\int_0^{\infty} p^2(t), dt$ = energia total recebida.

Dessa forma, o D_{50} quantifica a proporção de energia sonora que contribui para a clareza da fala, considerando as reflexões iniciais como benéficas. O restante da energia sonora, que chega após 50 milissegundos, é considerado prejudicial à inteligibilidade (Bistafa, 2018).

Para salas de aula, a recomendação é de que os valores de D_{50} sejam acima de 70% para garantir inteligibilidade da fala (Bistafa, 2018).

2.2.4 Inteligibilidade da fala

O termo inteligibilidade se refere a avaliação da proporção da fala que é compreendida no discurso entre um transmissor, o sujeito que transmite a mensagem falada (sinal sonoro), e um receptor, sujeito que recebe ou capta a mensagem. A inteligibilidade da fala pode ser mensurada a partir de métodos subjetivos, como testes de palavras, por exemplo, e objetivos, através de parâmetros acústicos.

A ABNT NBR IEC 60268:16, norma brasileira com adoção de padrões internacionais da International Electrotechnical Commission (IEC), descreve a aplicação da avaliação da inteligibilidade através do parâmetro Speech Transmission Index (STI), ou em português, índice de transmissão da fala, que qualifica a inteligibilidade de uma sala. Os valores de STI podem variar de 0 (péssima inteligibilidade), a 1 (perfeita inteligibilidade) (ABNT, 2018).

Além do STI, outros parâmetros objetivos com ênfase na inteligibilidade da fala podem ser citados, como: Speech Interference Level (SIL), Articulation Index (AL), Articulation Loss of Consonants (ALCons%), dentre outros.

Nesse trabalho, considerando a falta de viabilidade de equipamentos, softwares e o objetivo de trazer uma avaliação acessível para que mais salas de aula possam se beneficiar da análise de condicionamento acústico, a avaliação da inteligibilidade da fala foi feita utilizando os resultados obtidos de tempo de reverberação e ruído residual, estimando a perda da fala com o parâmetro ALCons% e o cálculo da relação sinal-ruído (SNR).

Essa estimativa não substitui a precisão da medição de STI, por exemplo, porém podem fornecer as condições preliminares para uma análise acústica de salas.

2.2.4.1 Perda da fala (ALCons%)

A fórmula de ALCons% (Articulation Loss of Consonants) é uma abordagem empírica que relaciona a porcentagem de consoantes perdidas com o volume do ambiente e o tempo de reverberação. Essa métrica pode ser empregada para fornecer

uma estimativa rápida da clareza da fala, indicando a probabilidade de um ouvinte não compreender uma consoante falada (Beranek; Mellow, 2012).

Valores de ALCons% abaixo de 5% geralmente são considerados excelentes para a inteligibilidade da fala, enquanto valores entre 5% e 7% são classificados como bons. No entanto, à medida que o ALCons% ultrapassa 10% a 15%, a inteligibilidade se torna marginal ou inaceitável, indicando que a reverberação excessiva está comprometendo seriamente a compreensão da fala (Long, 2014).

Para esse trabalho, o cálculo foi feito através da equação empírica derivada de Peutz (1971), Equação 4, que serve como aproximação rápida da inteligibilidade em função de parâmetros globais da sala:

$$ALCons\% = 200 \frac{T_{60}}{V^{1/3}} \quad (4)$$

Onde:

T_{60} = tempo de reverberação, em segundos

V = volume da sala, m^3 .

2.2.4.2 *Relação sinal-ruído (SNR)*

A Relação Sinal-Ruído (SNR) é também uma equação empírica que quantifica a diferença entre o nível de pressão sonora do sinal desejado e o nível de pressão sonora do ruído residual total (Beranek; Mellow, 2012). Essa relação pode ser expressa pela Equação 5 (Long, 2014):

$$SNR \text{ (dB)} = L_s - L_n \quad (5)$$

Onde:

L_s representa o nível de pressão sonora do sinal

L_n é o nível de pressão sonora do ruído residual

Para o cálculo do nível sonoro do sinal (L_s), considera-se a soma dos componentes de som direto, influenciado pela potência da fonte, diretividade e distância do ouvinte; e de som reverberante, modulada pela absorção do ambiente, volume e tempo de reverberação (Lavandier et al., 2022)

O nível de ruído (L_n) representa o ruído residual do ambiente, usualmente ponderado em dB(A) para alinhar-se à percepção auditiva humana.

Valores de SNR acima de 15 dB são considerados excelente, enquanto valores entre 10 dB e 15 dB são aceitáveis, e valores abaixo de 5 dB indicam inteligibilidade seriamente comprometida pela presença do ruído (Long, 2014).

No entanto, SNR altos não são condição suficiente para garantir a inteligibilidade da fala em ambientes com reverberação excessiva, pois a persistência excessiva do som reverberante contribui para o nível do sinal total (L_s), podendo elevar o SNR, tornando o sinal mais "alto" que o ruído (Kuttruff, 2016).

De acordo com Long (2014), a reverberação pode comprometer a inteligibilidade mesmo em situações com ruído controlado, ressaltando a necessidade de avaliação de outros parâmetros de inteligibilidade como STI e ALCons%.

2.3 AVALIAÇÃO COM BASE EM FUNDAMENTOS DA ACÚSTICA PARA SALAS DE DIMENSÕES REGULARES

De acordo com Long (2014), o comportamento acústico em salas pode ser analisado em diferentes faixas de frequência, uma vez que os fenômenos predominantes variam ao longo do espectro. De modo geral, essa divisão considera três regiões principais: baixas frequências (até aproximadamente 250 Hz), médias frequências (entre 250 Hz e 2000 Hz) e altas frequências (acima de 2000 Hz).

Nas baixas frequências, a análise é fortemente influenciada pelos princípios da acústica ondulatória. Em ambientes de pequenas dimensões, muitas vezes comparáveis ou menores do que o comprimento de onda, surgem fenômenos de ressonância conhecidos como modos normais ou “modos da sala” (Brandão, 2016).

Os modos normais correspondem a padrões de ondas estacionárias gerados pela interferência entre ondas sonoras refletidas nas superfícies rígidas da sala. Como resultado, o campo sonoro apresenta regiões de máxima pressão (antinodos) e de mínima pressão (nodos), o que pode ser percebido subjetivamente como variações ou “oscilação” do som no espaço (Long, 2014).

Outro parâmetro relevante na descrição do campo sonoro é a distância crítica (D_c), definida como o ponto em que o nível do som direto emitido pela fonte é igual ao nível do som reverberante da sala. Esse conceito é particularmente importante no projeto de ambientes destinados à fala ou à música, pois influencia tanto a inteligibilidade quanto a clareza acústica.

O cálculo da distância crítica pode ser expresso de forma simplificada pela combinação da definição de D_c : distância em que a intensidade do som direto se iguala à intensidade média do campo reverberante, com a fórmula de Sabine para o tempo de reverberação. Dessa dedução resulta o coeficiente 0,057, válido para fontes aproximadamente omnidirecionais (Davis et al., 2013).

Dessa forma, chega-se à expressão prática, Equação 6:

$$D_c = 0,057 \sqrt{\frac{QV}{T_{60}}} \quad (6)$$

Onde:

Q = fator de diretividade da fonte sonora (adotado como 2 para a voz humana)

V = volume da sala,

T_{60} = tempo de reverberação

0,057 = constante de proporcionalidade.

A distância crítica auxilia na definição do posicionamento de ouvintes, microfones ou equipamentos de amplificação, permitindo reduzir efeitos de interferência indesejados.

No caso de paredes paralelas, a distância entre elas também pode determinar a frequência em que ocorre reforço ou cancelamento do som, em função do alinhamento das ondas refletidas. Esse fenômeno pode ser calculado pela Equação 7 (Brandão, 2016), para encontrar a frequência modal em função da geometria do ambiente:

$$F_n = c/2\sqrt{((N_x/L_x)^2 + (N_y/L_y)^2 + (N_z/L_z)^2)} \quad (7)$$

Onde:

c = velocidade do som, geralmente 344m/s

N_x, N_y, N_z = números naturais

L_x, L_y, L_z = dimensões de comprimento, largura e altura da sala

Os modos normais podem ser classificados em três categorias: axiais, quando envolvem duas superfícies paralelas; tangenciais, quando envolvem quatro superfícies; e oblíquos, quando resultam da interação entre as seis superfícies do recinto. Dentre esses, os modos axiais são geralmente os mais relevantes para a análise prática, pois produzem picos de ressonância mais pronunciados em

determinadas frequências, tornando-se dominantes na resposta sonora da sala (Avelar et al., 2018).

A compreensão e o controle desses efeitos são essenciais para o projeto ou adaptação de salas de aula, uma vez que a presença de modos ressonantes e a inadequada relação entre campo direto e reverberante podem comprometer a inteligibilidade da fala e, consequentemente, o desempenho escolar.

2.3.1 Métodos de dimensionamento e distribuição modal

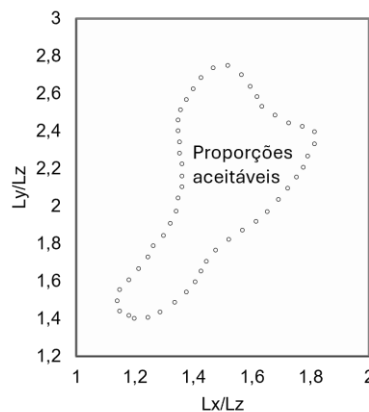
As salas ditas regulares, são tipicamente salas com superfícies paralelas, em que se pode estabelecer três medidas: comprimento, largura e altura.

O dimensionamento e as proporções ditas como “áureas” propostas pela literatura, como a área de Bolt e os critérios de Bonello, servem como diretrizes valiosas para alcançar uma distribuição mais uniforme dos modos normais em respostas de baixa frequência.

2.3.1.1 Carta de Bolt

A Carta de Bolt, Figura 2, proposta por Richard Bolt em 1946, define uma região de proporções geométricas entre comprimento, largura e altura que favorece melhores condições de equilíbrio modal em salas retangulares.

Figura 2. Área de Bolt



Fonte: Elaborado pela autora com base em Bolt (1946). Nota: Os eixos Lx , Ly e Lz representam a relação entre as medidas das salas de largura, comprimento e altura, respectivamente.

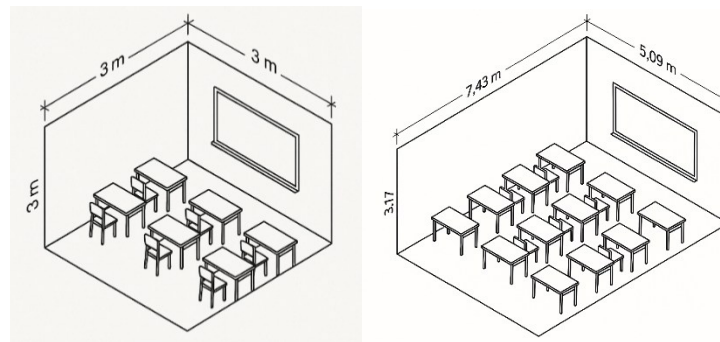
O objetivo é evitar tanto o agrupamento excessivo de modos quanto lacunas excessivas entre frequências adjacentes, situações que comprometem a uniformidade da resposta em baixas frequências (Bistafa, 2018). Com isso, a escolha de dimensões que se enquadram na área de Bolt pode ser um ponto de partida para o projeto acústico de ambientes de geometria regular.

O exemplo a) na Figura 6, em que as três dimensões são iguais (sala cúbica), representa a situação mais desfavorável para o equilíbrio modal, enquanto o exemplo b) possui proporções dentro da área definida por Bolt ($L_y/L_z = 2,34$ $L_x/L_z = 1,60$) que tendem a reduzir o impacto das ondas estacionárias.

Figura 3. Exemplo de dimensionamento de salas a partir de Bolt (1946)

a) Sala cúbica

b) Proporções com base na Carta de Bolt



Fonte: A autora (2025).

2.3.1.2 Critérios de Bonello

Para complementação das análises em baixa frequência, foram adotados nesse trabalho os “Critérios de Bonello”, método elaborado por Oscar Juan Bonello em 1981, para análise da distribuição modal com base na contagem de modos por banda de 1/3 de oitava (Bonello, 1981).

O primeiro critério estabelece que o número de modos deve crescer de forma monotônica, ou seja, cada banda superior deve apresentar quantidade igual ou maior de modos que a banda anterior (Brandão, 2016). O segundo critério determina que não deve haver modos coincidentes em uma mesma banda, exceto quando esta já contém cinco ou mais modos (Brandão, 2016).

A aplicação desses critérios contribui para uma distribuição modal mais uniforme, reduzindo picos e cancelamentos de pressão sonora típicos das baixas frequências e resultando em uma resposta acústica mais equilibrada (Kuttruff, 2016).

2.3.2 Frequência de Schroeder

A frequência de Schroeder, Equação 8, avalia a sala como duas regiões distintas: uma atuando como ressonador e outra como absorvedor. Em termos mais simples, representa a frequência na qual a absorção acústica dentro do ambiente começa a dominar as reflexões sonoras, obtendo uma resposta sonora menos “reverberante” e mais clara, particularmente à medida que as frequências aumentam (Avelar et al., 2018).

$$F_s = 2000 \sqrt{\frac{T_{60}}{v}} \quad (8)$$

Onde:

F_s = Frequência de Schroeder

T_{60} = Tempo ótimo de reverberação (adotado 0,6 segundos para sala de aula)

v = Volume (m^3).

O cálculo da F_s é essencial pois indica um limite em que o comportamento da sala, predominantemente modal, se transforma em comportamento estatístico. Isso permite concluir que acima dessa frequência os efeitos dos modos ressonantes influenciam menos no comportamento da sala (Avelar et al., 2018).

2.3.3 Considerações sobre os modos normais para salas de aula

A análise dos modos normais, ainda que mais evidente nas baixas frequências, é relevante neste estudo porque, em ambientes fechados de tamanho médio e pequeno, exemplo de salas de aula, pode haver acentuações ou cancelamentos sonoros em regiões específicas, resultando em um campo sonoro não homogêneo (Kuttruff, 2016; Čurović et al., 2024).

Embora o conceito de inteligibilidade da fala esteja comumente associado às altas e médias frequências, os efeitos das baixas frequências não devem ser negligenciados, pois influenciam a percepção de calor, proximidade e clareza da voz, além de afetarem o comportamento geral do campo sonoro (Bradley, 1998; Huang, Peng e Xie, 2023).

Como apontado por Vorländer (2008), anomalias de resposta nas baixas frequências podem comprometer a percepção nas faixas superiores por meio de mascaramento auditivo e interferência modal, sobretudo em salas equipadas com sistemas de reforço sonoro.

3 REVISÃO DE LITERATURA

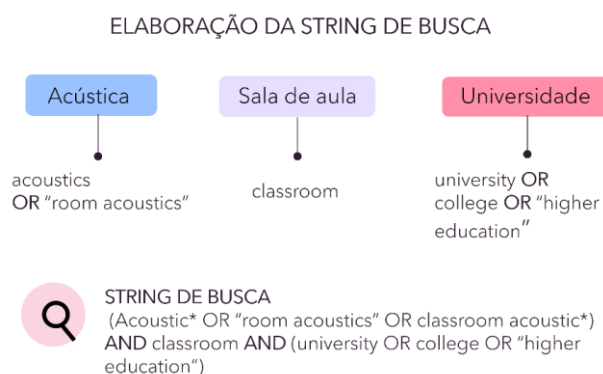
Para compreender o estado da arte em relação a temática de condicionamento acústico em salas de aula universitárias, foi feita uma revisão sistemática de literatura com o objetivo de buscar trabalhos com aplicações em contextos semelhantes às salas de aula da UFSC.

As perguntas norteadoras para as pesquisas bibliográficas envolveram formas de diagnosticar o condicionamento acústico de salas, tais como: “Quais os melhores parâmetros acústicos para investigar o condicionamento acústico de uma sala de aula em campus universitário?” “Qual o impacto do condicionamento acústico no ambiente de ensino superior?”

As primeiras *strings* de busca nas bases indexadoras começaram com palavras-chave que pudessem delimitar o contexto de sala de aula e universidade, buscando sinônimos em inglês. Palavras como “avaliação” e termos acústicos específicos como “reverberação”, foram retiradas depois de alguns testes pois subtraíam trabalhos importantes.

Foram feitos testes com os termos em inglês na plataforma “Periódicos da CAPES”, verificando a necessidade de incluir mais termos similares para o contexto de acústica e espaços internos utilizando o operador booleano “OR”, como “acoustics”, abrangendo a disciplina acústica, “room acoustics” e mais especificamente, para salas de aula, foi identificado o termo “classroom acoustic” acrescentando perspectivas do ponto de vista pedagógico de espaços de aprendizagem.

Figura 4. Esquema gráfico da elaboração da *string* de busca



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

3.1 REVISÃO SISTEMÁTICA UTILIZANDO O MÉTODO PRISMA 2020

A revisão sistemática de literatura foi feita com o objetivo de identificar trabalhos que envolvessem condicionamento acústico no contexto de salas de aula convencionais de universidades. Foram considerados trabalhos que abordassem análises e avaliações de ao menos um parâmetro acústico de salas, considerando sala de aula convencional com uso principal para aulas expositivas.

A revisão sistemática segue o protocolo PRISMA 2020 (sigla em inglês para Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) visando uma coleta de dados consistente com parâmetros de seleção. O protocolo envolve uma sequência criteriosa de itens mínimos de registro para revisões sistemáticas e meta-análise e propõe o uso de um fluxograma e um *checklist* de análise dos dados.

3.1.1 Critérios de elegibilidade

Foram traçados os seguintes itens de inclusão para elegibilidade dos trabalhos: I1) Estudos que demonstrem intervenções voltadas para o desempenho acústico de uma ou mais salas com geometria regular em uma universidade. I2) Estudos que descrevem procedimentos de medição, comparação ou estudos complementares com resultados de ao menos um parâmetro acústico no contexto do ambiente construído de uma sala de aula de universidade.

Foram excluídos: E1) Trabalhos que incluem avaliação de salas, porém, com objeto de estudo diferente de uma sala de aula com geometria regular ou uso diferente ao de aula expositiva, como por exemplos auditórios ou salas para música. E2) Trabalhos que não abordam suficientemente o tema de acústica de salas, sem ao menos o resultado de um parâmetro acústico de avaliação. E3) Trabalhos com o objeto de estudo sala de aula que não são em universidade, como por exemplo salas de aula para ensino médio/ infantil. E4) Trabalhos de revisão de literatura não foram incluídos, mas foram investigados para evitar conteúdos duplicados. E5) Trabalhos que não estavam disponíveis para leitura integral em língua inglesa.

O Quadro 1 relaciona resumidamente os critérios de inclusão e exclusão:

Quadro 1. Critérios de elegibilidade dos estudos selecionados

Critérios de Inclusão	Critérios de Exclusão
I1) Estudos que contemplam intervenções para desempenho acústico com o objeto de estudo de uma sala de aula regular de universidade.	E1) Estudos que tratam como objeto de estudo salas de aula com geometria não regular com uso diferente ao de aula expositiva.
I2) Estudos que apresentam dados técnicos de medição, comparação ou estudos complementares com parâmetros acústicos no contexto do ambiente construído de uma sala de aula de universidade.	E2) Estudos que não aderem ao tema de acústica de salas.
	E3) Estudos que não contemplam salas de aula em universidades.
	E4) Estudos de revisão de literatura.
	E5) Estudos indisponíveis.

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

3.1.2 Busca literária

A primeira busca por artigos que pudessem ser incluídos nessa revisão foi feita nas bases de dados “Scopus” e “Web of Science” no período de dezembro de 2023. Considerando o avanço temporal do trabalho, a revisão foi atualizada incluindo também o ano de 2024.

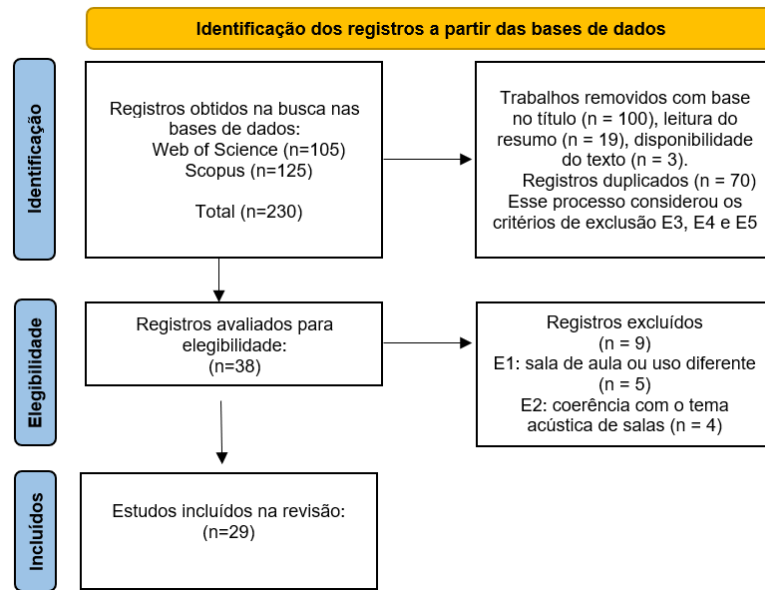
A busca priorizou trabalhos que abordassem o tema acústica de salas (“room acoustic*” ou “classroom acoustic*” ou “acoustic*” ou “acoustical”) com foco em ambientes de salas de aula (“classroom*”) de universidades (“university” ou “college” ou “higher education”).

A busca considerou dados de entrada para título, resumo e palavras-chave. Foi feito um limite temporal de dez anos, considerando o intervalo dos anos de 2013 a 2023, acrescentando posteriormente o ano de 2024, e o filtro de “artigos”, excluindo artigos de revisão e anais de eventos.

A string de busca completa da consulta na base indexadora “Web of Science” foi a seguinte: ((TS=("room acoustic*" OR "classroom acoustic*" OR "acoustic*" OR "acoustical*")) AND TS=(Classroom*)) AND TS=(university OR college OR "higher education").

Respectivamente, a string de busca na base indexadora “Scopus” foi: (TITLE-ABS-KEY (university OR college OR "higher education") AND TITLE-ABS-KEY ("room acoustic*" OR "classroom acoustic*" OR "acoustic*" OR "acoustical*") AND TITLE-ABS-KEY (classroom*)) AND PUBYEAR > 2012 AND PUBYEAR < 2024 AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "ar")). O processo é descrito no diagrama de fluxo PRISMA, Figura 5.

Figura 5. Diagrama de Fluxo PRISMA



Fonte: Elaborado pela autora com base em PAGE et al. (2021)

3.1.3 Extração e análise dos dados

Foram extraídos dos trabalhos os dados de: 1) Parâmetros acústicos investigados. 2) Instrumentos de medição ou avaliação. 3) Proposta de intervenção.

Essa revisão analisou como os trabalhos tratam o tema de desempenho acústico em “salas de aula universitárias”.

Foram observadas as características das salas de aula, considerando a aplicação em ao menos uma sala de aula de geometria regular e carteiras escolares com uso para aulas expositivas, de forma que houvesse semelhança com as salas de aula da UFSC, objeto de estudo desse trabalho.

3.1.4 Resultados

A busca bibliográfica através das bases de dados Scopus e Web of Science retornou 230 artigos. Com base nos títulos e resumos, foram removidos 119 registros. Os itens removidos não apresentaram aderência ao tema nem ao objeto de estudo. Também foram removidos trabalhos por indisponibilidade do texto integral (n = 3) e duplicados (n = 70).

Após a leitura integral dos textos, 9 dos 38 artigos foram removidos, devido ao uso diferente de sala de aula (n = 5) e não aderência ao tema de acústica de salas (n = 4), o que resultou a inclusão de 29 estudos na revisão, Tabela 2.

Tabela 2. Resumo dos resultados

(continua)

Fonte	Salas (*)	Parâmetros acústicos de sala de aula (**)	Metodologia	Contribuição	Nova proposta ou novo resultado
Buratti et al. (2018)	7	Definição STI Tempo de reverberação	Questionários e medições	Índice global para medir conforto térmico, lumínico e acústico	Novo índice de avaliação
Kristiansen et al. (2014)	32	Ruído residual Tempo de reverberação	Teste cognitivo, questionários e medições	Evoluções sobre exposição sonora em salas de aula	Resultados sobre perda auditiva em professores
Kuri e Pérez (2022)	10	%ALcons Tempo de reverberação Definição Ruído residual EDT STI	Medições e simulação computacional	Avaliação e correção de salas de aula preservando a fachada	2 propostas: Barreiras acústicas e Fachada com pele dupla
Berardi; Iannace e Trematerra (2019)	5	Tempo de reverberação Clareza STI	Medições e simulação computacional	Absorção necessária para atender ao <i>Italian Minimum Environmental Criteria</i> (CAM)	Testes com adição de painéis de absorção nas paredes e teto
de la Hoz-Torres et al. (2021)	4	Ruído residual	Medições	Resultados sobre qualidade do ar e exposição sonora	-
Pinho et al. (2016)	1	Tempo de reverberação	Medições	Avaliação do desempenho acústico	-
Di Loreto et al. (2023)	35	STI Tempo de reverberação	Medições e simulação computacional	Comparação de métodos de medição de STI	-
van den Heuij et al. (2020)	16	Ruído residual STI	Medições	Influência entre ruído residual e STI	-
Dhalluin e Limam (2014)	2 4 layouts de ventilação	Ruído residual Tempo de reverberação	Método IEQ	Avaliação de Conforto com controle da ventilação	Controle da ventilação para melhores resultados
Yang e Mak (2021)	9	STI SNR EDT	Testes de palavras e medições	Análises de dados para descrever a inteligibilidade da fala	Modelos de regressão (comparação dos parâmetros acústicos)

Tabela 2. Resumo dos resultados

					(continuação)
Fonte	Salas (*)	Parâmetros acústicos de sala de aula (**)	Metodologia	Contribuição	Nova proposta ou novo resultado
Castro-Martínez et al. (2016)	2	Tempo de reverberação	Testes de palavras e medições	Análise do efeito de uma intervenção nos níveis de reverberação e avaliação da atenção dos alunos	Intervenção em uma das salas com instalação de painéis trapezoidais de madeira com fibra de vidro, comparando resultados com a sala sem intervenção
Choi (2018)	4	Tempo de reverberação EDT	Medições e ensaios em laboratório	TR de salas desocupadas para estimar mudanças esperadas devido à variação de ocupação	Critérios de projeto para ocupação de salas, prevendo percentuais de absorção
Selim e Saeed (2022)	1	Ruído residual Tempo de reverberação	Medições e simulação computacional	Avaliações da acústica de salas em quatro layouts diferentes	Simulação com 3 propostas de tratamento acústico (cortinas, painéis acústicos e tetos)
Ricciardi e Buratti (2018)	7	Tempo de reverberação STI Definição Ruído residual	Medições e questionários	Medições de conforto ambiental térmico, acústico e luminoso	Questionário com aspectos subjetivos com parâmetros objetivos
Choi (2020)	11	Tempo de reverberação SNR	Medições e gravações	Avaliação acústica durante a aula	"Boas" condições acústicas para ouvintes adultos para melhor inteligibilidade de fala em salas de aula
Leccece; Rocca e Salvadori (2018)	11	Tempo de reverberação STI	Medições	Verificar se há diferença na precisão da medição dependendo do volume das salas	Equações para predição rápida de IST usando RT, realizando uma análise de regressão com os valores medidos
Aguilar et al. (2023)	16	Tempo de reverberação STI Ruído residual	Medições	Verificar as condições acústicas em duas configurações de ventilação ativa e passiva	Avaliação de estratégias de ventilação para controle da transmissão do vírus pelo ar (Covid 19).
Razali; Din e Ramdan (2023)	2	Ruído residual Tempo de reverberação STI	Medições e simulação computacional	Estratégias de projeto acústico com boa relação custo-benefício	Simulação de estratégias considerando baixo custo

Tabela 2. Resumo dos resultados

Fonte	Salas (*)	Parâmetros acústicos de sala de aula (**)	Metodologia	Contribuição	(conclusão)
					Nova proposta ou novo resultado
Yang e Mak (2020)	8	Ruído residual Tempo de reverberação STI	Método IEQ	Avaliação integrada (conforto térmico, luminoso, acústico e qualidade do ar)	Relação entre fatores ambientais e resultados individuais
Zannin; Fiedler e Bunn (2013)	4	Tempo de reverberação	Medições	Comparação entre salas de aula antes e depois da modificação	Modificações que prejudicaram o desempenho escolar
Dias; Santos e Mariano (2019)	10	NPS	Medições e questionários	Influência no desempenho a partir do NPS e percepção do ruído	Comparação entre respostas do usuário e medição <i>in loco</i>
Cudina, Prezelj e Cudina (2016)	5	Tempo de reverberação Ruído residual STI	Medições e testes de laboratório	Avaliação acústica para melhoria da inteligibilidade	Testes adicionando quadros na parede para aumento da absorção
Nestoras e Dance (2013)	10	EDT Definição Tempo de reverberação	Medições	Testes com diferentes configurações de fonte sonora	-
Al-Akhzami et al. (2024)	9	NPS	Método IEQ	Avaliação do conforto e performance acadêmica	Estudos sobre a influência do clima árido na performance acadêmica
Ribeiro et al. (2024)	2	Tempo de reverberação STI EDT Definição NPS	Medições e simulação computacional	Avaliação das salas de aula	Influência entre parâmetros acústicos de salas
Bhandari; Tadepalli; Gopalakrishnan (2024)	11	Tempo de reverberação (com/sem ocupação) SNR NPS (durante a aula)	Medições e questionários	Avaliação do conforto e desempenho dos alunos	Influência da ventilação natural no conforto e performance acadêmica de alunos
Arnal et al. (2024)	3	Tempo de reverberação Definição	Medições	Avaliação das salas de aula	Resultados de poluição sonora a partir de fatores acústicos internos
Mealings et al. (2024)	166	NPS Tempo de reverberação	Medições	Avaliação das salas de aula	Acessibilidade acústica em um campus universitário

Fonte: A autora (2025). Nota: TR = Tempo de reverberação (s), STI = Índice de transmissão da fala, EDT = Tempo de decaimento, NPS = Nível de pressão sonora (dB), SNR = Relação sinal-ruído, %ALcons = Porcentagem de perda de articulação constante. (*) Foi considerado apenas o número de salas de estudo em universidade. (**) Foram considerados apenas os parâmetros acústicos objetivos de avaliação de atividades relacionadas a fala.

propostas de correção, testando materiais a partir de simulações e experimentos em câmaras reverberantes.

Por sua vez, foram considerados como abordagem subjetiva os trabalhos que complementaram os dados objetivos (medidos *in loco* ou obtidos em trabalhos prévios) com variáveis subjetivas, como respostas de questionários ou experimentos que pudessem expressar as respostas dos usuários mediante estímulos sonoros.

3.1.4.3 *Avaliações com métodos integrados*

Alguns trabalhos utilizaram como metodologia de avaliação, métodos com parâmetros integrados ($n = 6$), como o método “IEQ”, sigla para o termo em inglês “*Indoor Environmental Quality*”, ou “Qualidade do Ambiente Interno”. Essa avaliação atribui valores para parâmetros de conforto térmico, lumínico, acústico e qualidade do ar. Esses trabalhos trouxeram a avaliação acústica dentro desse conceito, que por sua vez, atribui maiores índices de avaliação de conforto térmico.

Essa análise esteve presente nos trabalhos dos autores: de la Hoz-Torres et al. (2021), Adrien Dhalluin e Karim Limam (2014), Aguilar et al. (2023), Yang e Mak (2020b) e Al-Akhzami et al. (2024).

De forma semelhante, mas sem utilização do método “IEQ”, Buratti et al. (2018) e Ricciardi e Buratti (2018), trouxeram propostas de novos índices de avaliação, no formato de equações, integrando os quatro âmbitos do conforto ambiental, de forma que a soma dos valores atribuídos para cada instância gerasse um único valor para avaliação.

3.1.4.4 *Avaliação de condicionamento acústico de salas de aula*

A revisão trouxe trabalhos com variadas abordagens de avaliação do condicionamento das salas de aula, com base em métodos da ISO 3382-2.

O método mais adotado pelos artigos selecionados foi o método da resposta impulsiva ($n = 19$), dentre eles, foi observado o uso do software Dirac ($n = 9$) e estouro de balão ($n = 3$). Outros trabalhos adotaram o método ruído interrompido ($n = 2$).

Alguns trabalhos trouxeram avaliação apenas do ruído residual ($n = 2$). Houve trabalhos que não especificaram ou não detalharam o método de obtenção dos descritores ($n = 2$).

Arnal et al. (2024) mencionaram que, além das medições *in loco*, eles também calcularam a equação de Sabine para diagnósticos preliminares. Eles destacaram como esse cálculo pode servir como uma ferramenta útil em situações em que medições *in loco* não estão disponíveis.

3.1.4.5 *Ênfase no processo de obtenção de parâmetros acústicos*

Nestoras e Dance (2013) investigaram a relação entre parâmetros de condicionamento acústico nas medições de salas de aula padrões, utilizando quatro configurações de fontes sonoras. Trabalhos como esse auxiliam no entendimento da influência derivada do aumento ou diminuição de cada parâmetro na avaliação da sala.

Leccece; Rocca e Salvadori (2018) realizaram medições de TR e STI em 11 salas de aula com o objetivo de analisar a viabilidade de obtenção desses parâmetros através de equações, propostas pela literatura como métodos rápidos de obtenção de STI a partir do tempo de reverberação. Foram testadas 4 equações e ao verificar a melhor equação, os autores propuseram correções com base em uma regressão logarítmica e outra linear, utilizando os valores de TR e STI obtidos nas medições. Eles concluíram que para as etapas iniciais de desenvolvimento de projetos a equação derivada por Tang e Yeun (2004) e a equação logarítmica proposta no estudo podem ser altamente eficientes para uma avaliação rápida da inteligibilidade da fala em uma sala de aula.

Pinho et al. (2016) avaliaram oito salas com base no tempo de reverberação, e trouxeram com mais ênfase os resultados experimentais de isolamento acústico, incluindo medição de fachadas. Um importante argumento reforçado no trabalho foi que Portugal possui normas de desempenho acústico regulamentadas por lei, o que obriga espaços educacionais a cumprirem níveis aceitáveis de qualidade acústica. Apesar disso, os autores avaliaram que apenas duas salas cumprem com as normas portuguesas, sendo que cinco delas não possuem adequado tempo de reverberação; quatro salas possuem fraco isolamento acústico entre salas e corredores e três salas não atendem as condições de isolamento de fachadas.

Di Loreto et al. (2023) investigaram métodos de obtenção do parâmetro STI com auxílio de ferramentas de programação computacional. Eles realizaram simulações com o software *pyeSTImate* e a associação de uma rede neural artificial com linguagem *python* capaz de gerar resultados de STI com um número reduzido de dados de entrada. Foram obtidos resultados consistentes, concluindo que essa pode ser uma alternativa interessante para avaliações preliminares de inteligibilidade, possibilitando maior assertividade nas atividades de projeto de edifícios escolares e sistemas de amplificação sonora em salas de aula, em conformidade com a regulamentação local.

Um ponto interessante desse estudo, pontuado pelos autores, é a fraqueza do uso de dados sintéticos, pois a inteligência artificial compara dados de salas de aula com características parecidas para calcular um valor médio de STI, resultando em um “achatamento” das classificações de inteligibilidade para o nível “razoável” de compreensão da fala. O que eles observaram nas simulações é que as características das dimensões geométricas são mais significativas na determinação do STI e as características dos materiais possuem pouca variabilidade em termos de coeficientes de absorção e espalhamento.

A posição do ouvinte na sala de aula também é um fator para análises visto que a distância da fonte sonora interfere na forma de recebimento do conteúdo. Van den Heuij et al. (2020) analisaram essa influência em medições de STI e ruído residual, realizando testes em que os resultados de STI foram reportados como a média das medições em posições 5 metros de distância da fonte e as posições representativas mais desvantajosas dentro das salas de aula. O trabalho buscou correlações entre ruído de fundo, STI e as áreas de superfície e volume na amostra de 45 salas que abrangeram salas de aula convencionais, auditórios e laboratórios. Os resultados estatísticos demonstraram correlação apenas entre os valores de STI e as áreas de superfície e volume das salas, visto que os valores mais elevados de STI foram encontrados nas salas menores e não houve variação significativa de resultados com base na tipologia da sala de amostra. Em nenhum dos resultados as posições mais desvantajosas atingiram níveis aceitáveis de STI.

Estudos também trouxeram medições considerando a ocupação das salas como fator de influência na variação dos resultados dos parâmetros acústicos. Choi (2016) realizou um teste em 12 salas de aula, separando-as em 6 salas com elevada reflexão e 6 salas com tratamento de absorção. Os resultados indicaram pouca

influência da ocupação nas salas com maior absorção nos resultados de TR, EDT, C_{50} , STI (sem variação significativa quando ocupada ou vazia) e verificando aumento e maior variação nos indicadores das salas mais reflexivas quando ocupadas, atingindo valores aceitáveis de tempo de reverberação com salas acima de 50% de ocupação.

Yang e Mak (2020) buscaram relações de parâmetros acústicos com resultados de STI com base em modelos de regressão. O estudo sugeriu que a cada aumento de 1 dB nos valores de C_{80} resultará em 1,23% de aumento no índice de inteligibilidade e cerca de 0.6 s no aumento dos valores de EDT diminuem 1%.

Mealings et al. (2024) conduziram um extenso trabalho de campo medindo NPS e TR em todas as salas de aula de um campus universitário na Austrália. Um fato interessante é que o campus segue as diretrizes de conformidade acústica. No entanto, foi observado que apenas 40% das salas atendiam aos dois parâmetros exigidos. Neste estudo, os níveis de TR exigidos variaram de 0,4 a 0,6 segundos.

Ribeiro et al. (2024) avaliaram duas salas de aula por meio de medições in situ e propostas de correção usando simulações computacionais. Os resultados foram comparados usando dois programas de software de simulação acústica, testando uma proposta que incluía placas de teto perfuradas e placas de cimento de lã de madeira com lã mineral em estrutura metálica adicionada às paredes traseiras. O estudo também destacou a influência dos modos normais em baixas frequências e a importante comparação entre o tempo de reverberação em salas ocupadas e desocupadas, aplicando uma equação de correção para ocupação conforme proposto pela norma italiana UNI 11532-2 (2020) em conjunto com as recomendações da DIN 18041 (2018), que abordam valores para salas ocupadas.

3.1.4.6 *Testes com intervenções e comparativo de materiais*

A revisão retornou trabalhos que avaliaram e propuseram intervenções com o intuito de testar materiais e possibilidades ($n = 6$) para que as salas de aula alcançassem melhores condicionamentos e desempenhos acústicos.

Cudina, Prezelj e Cudina (2016) investigaram possibilidades de melhorar a inteligibilidade e os níveis de tempo de reverberação de salas de aula aumentando a absorção da sala pendurando quadros com figuras artísticas. A proposta consiste no quadro como uma possibilidade de painel absorvedor com o espaço de preenchimento

de ar contido entre a tela e a moldura. Os autores identificaram que a combinação apropriada do espaçamento entre moldura e tela, com alguma placa de lã mineral atrás da tela, pode reduzir o tempo de reverberação em 0,15 a 0,3 segundos e melhorar a inteligibilidade da fala em até 20% ou mais. A pesquisa também indagou sobre o impacto visual na capacidade de escuta humana, concluindo que ao visualizar imagens e cores, o efeito sensorial intervém na resposta da compreensão auditiva.

Selim e Saeed (2022) investigaram a qualidade acústica de uma sala de aula típica na Universidade Badr, no Egito. Foram medidos os níveis de ruído residual e o tempo de reverberação em condições desocupadas considerando configurações diferentes, que variavam a abertura de portas, janelas e cortinas (abertas, fechadas e semiabertas) e o funcionamento dos sistemas de climatização (ligado e desligado). Após verificarem que nenhuma configuração atende níveis aceitáveis de tempo de reverberação, utilizaram simulação computacional adicionando painéis de fibra de vidro na parede, cortinas pesadas e forro acústico para atender os parâmetros. Isso mostra o quanto de intervenção seria necessário para que uma sala de aula dita como padrão, alcance qualidade acústica apenas com acréscimo de absorção.

Da mesma forma, Berardi; Iannace e Trematerra (2019) mediram e simularam parâmetros acústicos para corrigir acusticamente cinco salas de aula em um prédio histórico na Itália. A proposta desse trabalho foi aumentar a absorção das salas variando quantidades e posições de painéis revestidos com fibra de poliéster no teto e na parede.

Kuri e Pérez (2022), fizeram um estudo com intervenções de fachadas, abordando um problema de muitos prédios educacionais antigos que não foram preparados para suportar acusticamente transformações decorrentes do crescimento urbano e por consequência, o aumento do fluxo de veículos. Eles simularam duas opções de correção para um novo prédio de anexo dentro da Universidade Nacional Autônoma do México (UNAM) (concebida nos anos 1950). A primeira opção foi uma barreira de isolamento, estrutura metálica com placas de policarbonato com 12 mm de espessura e alturas de 11 e 15 metros, que atingiu como resultado níveis de ruído de 39 a 43 dB(A), acima das recomendações técnicas de 35 dB(A). A segunda opção, considerada a melhor solução, foi uma dupla pele de vidro “DSF-THyAPiS” (Thermal Hydraulic, Acoustic Insulation, Photovoltaic, Solar insulation), uma estrutura metálica de 2 m na fachada voltada para a avenida mais ruidosa, que resultou em níveis médios de ruído residual de 26 a 35 dB(A).

Castro-Martínez et al. (2016) investigaram a relação da qualidade acústica com a capacidade de atenção dos alunos, aplicando questionários de testes de atenção em salas ruidosas e salas que receberam intervenções de painéis modulares com tratamento acústico. Eles verificaram que os alunos tiveram melhor desempenho nos questionários aplicados nas salas tratadas, com menor tempo de reverberação.

Zannin; Fiedler e Bunn (2013) pontuam o fato de muitas decisões de projeto negligenciarem a necessidade de decisões técnicas, além da ausência de normativas locais para definições acústicas, citando por exemplo o caso do Brasil em que as normas técnicas praticadas no momento da pesquisa, careciam de diretrizes específicas para a tipologia de sala de aula. Nesse estudo eles trazem o caso de quatro salas de aula que atendiam bons níveis de tempo de reverberação e por finalidades administrativas, sofreram a troca do forro acústico por forro PVC, tornando-as inadequadas acusticamente.

3.1.4.7 *Considerações de saúde do usuário*

A preocupação com a exposição sonora foi um argumento amplamente citado. Alguns trabalhos (n = 2) aprofundaram o tema com testes experimentais e questionários com alunos e professores, observando desempenho cognitivo e esforço vocal. Também foi avaliada a relação da ventilação natural para diminuição da transmissão de doenças (n = 2), citando a situação da Covid-19 (OMS, 2024).

Kristiansen et al. (2014) investigaram relações de fadiga vocal de professores durante as aulas devido ao excesso de exposição sonora e a necessidade de elevar a voz. Nesse estudo os autores não encontraram valores substantivos capazes de relacionar o tempo de reverberação com o nível de ruído do ambiente, porém, identificaram que a carga vocal dos professores foi em média 10 dB(A) superior aos níveis de ruído de fundo durante as aulas. Eles estimam que os professores falaram com nível de voz considerada elevada em cerca de 61% das aulas e apontam que essa estimativa pode ser ainda maior em aulas com atividades esportivas. O que demonstra que o ruído da sala de aula pode contribuir para aumentar a carga vocal dos professores.

Ainda sobre investigações dos efeitos do excesso de esforço vocal, Astolfi et al. (2015) fizeram experimentos com alunos e professores analisando os efeitos da elevação do tom da voz e relação com o tempo de pausa da fala no discurso corrido,

associando períodos maiores como comunicação mais clara. Segundo os autores, o tempo de reverberação não influencia as alterações na duração da voz no caso de professores que falam alto, apesar de identificarem velocidade de fala mais lenta em salas mais reverberantes.

Um importante aspecto no impacto do comportamento acústico na saúde é também a relação de conflito na necessidade de conter a geração de ruídos fechando portas e janelas. Isso impacta fortemente nas condições de ventilação natural que também são necessárias para prevenção de disseminação de doenças pelo ar.

Aguilar et al. (2023) conduziram experimentos com base na necessidade de ventilação das salas de aula para diminuir a transmissão de vírus pelo ar com o impacto da Covid-19 (OMS, 2024). As medições de parâmetros acústicos foram feitas em condições de ventilação ativa (portas e janelas abertas) e inativa (portas e janelas fechadas), verificando principalmente a influência do aumento do ruído do trânsito. Os resultados dos autores apontam que nenhuma das salas apresentam tempo de reverberação aceitável e identificaram divergências significativas na interrelação dos parâmetros de avaliação acústica comparando as medições em configuração de ventilação ativa e inativa. Condições como essa podem confrontar os valores ideais de avaliação, reforçando a necessidade de novos valores para situações especiais como comportamento necessário das salas de aula para obter qualidade acústica em configuração apropriada para questões de saúde.

De la Hoz-Torres et al. (2021) também conduziram uma pesquisa sobre isso, citando a Covid-19 (OMS, 2024), com a proposta de identificar configurações de salas de aula (abertura de portas e janelas) mais favoráveis para cumprir exigências da Organização Mundial de Saúde (OMS) e analisaram a influência dessas nos níveis de ruído residual (background noise). Nenhuma das configurações de ventilação sugeridas para as salas do estudo atingiam níveis satisfatórios de ruído residual. Foi verificado que a configuração com melhor ventilação natural adotada para cada sala causou aumentos entre 6,4 a 12,6 dB nos níveis de ruído residual, reforçando os conflitos entre condições favoráveis de ventilação para o cuidado com a saúde e as condições de qualidade acústica. Os autores propõem melhorias no sistema de eletroacústica, indicando a necessidade de equipamentos de amplificação das salas para que essas possam ser utilizadas com janelas abertas, assim como, a necessidade de isolamento entre os ambientes adjacentes.

Fatores climáticos foram outro foco importante em alguns estudos, particularmente em relação ao conforto do usuário. Bhandari, Tadepalli e Gopalakrishnan (2024) investigaram a influência do ruído do ventilador de teto na sensibilidade auditiva dos alunos durante as aulas. Eles usaram questionários e velocidades variadas do ventilador para entender as percepções dos alunos. Seus resultados mostraram uma relação significativa entre desconforto e níveis de ruído de fundo. O método estatístico qui-quadrado de Pearson foi aplicado para avaliar as respostas do questionário, indicando que os alunos tendiam a se sentir mais confortáveis quando os níveis de ruído de fundo não excediam 61 dB, o tempo de reverberação (TR) estava abaixo de 0,7 segundos e a relação sinal-ruído (SNR) estava acima de 6,5 dB.

3.1.4.8 *Considerações econômicas*

O investimento para executar soluções de tratamento acústico disponíveis no mercado pode ser extremamente alto e diversas pesquisas investigam materiais alternativos com a justificativa da viabilidade econômica. Entre os 29 trabalhos selecionados nessa revisão, apenas 2 trabalhos ($n = 2$) aprofundaram os aspectos econômicos na avaliação e correção acústica de salas de aula universitárias.

O trabalho de Razali; Din e Ramdan (2023) abordou medições acústicas de duas salas de aula com o objetivo de comparar por meio de simulações computacionais, 7 propostas de intervenções com materiais de baixo custo, como: cortinas de tecido e placas de cortiça; e 1 proposta com material acústico comercial. A partir dos testes, eles perceberam que as modificações no teto reduziram significativamente o tempo de reverberação nas duas salas, comparado com as opções que focaram mais na superfície de paredes e janelas. Os resultados das simulações mostraram que 3 propostas de baixo custo alcançam valores aceitáveis de TR nas duas salas, sendo elas: cortina de veludo no teto + placa de cortiça de 25mm na parede; cortina de veludo no teto + cortina densa na janela; e cortina de veludo no teto + placa de cortiça de 25mm na parede + cortina densa na janela. O trabalho também trouxe dados do investimento financeiro de cada proposta de intervenção e valores de economia com o uso das intervenções de baixo custo.

Outro estudo que investigou soluções custo-efetivas para propostas de tratamento acústico foi conduzido por Ribeiro et al. (2024). Algumas considerações

também foram feitas sobre a disponibilidade local de materiais de construção, que influenciam significativamente os custos econômicos e as propriedades de segurança, como resistência ao fogo, ao selecionar materiais testados regularmente. Para o tratamento acústico de duas grandes salas de aula padrão, o custo estimado seria inferior a US\$ 15.000 para atender às regulamentações internacionais.

3.2 LEVANTAMENTO DE TESES E DISSERTAÇÕES NO BRASIL

Visto a importância de analisar no âmbito nacional quais trabalhos poderiam contribuir para a investigação e lacuna de pesquisa, foi feito o levantamento no “Catálogo de Teses e Dissertações da CAPES”, buscando dados sobre o quantitativo de trabalhos, títulos e principais palavras-chave em língua portuguesa.

Foram utilizadas as palavras-chave com o operador booleano “AND”: “acústica de salas” AND “sala de aula” AND “universidade”.

A busca resultou em 38 trabalhos, 3 teses de doutorado, 30 dissertações de mestrado, 2 trabalhos de mestrado profissionalizante e 2 trabalhos profissionalizantes. Esse levantamento foi feito em dezembro de 2023. O trabalho mais antigo tem a data de 1996 e o mais recente 2023, os trabalhos foram listados na Tabela 3.

Tabela 3. Levantamento de Teses e Dissertações

	Área do Conhecimento	Nível	Nº trabalhos	Acesso aos trabalhos
1	Arquitetura e Urbanismo	Mestrado (5) e Doutorado (1)	6	Sim
2	Ciências Ambientais	Mestrado (1) Profissionalizante (1)	2	Sim
3	Educação	Mestrado (1)	1	Não
4	Engenharia Agrícola	Mestrado (1)	1	Sim
5	Engenharia Civil	Mestrado (9) Doutorado (2) e Profissionalizante (1)	12	10 trabalhos disponíveis
6	Engenharia de Produção	Mestrado (1)	2	Sim
7	Engenharia Mecânica	Mestrado (8)	8	4 trabalhos disponíveis
8	Engenharia Urbana	Mestrado (1)	2	Sim
9	Ensino de Física	Mestrado Profissionalizante (1)	1	Sim
10	Gestão Pública	Mestrado Profissionalizante (1)	1	Sim
11	Planejamento e Gestão Ambiental	Mestrado (1)	1	Sim
12	Saúde Coletiva	Mestrado (1)	1	Não

Fonte: A autora. Adaptado de Catálogo de Teses e Dissertações da CAPES (2024).

Alguns trabalhos anteriores ao tempo de criação da plataforma Sucupira, que abriga o Catálogo de teses e dissertações da CAPES, não foram encontrados com

disponibilização do texto completo. Desses, 7 estavam indisponíveis, restando 31 trabalhos que foram analisados.

A área do conhecimento com maior número de trabalhos é Engenharia Civil, seguida da Engenharia Mecânica e Arquitetura e Urbanismo. Os trabalhos de Arquitetura e Urbanismo permearam os temas de avaliação de salas com apresentação de testes e parâmetros acústicos, correlações com conforto térmico e aberturas para ventilação.

Ferreira (2006), Souza (2021), Daga (2019), Moura (2011) e Alves (2018) produziram trabalhos sobre avaliação de salas de aula em universidades.

A maior parte dos trabalhos apresentou estudos de caso em salas de aula de escolas: Zwirts (2006), Santos (2012), Ikeda (2019), e Eniz (2004). Dentre esses, Silva (2014) e Dias (2009) abordaram os impactos entre conforto acústico e conforto térmico, investigando configurações de uso das salas com controle da temperatura. Silva (2018) investigou o impacto do ruído aéreo no entorno com quadras poliesportivas.

Outros trabalhos trouxeram avaliações acústicas acrescentando métodos subjetivos, voltados para o conforto do usuário com aplicação de questionários e entrevistas, trazendo o tema para as relações pessoa e ambiente: Gonçalves (2008), Lacerda (2018), Rabelo (2015), Auad (2007), Teixeira (2014). Além do contexto do controle de ruídos sonoros envolvendo enfermidades e doenças neurodivergentes, que não é o foco dessa dissertação, mas evidencia um amplo nicho de investigações mais recentes, como projeto de espaços urbanos para autistas (Paula, 2023).

A busca também trouxe trabalhos em ambientes de ensino com salas com atividades diferentes de aulas expositiva, como salas de aula para prática e ensino de música (Brum, 2012; Marros, 2011; Viero, 2012) e salas de conferência em ambiente escolar (De Abreu Filho, 2013).

Breginski (2021), Ribeiro (2020) e Assis (2013) investigaram o desempenho acústico voltado para materiais. O primeiro pesquisou sobre absorção de cortinas em salas de aula, o segundo a aplicação de painéis de madeira e o terceiro analisou variações de layout de materiais de absorção.

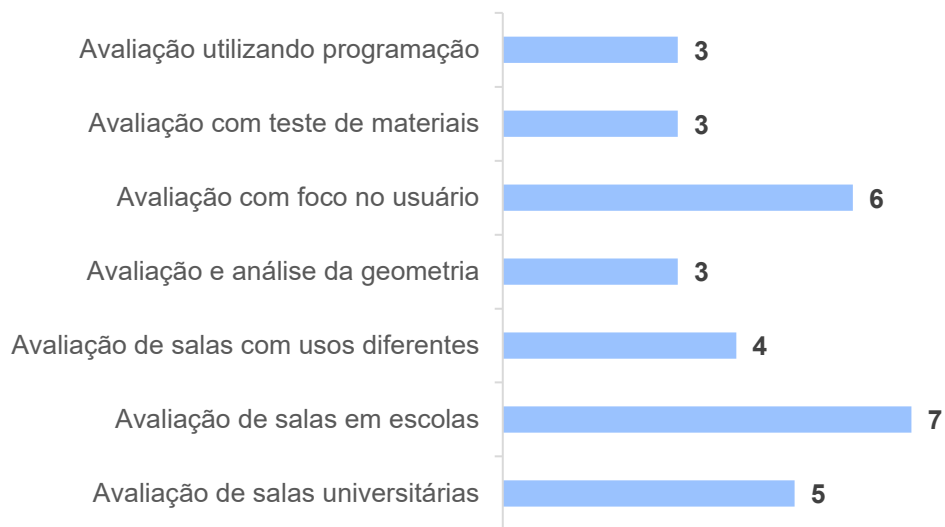
Em relação a acústica geométrica, Oliveira (2006), Amorim (2007) e Souza (2019) fizeram trabalhos com foco no dimensionamento e análise do formato das salas, descrevendo relações da forma com resultados de medições *in loco* e simulações.

A complexidade dos trabalhos de condicionamento acústico também pode se estender para os campos da programação e processamento de sinais, como por exemplo o trabalho de Costa (2008), que desenvolveu algoritmos para cálculo de parâmetros acústicos.

Nessa mesma linha de trabalhos, modelos físicos e matemáticos têm sido utilizados para simulações de escuta, avaliando a capacidade de articulação em estudos de inteligibilidade da fala. Isso foi feito no trabalho de Mahl (2022) que utilizou a aurilização¹ para avaliação de inteligibilidade em salas de aula e Nascimento (2019) que pesquisou sobre redes neurais, método que utiliza modelagem matemática para caracterização da resposta impulsiva associada à cabeça.

O Gráfico 1 relaciona a quantidade de trabalhos a partir do foco de avaliação. Apenas os trabalhos com texto completo disponível foram considerados.

Gráfico 1. Relação de trabalhos e foco de avaliação



Fonte: A autora. Adaptado de Catálogo de Teses e Dissertações da CAPES (2024).

Esse levantamento complementar foi necessário para identificar quais tópicos dentro do tema central do desempenho acústico já haviam sido desenvolvidos e o que poderia ser aprofundado para uma pesquisa nova.

¹ Processo derivado da Realidade Virtual Acústica (RVA), técnica que recria ambientes virtuais acústicos com base em resultados de uma medição ou simulação, que consiste na reprodução de sinais sonoros com o objetivo de obter a sensação auditiva de um ouvinte como se esse estivesse no ambiente simulado (TAMINATO; TENENBAUM, 2018).

3.2.1 Conclusões acerca da revisão de literatura

A revisão sistemática de literatura permitiu identificar estudos específicos para a temática de salas de aula universitárias, contextualizando alguns desafios e as principais formas de avaliar acusticamente esses espaços. Notoriamente, os artigos levantados na revisão de literatura mostraram resultados desfavoráveis do comportamento sonoro em diferentes países, mas com salas de aula com características parecidas: formato regular e materiais reflexivos.

A principal contribuição desse trabalho é o aprofundamento da análise de condicionamento acústico estudando as soluções de tratamento desses espaços fechados, observando os resultados obtidos para construir propostas de intervenções viáveis para as salas de aula do objeto de estudo.

Os estudos levantados pela revisão de literatura demonstraram diferentes métodos de mensuração dos parâmetros acústicos, variando conforme disponibilidade dos equipamentos e softwares de simulação computacional. Dentre elas, a mais viável para esse estudo é o método do ruído interrompido, pois essa utiliza equipamentos disponíveis no laboratório de Conforto Ambiental do Departamento de Arquitetura e Urbanismo da UFSC.

Os trabalhos citaram com maior ênfase o método do ruído impulsivo, utilizando equipamentos mais modernos como o software Dirac, em que os parâmetros são obtidos de forma automática. No entanto, como alternativa para esse trabalho, o método será incluído com a proposta do estouro de balão, citados nos trabalhos de Astolfi et al. (2015), Razali; Din e Ramdan (2023) e Cudina, Prezelj e Cudina (2015).

Os métodos analíticos de cálculo foram citados nos trabalhos de teses e dissertações e são viáveis como alternativa didática e comparação com os dados obtidos *in loco*.

A simulação computacional apareceu nos trabalhos como uma forma de testar as soluções estudadas e alguns trabalhos partiram desses resultados para então construir protótipos físicos com mais assertividade. Logo, esse instrumento também será aplicado para esse trabalho, criando um modelo digital para simular propostas de correção das salas.

O Quadro 2 resume o conteúdo da revisão de literatura que servirá de base para estruturar e cumprir os objetivos propostos pelo trabalho. Foram identificados os

parâmetros acústicos objetivos que melhor avaliam as salas de aula com atividade de fala; quais métodos seriam viáveis para obter resultados desde análises preliminares, na ausência de equipamentos, a dados mais específicos para diagnosticar os problemas; soluções de correção dos estudos levantados que poderiam servir para o objeto de estudo desse trabalho.

Como foram identificados diferentes métodos, esses também poderão ser comparados para entender os níveis de complexidade e veracidade dos dados.

Quadro 2. Síntese da revisão de literatura

Parâmetros acústicos	Métodos de avaliação	Estratégias de correção	
		Absorção	Reflexão
Ruído residual	Ruído interrompido	Painéis absorvedores com câmara de ar na fixação	Aproveitamento das primeiras reflexões (Berardi; Iannace e Trematerra, 2019)
Reverberação (T_{20} e T_{30})	Ruído impulsivo	Troca de carteiras de madeira por carteiras estofadas (Berardi; Iannace e Trematerra, 2019)	
Definição (D_{50})	Analítico (Fórmula de Sabine)	Quadros com lã mineral entre a tela e a moldura (Cudina; Prezelj e Cudina, 2016)	Aumentar a intensidade sonora no fundo da sala (Choi, 2016)
Inteligibilidade da fala.	Simulação	Forro acústico ($NRC=0.8$) (Selim e Saeed, 2022)	

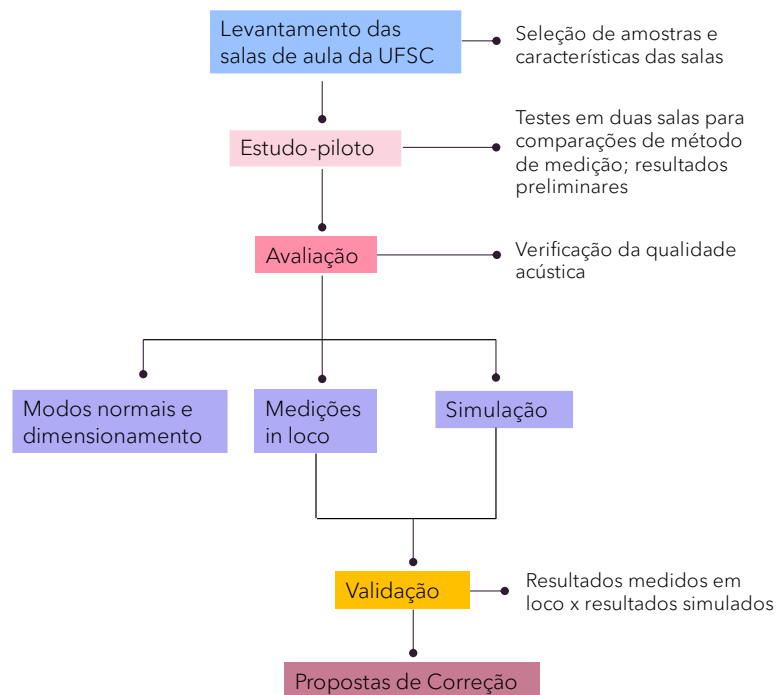
Fonte: A autora (2024).

4 METODOLOGIA

A pesquisa teve como foco principal a avaliação de condicionamento acústico de salas de aula, buscando também a partir da revisão de literatura, a descrição de parâmetros acústicos pertinentes para o diagnóstico e prescrição de correção.

Para isso, as propostas de obtenção de resultados foram feitas utilizando os recursos de cálculo analítico, medições *in loco* e de forma simulada com modelo digital e software de simulação acústica. O diagrama da Figura 7 relaciona as sequências de etapas do trabalho.

Figura 7. Diagrama metodológico da dissertação



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

A etapa de “Levantamento” consistiu na coleta de dados sobre as características das salas de aula do campus UFSC Trindade a partir do sistema da universidade, identificando alguns quantitativos como: número de salas, capacidade de alunos e infraestrutura disponível. Foram feitas visitas em diferentes salas de aula do campus como observação para compreender as variações construtivas e então elencar possíveis salas que correspondessem aos tipos de sala de aula padrão.

Com a definição das amostras de estudo, o passo seguinte consistiu no “Estudo-piloto”, com a intenção de testar duas possibilidades de métodos de ensaio (impulsivo e ruído interrompido), utilizando duas das salas selecionadas como teste.

A etapa de “Avaliação”, aplicou os métodos analíticos descritos no Capítulo 3, ensaios *in loco*, com as considerações do estudo-piloto, e simulação. O objetivo de testar diferentes métodos de avaliação foi justamente demonstrar formas de obter resultados de avaliação mesmo que sem equipamentos ou condições limitadas, discutindo formas de chegar preliminarmente em um condicionamento acústico adequado.

Os resultados das simulações foram validados, utilizando o cálculo do JND em conjunto com os resultados medidos *in loco*, compondo a etapa de “Validação” e como consequência da avaliação, foram realizadas propostas de correção das salas com uso da simulação computacional.

4.1 LEVANTAMENTO E SELEÇÃO DAS SALAS DE AULA

Com o objetivo de identificar quais poderiam ser as salas de aula padrão no campus, foi feito um gráfico de frequência de ocorrência, analisando a quantidade e capacidade de alunos. A busca adotou como critério salas não atípicas, respeitando sistemas construtivos e configuração geométrica de maior repetição no campus e principalmente, salas com uso de atividades de aulas expositivo dialogadas.

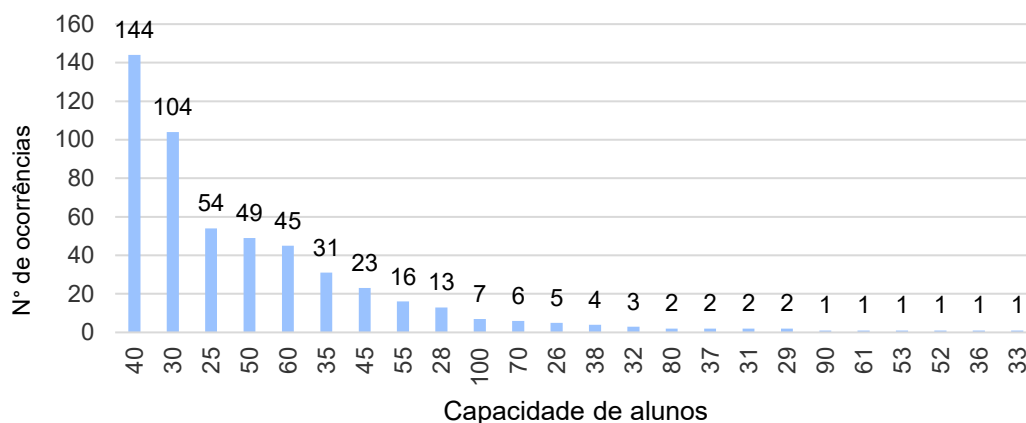
4.1.1 Seleção de amostras de salas de aula

Para a seleção de amostras de salas de aula, foi identificado a partir do "Sistema Integrado de Espaço Físico" (SIEF) da UFSC o quantitativo de salas de aula cadastradas, considerando como primeiro recorte, para limitação dessa pesquisa, apenas as salas ativas do Campus da cidade de Florianópolis.

Foram listadas apenas amostras que tratassem de salas de aula expositiva com carteiras escolares, com capacidade mínima de 25 alunos. O total foi de 537 registros de salas de aula ativas no sistema (UFSC, 2024). Considerando esse banco de dados, foi feita a verificação e exclusão das amostras que não se encaixavam no escopo da pesquisa, tais como: salas de informática, laboratórios e outras atividades diferentes da proposta, que por limitação do sistema não poderiam ser filtradas.

A escolha dos exemplares ocorreu com base no critério de frequência de ocorrência, número de vezes que a amostra foi observada (Costa Neto, 2002), utilizando como parâmetro a capacidade de alunos e a quantidade de salas respectivamente. Os resultados foram apresentados no Gráfico 2.

Gráfico 2. Relação de ocorrências de salas de aula por capacidade de alunos



Fonte: A autora com base nos dados de SIEF UFSC (2024).

As salas com maior número de ocorrências foram as que possuem capacidade para 40, 30, 25, 50, 60 e 35 alunos. A partir da análise do histograma, Gráfico 2, foi possível selecionar, a esmo, exemplares que representassem salas de aula típicas do local de estudo (Costa Neto, 2002). A Tabela 4 mostra a relação de exemplares de amostra selecionados de acordo com a capacidade de alunos.

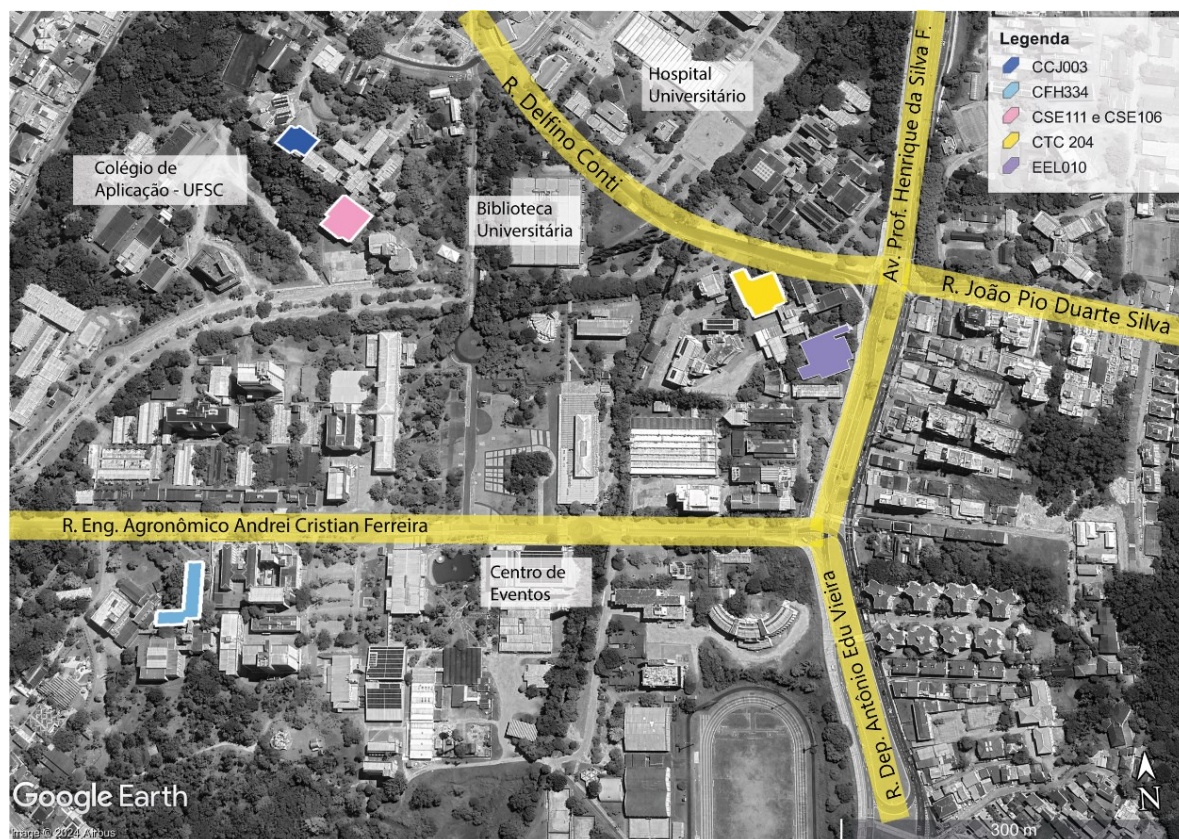
Tabela 4: Exemplares de salas de aula

Sala	Capacidade	Local	Dimensões (m) (LxCxH)	Volume (m³)
EEL010	40	Centro Tecnológico	7,12x7,11x2,99	151,36
CSE111	30	Centro Socioeconômico	7,14x5,99x3,29	140,70
CSE106	25	Centro Socioeconômico	7,14x4,75x3,29	111,58
CCJ003	50	Centro de Ciências Jurídicas	5,93x8,20x3,13	152,19
CTC204	60	Centro Tecnológico	7,06x10,69x3,31	249,81
CFH334	35	Centro de Filosofia e Ciências Humanas	7,15x7,09x3,15	159,68

Fonte: A autora (2024).

Para uma análise mais representativa das amostras, foram levantados exemplares em centros de diferentes cursos, limitando-se à permissão de acesso e tipo de uso da sala. A Figura 8 traz a localização dos exemplares dentro da extensão do campus universitário.

Figura 8. Localização das salas de aula



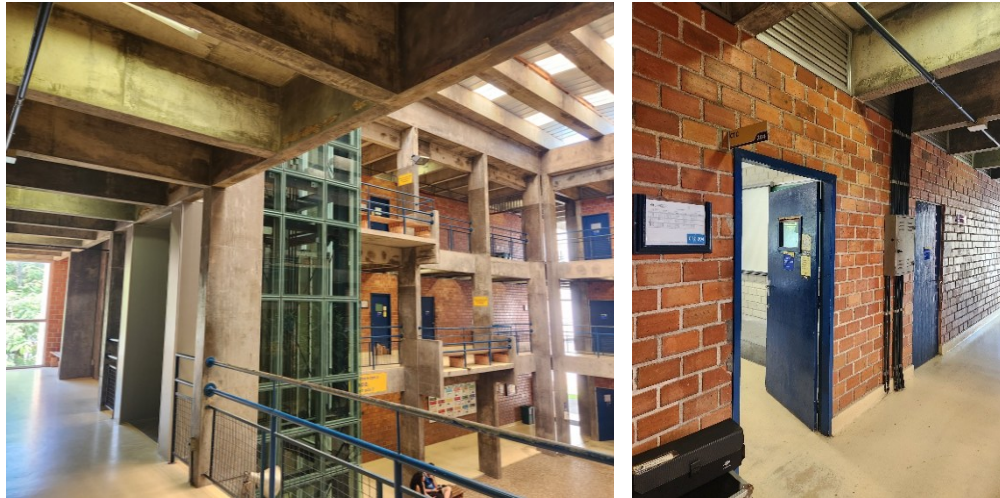
Fonte: A autora, adaptado de Google Earth (2024).

4.1.2 Características arquitetônicas das salas e prédios

A análise do contexto das salas de aula é um importante fator que precede algumas características que influenciam no condicionamento acústico das salas como um todo. Os centros de ensino que alocam as salas possuem características construtivas semelhantes como grandes halls que antecedem os acessos das portas, estruturas em concreto e alvenaria aparentes, como ilustrado na Figura 9.

O prédio Bloco B do Centro Tecnológico (CTC), possui um átrio com cobertura de telhas translúcidas para iluminação natural e corredores integrados com guarda-corpos de ferro pintados, todos materiais reflexivos.

Figura 9. Prédio do Centro Tecnológico (CTC)



Fonte: A autora (2025).

O Departamento de Ciências Socioeconômicas (CSE) é semelhante ao CTC, com paredes em blocos aparentes e piso em cimento queimado, Figura 10. Esse apresenta conjuntos de salas menores, havendo também outros materiais como divisórias e portas de correr.

Figura 10. Departamento de Ciências Socioeconômicas (CSE)



Fonte: A autora (2025).

O Departamento de Ciências Jurídicas diverge dos demais por não ter estruturas em concreto aparente, as paredes dos corredores e o teto são rebocados e o piso tipo cerâmico, ilustrado na Figura 11.

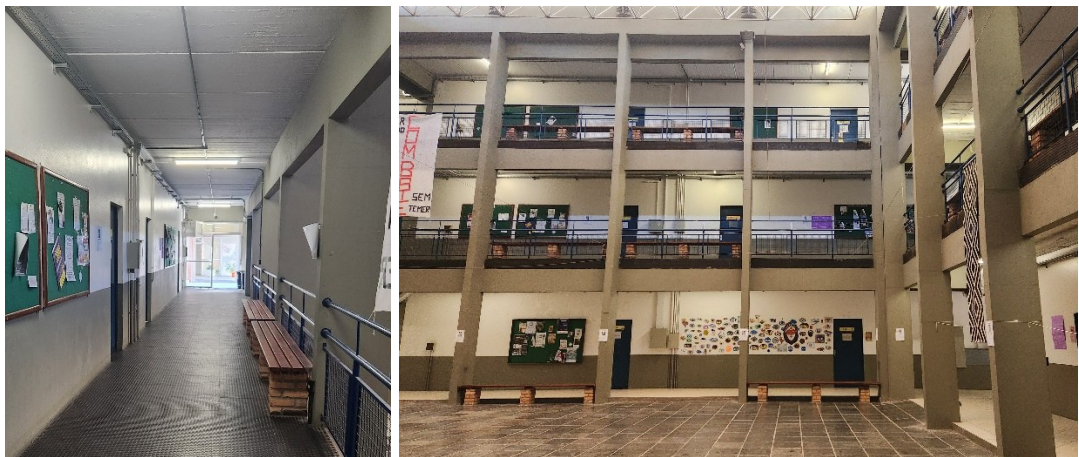
Figura 11. Departamento de Ciências Jurídicas (CCJ)



Fonte: A autora (2025).

O Departamento de Ciências Humanas e Filosóficas (CFH) possui corredores revestidos com piso de borracha e cobertura em laje treliçada em concreto aparente, Figura 12. O prédio também possui átrio central com telhas translúcidas e balcões com guarda-corpo de ferro pintado.

Figura 12. Departamento de Ciências Humanas e Filosóficas (CFH)



Fonte: A autora (2025).

As salas selecionadas variam em dimensões e alguns sistemas construtivos. Todas as salas possuem paredes em alvenaria com diferenças de acabamento, algumas com blocos cerâmicos aparentes pintados, outras com paredes rebocadas com pintura acrílica. As salas com menor capacidade de alunos possuem paredes inferiores compostas por divisórias tipo Eucatex, sem tratamento, permitindo modulação mais flexível. Existem outras variações, como piso, sistema de abertura

de portas e janelas, teto, tipo de carteiras escolares e material das lousas, como mostra a Figura 13.

Figura 13. Salas de aula



(a) EEL010



(b) CSE111



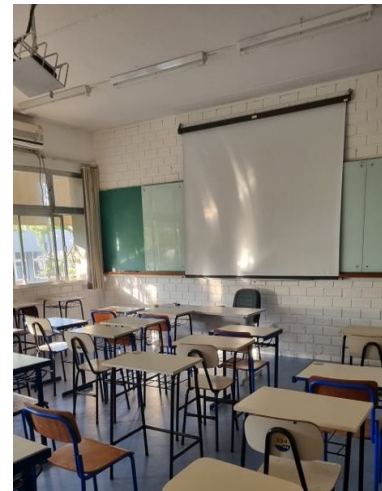
(c) CSE106



(d) CCJ003



(e) CTC204



(f) CFH334

Fonte: A autora (2023).

A sala CTC204, por estar situada no pavimento térreo, próximo a uma via movimentada, recebeu em uma última reforma a instalação de janelas de correr sobrepondo as janelas *maxim-ar* originais. A sala também possui três portas, uma na parede da lousa, mantida fechada, e outras duas, de acesso principal, no início e final da extensão da sala.

O Quadro 3 mostra a relação de materiais construtivos dos exemplares de salas de aula analisados.

Quadro 3. Materiais construtivos das salas de aula

SALAS	PAREDES	PISO	TETO	CORTINA	JANELA	CARTEIRA	LOUSA	PORTA
EEL010	Alvenaria tinta acrílica	Cerâmico Palco em concreto	Laje rebocada	Tecido	Maxin-air Vidro comum	Madeira e cadeira de madeira	Madeira	Madeira
CSE111	Alvenaria com blocos aparentes pintados	Cimento	Laje e vigas aparentes	Tecido	Maxin-air vidro comum	Estofada com prancheta	Vidro	Correr 1 folha, madeira
	Divisória							
CSE106	Alvenaria com blocos aparentes pintados	Cimento	Laje e vigas aparentes	Tecido	Vidro comum maxin air	Estofada com prancheta	Vidro	Correr 1 folha, madeira
	Divisória							
CCJ003	Alvenaria tinta acrílica	Cerâmico	Laje rebocada	-	Maxin air Vidro comum	Estofada com prancheta	Vidro	Madeira
CTC204	Alvenaria com blocos aparentes pintados	Cimento	Laje e vigas aparentes	Tecido	Dupla, maxin-air e de correr	Fórmica e cadeira de madeira	Madeira	Madeira
CFH334	Alvenaria com blocos aparentes pintados	Vinílico	Laje rebocada	Tecido	De correr vidro comum	Fórmica e cadeira de madeira	Vidro com madeira atrás	Madeira

Fonte: A autora (2024).

4.2 MEDIÇÕES ACÚSTICAS *IN LOCO*

Os ensaios *in loco* tiveram como objetivo a medição do tempo de reverberação e ruído residual, esses também foram utilizados para a estimativa da inteligibilidade.

4.2.1 Medição do ruído residual

As medições do ruído residual ocorreram nos mesmos momentos das medições do tempo de reverberação, posicionando o sonômetro no meio de cada uma das salas. As medições foram programadas com a duração de captação do ruído por 30 segundo. Os valores foram obtidos nas frequências padrões de banda de oitava: 125 Hz – 4000 Hz.

Para obtenção do ruído residual, foi medido o parâmetro B2, com auxílio do sonômetro, expressando os valores do nível de pressão sonora em dB. As medições foram feitas com portas e janelas fechadas e com equipamentos desligados.

4.2.2 Medição do Tempo de reverberação (T_{30})

Com intuito de comparação, na primeira etapa desse trabalho, chamada de Estudo-piloto, foram feitos ensaios do tempo de reverberação utilizando os métodos ruído impulsivo, através do estouro de balões e o método do ruído interrompido, utilizando fonte sonora omnidirecional.

De acordo com a norma ABNT IEC 60268:16 (ABNT, 2018), o ruído impulsivo é caracterizado como som ou ruído composto por breves surtos de pressão sonora. O estouro de balão foi a alternativa escolhida pela facilidade de execução.

Para o método ruído interrompido, o estímulo sonoro foi gerado com o ruído rosa (*pink noise*) produzido pelo sonômetro. O ruído rosa é amplamente utilizado em medições de tempo de reverberação devido à sua distribuição espectral que decresce 3 dB por oitava, garantindo energia uniforme em cada banda de frequência de análise, especialmente nas bandas de oitava e de terço de oitava utilizadas na caracterização acústica de ambientes (Kuttruff, 2016).

O tempo de reverberação foi obtido através do parâmetro T_{30} , que corresponde ao tempo de reverberação obtido por extrapolação linear de um trecho de 30 dB, especificamente entre -5 dB e -35 dB abaixo do nível máximo do decaimento sonoro registrado. Esse método é padronizado pelo conjunto de normas ABNT ISO 3382 (ABNT, 2017a), que estabelecem esse intervalo como adequado para assegurar a confiabilidade do ajuste linear e minimizar a influência do ruído de fundo.

A fundamentação teórica desse procedimento se apoia na suposição de que o decaimento de energia sonora em ambientes fechados é aproximadamente linear quando representado em escala logarítmica (dB) ao longo do tempo (Kuttruff, 2016; Vorländer, 2008).

A Figura 14 exemplificou a sequência dos equipamentos para medição e extração dos dados para os dois métodos de ensaio *in-loco* mencionados nesse trabalho.

Figura 14. Esquema dos métodos de medição *in loco*



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

4.2.3 Equipamentos

Os equipamentos de medição utilizados foram disponibilizados pelo Laboratório de Conforto Ambiental do Departamento de Arquitetura e Urbanismo da UFSC (LabCon), tais como fonte sonora dodecaedra, amplificador, sonômetro, microfone e trena eletrônica para medição dos pontos, Quadro 4. Para as medições com o método do ruído impulsivo foram utilizados balões médios de 9 polegadas da marca Acrilex.

Quadro 4. Equipamentos para medições *in loco*

Equipamento	Marca	Modelo	Nº Série	Função utilizada
Sonômetro	Brüel & Kjær	Investigator 2260		Medição do ruído aéreo
Amplificador de potência		2716	2559853	Amplificação do ruído rosa
Fonte Sonora Omnidirecional Dodecaédrica		Type 4296	249857	Reprodução do ruído
Microfone		4189	2820095	Captação do ruído
Balão 9"	Acrilex			Ruído impulsivo

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

4.2.4 Posições de microfones e fontes sonoras

Para estabelecer a quantidade de pontos para fontes e receptores, utilizou-se as recomendações da norma técnica ABNT ISO 3382-2, escolhendo para o objetivo do ensaio o método de engenharia, tendo em vista que esse se adequa a situação de verificação do desempenho de edificações para comparativo de tempo de reverberação ou de absorção de salas. Esse método prescreve como mínimo, seis combinações fonte-microfone sendo dois pontos de fonte para ensaios de tempo de reverberação. Dessa forma foram locados em cada sala: duas posições de fonte sonora e três pontos de microfones (ABNT, 2017a).

Devido o layout semelhante das salas de aula, as fontes foram posicionadas (F1) próximo ao quadro, (F2) fundo da sala. Os microfones (M1), (M2) e (M3), foram arranjados de forma que ficassem cada um em uma parte da sala, respeitando distância mínima das paredes, portas e janelas.

4.2.5 Medições do estudo-piloto

Os ensaios da etapa do estudo-piloto foram feitos nas salas EEL010 e CTC204 com o intuito de experimentar os dois métodos de medição citados no tópico “4.2.1”, medindo apenas o tempo de reverberação.

Os ensaios na sala EEL010 ocorreram nos dias 04/06/2024 (método do ruído interrompido) e 24/09/2024 (método do ruído impulsivo com estouro de balão).

Os ensaios na sala CTC204 ocorreram nos dias 24/09/2024 (método do ruído impulsivo com estouro de balão) e 26/09/2024 (método do ruído interrompido).

As medições foram feitas em dias diferentes devido a necessidade de as salas estarem vazias, sendo assim, durante o período de intervalo das aulas, entre 12h e 13h. Todas as portas e janelas estavam fechadas.

As medições utilizando o estouro de balão foram feitas a critério de estudo, verificando a viabilidade do método e comparação entre os métodos: impulsivo e ruído interrompido. Para melhores resultados, dada a falta de confiabilidade do balão como estímulo sonoro, foi escolhido o método do ruído interrompido para a continuação do trabalho e ensaios definitivos das seis salas de aula.

4.2.6 Medições *in loco*

Após as considerações dos ensaios de estudo-piloto, novos ensaios foram feitos, utilizando o método do ruído interrompido. Os ensaios foram organizados em três momentos de medições devido a disponibilidade das salas de aula, Figura 15.

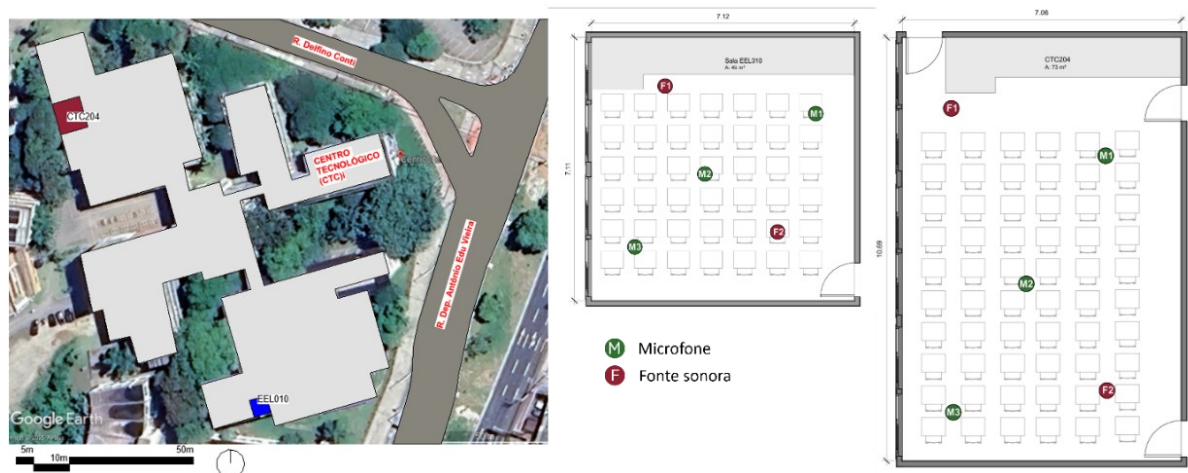
Figura 15. Registros fotográficos das medições *in loco* (Salas CSE111 e CFH334)



Fonte: A autora (2025).

O primeiro momento de medição foi realizado em 28/03/2025 nas salas do Centro Tecnológico (CTC), CTC204 e EEL010, às 12h, momento de intervalo entre aulas. A Figura 16 mostrou de forma esquemática a localização das salas e a planta de locação de pontos, respectivamente.

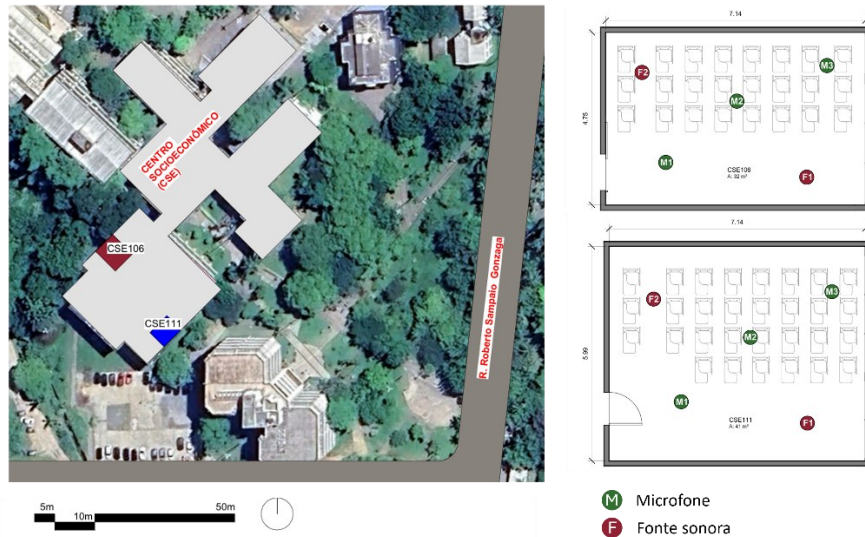
Figura 16. Locação de pontos salas do CTC



Fonte: Elaborado pela autora, adaptado de Google Maps (2025).

O segundo momento de medição foi realizado em 12/05/2025 nas salas do Centro Socioeconômico, Figura 17, CSE106 e CSE111, às 12h, momento de intervalo entre aulas.

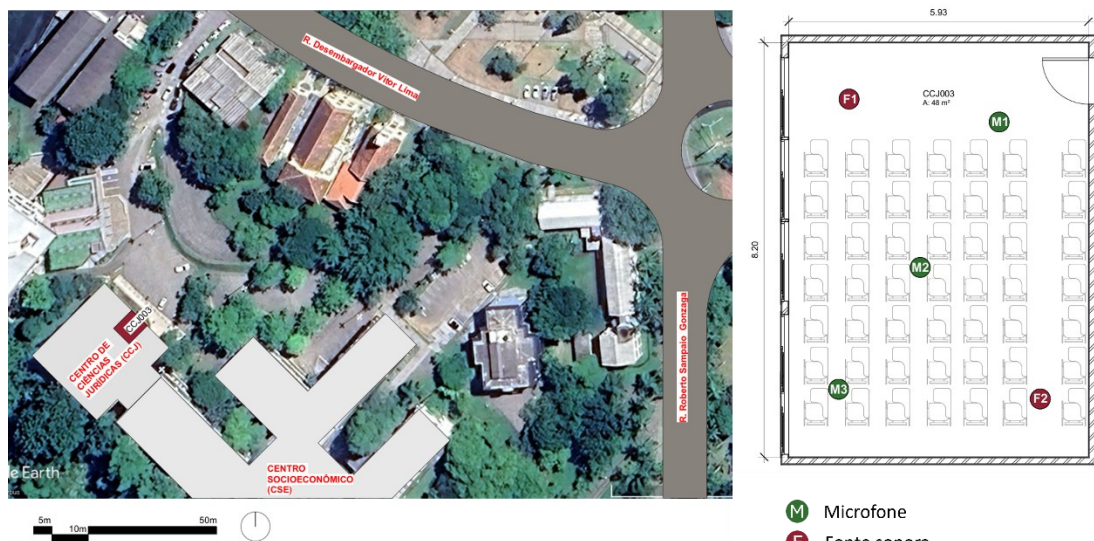
Figura 17. Localização dos pontos das salas do CSE



Fonte: Elaborado pela autora, adaptado de Google Maps (2025).

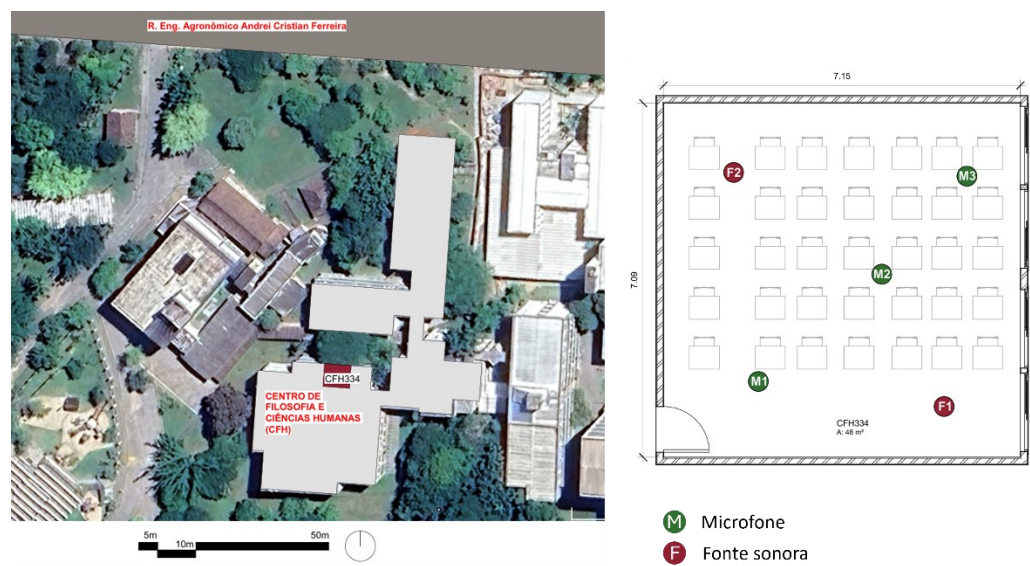
O terceiro momento de medição foi realizado em 31/05/2025 na sala do Centro de Ciências Jurídicas (CCJ), Figura 18, CCJ003 e na sala do Centro de Filosofia e Ciências Humanas (CFH), Figura 19, CFH334. As medições ocorreram no período da tarde em um sábado devido a disponibilidade das salas estarem vazias.

Figura 18. Localização dos pontos sala do CCJ



Fonte: Elaborado pela autora, adaptado de Google Maps (2025).

Figura 19. Locação dos pontos da sala do CFH



Fonte: Elaborado pela autora, adaptado de Google Maps (2025).

4.2.6.1 Aspectos ambientais do local

A Tabela 5 demonstra os registros da estação meteorológica “Florianópolis A806” de temperatura do ar, umidade relativa e velocidade do ar nas datas de ocorrência das medições *in loco*.

Tabela 5. Variáveis climatológicas externas

		Temperatura do ar (°C)	Umidade Relativa (%)	Velocidade do ar (m/s)
Estudo piloto	Medição EEL010	19.9°C (máxima)	75%	2.65 m/s
	04/06/2024	17.3°C (mínima)		
	Medição CTC204	25.1 °C (máxima)	81.2%	2.06 m/s
	26/09/2024	21.4°C (mínima)		
Medições	EEL010 e CTC204	30.0°C (máxima)	76.21%	1.68 m/s
	28/03/2025	23.2°C (mínima)		
	CSE111 e CSE106	22.9°C (máxima)	73.29%	1.12 m/s
	12/05/2025	14.6°C (mínima)		
	CCJ003 e CFH334	21.6°C (máxima)	73.75%	3.08 m/s
	31/05/2025	12.1°C (mínima)		

Fonte: Adaptado de Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2025).

4.3 SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

As simulações acústicas computacionais realizadas para esse trabalho utilizam o software “I SIMPA”, um software considerado “*open-source*”, programa

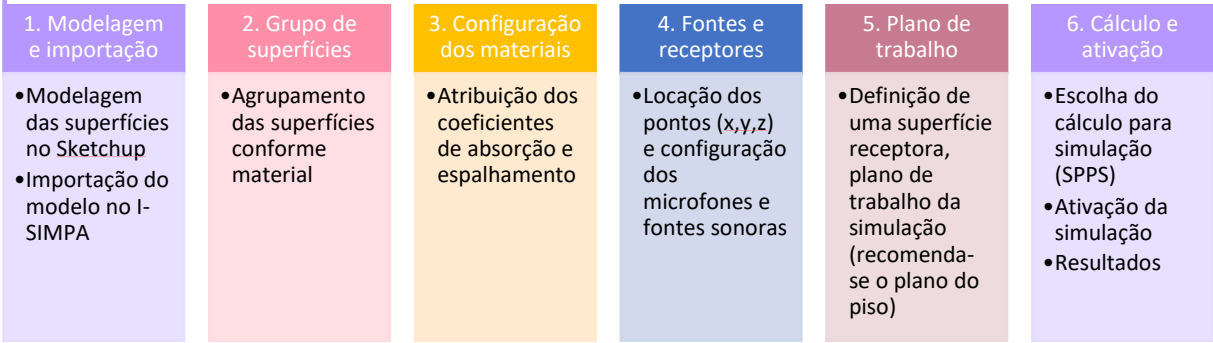
gratuito que utiliza linguagem em código aberto e permite a inserção de programações através da linguagem “python”.

O programa possui duas metodologias de cálculo de parâmetros acústicos: o método da “teoria clássica de reverberação”, que traz valores de tempo de reverberação totais a partir das teorias de Sabine e Eyring; e o método “SPPS”, sigla para “simulação da propagação de partículas sonoras”, que utiliza a metodologia de traçado de partículas, baseando-se na energia equivalente a geometria do modelo importado (Gaudeoso; Barbo; Brandão, 2018).

Para esse estudo, foi aplicado o método “SPPS”, que permite a extração dos principais parâmetros de condicionamento acústico, além do tempo de reverberação, como “Early Decay Time”, Clareza e Definição, não atribuídos ao método da teoria clássica de reverberação.

As etapas de simulação consistem em: 1) modelagem; 2) importação do modelo no programa; 3) atribuição dos coeficientes dos materiais; 4) posicionamento (através de coordenadas cartesianas (x,y,z) e configuração das propriedades dos microfones e fontes sonoras; 5) definição de uma superfície receptora, plano de trabalho da simulação (recomenda-se o plano do piso); 6) escolha do método de cálculo e ativação da simulação, Figura 20.

Figura 20. Diagrama de etapas da simulação computacional



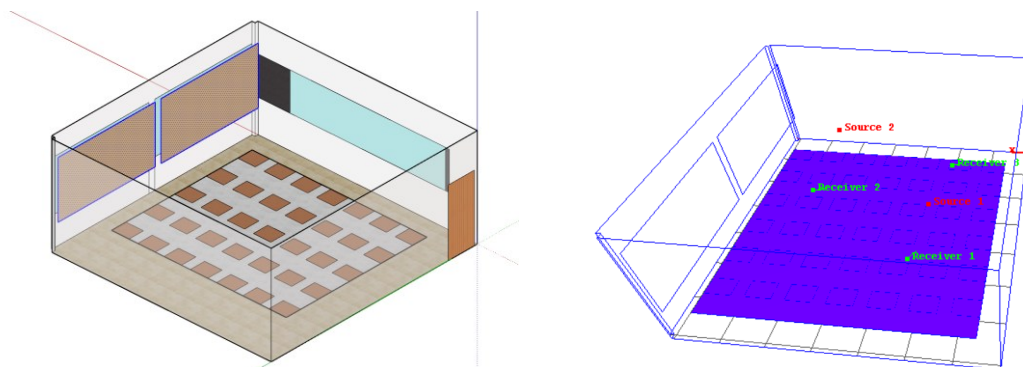
Fonte: Elaborado pela autora (2024).

4.3.1 Modelagem das salas

A primeira etapa da simulação consiste na modelagem 3D das salas de aula selecionadas com auxilio do software Sketchup, para exportação no I-SIMPA. Para

melhores resultados, recomenda-se que a modelagem seja simplificada (Picaut; Fortin, 2012) trazendo os elementos apenas como superfícies planas. As carteiras foram representadas de forma planificada (Ribeiro et al., 2024), como mostra a figura 21.

Figura 21. Modelagem no Sketchup e modelo importado para o I-SIMPA



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Na etapa seguinte foram posicionadas as fontes sonoras omnidirecionais, configuradas como “pink noise” e os pontos de receptores (microfones), distribuídos nos espaços das salas conforme o tópico “4.2.2”, a 1,50m e 1,20m de altura (eixo z) respectivamente, com base na norma NBR ISO 3382:2 (ABNT, 2017a). As superfícies foram agrupadas por tipo de material e atribuídos os respectivos coeficientes de absorção e espalhamento, descritos nas Tabelas 6 e 7. O plano de trabalho adotado, conforme o manual do software, foi o plano do piso (Picaut; Fortin, 2012).

4.3.2 Coeficientes de Absorção

Para atribuir propriedade de absorção aos materiais, foram inseridos os valores respectivos de coeficiente de absorção, descritos por banda de oitava. O software I-SIMPA não possui biblioteca própria de materiais, permitindo a criação de novos materiais ou importação de bibliotecas dos softwares: CATT-Acoustic™ e Odeon. Para esse trabalho foram criados os materiais referentes a cada agrupamento de superfície, inserindo os valores de coeficiente de absorção mais condizentes a partir de referências da literatura, Tabela 6.

Tabela 6. Coeficientes de absorção dos materiais

Material	Coeficiente de absorção por banda de oitava					
	125	250	500	1000	2000	4000
Reboco liso, alvenaria de tijolos ou blocos	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04
Alvenaria de tijolos aparentes pintados	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03
Divisória de gesso tipo drywall	0,10	0,08	0,05	0,03	0,03	0,03
Piso de mármore, cerâmico ou granito polido	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
Piso vinílico	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,04
Concreto ou cimentado liso desempenado	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
Cortina tecido médio	0,05	0,15	0,35	0,55	0,65	0,65
Porta de madeira, pintada ou envernizada	0,24	0,19	0,14	0,08	0,13	0,10
Vidro comum montado em caixilho	0,35	0,25	0,18	0,12	0,07	0,04
Lousa de vidro comum	0,04	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02
Lousa de madeira	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
Carteira escolar simples, vazia	0,02	0,02	0,03	0,04	0,06	0,08
Carteira escolar estofada (*)	0,10	0,13	0,14	0,17	0,18	0,15
Carteira escolar simples, ocupada	0,18	0,24	0,28	0,33	0,37	0,39
Carteira escolar estofada, ocupada (*)	0,20	0,28	0,31	0,37	0,41	0,42

Fonte: Adaptado de Bistafa (2018) (*) Barron (2003).

4.3.3 Coeficientes de Espalhamento

Para representar a difusão das superfícies, ou coeficiente de espalhamento, foram utilizados os valores de Burfoot et al. (2020) e Pilch (2023). Os autores explicam que muitos materiais possuem comportamentos semelhantes, atribuindo mesmo coeficiente de espalhamento. O coeficiente de espalhamento é o limite entre a energia difusa refletida e a energia refletida total (Long, 2014). Os valores utilizados nos métodos analíticos e simulados constam na Tabela 7.

Tabela 7. Coeficientes de espalhamento dos materiais

Material	Coeficiente de espalhamento por banda de oitava					
	125	250	500	1000	2000	4000
Paredes, pisos e teto	0,03	0,03	0,02	0,01	0,01	0,01
Cortinas	0,06	0,07	0,10	0,15	0,15	0,20
Portas de madeira (*)	0,10	0,15	0,15	0,20	0,20	0,20
Janelas	0,10	0,05	0,04	0,04	0,03	0,03
Lousas	0,10	0,05	0,04	0,04	0,03	0,03
Carteira escolar, vazia (*)	0,10	0,15	0,15	0,20	0,20	0,20
Carteira escolar, ocupada	0,62	0,72	0,80	0,80	0,85	0,85

Fonte: Adaptado de Burfoot et al. (2020) e (*) Pilch (2023).

4.3.4 Just Noticeable Differences (JND)

A sigla JND, do inglês “*Just Noticeable Difference*”, ou “Diferença Apenas Perceptível”, faz referência a menor alteração no valor de um parâmetro acústico que pode ser detectada por um ouvinte (Dorrego; Vigeant, 2022). Para simulações acústicas computacionais, o JND serve como limiar na validação dos modelos digitais com os resultados medidos em campo.

De acordo com Vörländer (2007), o JND é um conceito importante na psicoacústica pois torna-se uma referência para mensurar como os humanos percebem o som e como os sistemas de reprodução sonora podem ser otimizados para criar uma experiência de audição mais realista. Aplica-se o limite de 2 JNDs em simulações acústicas, garantindo que as diferenças entre o som real e o simulado sejam imperceptíveis para o ouvinte humano.

A diferença de JND pode ser calculada pela seguinte Equação 9:

$$\text{Diferença em JND} = \frac{|R_{\text{controle}} - R_{\text{simulado}}|}{R_{\text{controle}}} \times \frac{1}{\text{JND do parâmetro}} \quad (9)$$

Onde: R_{controle} é o resultado de controle, ou resultado medido em campo e R_{simulado} é o resultado da simulação computacional.

A ABNT ISO 3382-1 traz valores de referência para o cálculo do JND para os parâmetros acústicos Tempo de Reverberação, Definição e *Early Decay Time*. A norma ABNT IEC 60268:16 traz a referência de STI, Quadro 5.

Quadro 5. Valores de referência para JND

Parâmetro Acústico	Diferença mínima perceptível (JND)
Tempo de Reverberação (TR)	5% relativo
Definição (D_{50})	
Early Decay Time (EDT)	
Índice de Transmissão da fala (STI)	0,03 (*)

Fonte: A autora, com base nas normas ABNT ISO 3382-1 (2017a) e (*) ABNT IEC 60268:16 (2018).

4.3.5 Correção do Tempo de Reverberação para salas ocupadas e vazias

Para obter valores de análise de como seria a reverberação considerando também a ocupação das salas, serão aplicadas as equações das normas DIN 18041 (referência de salas com ocupação) e UNI 11532-2 (referência das salas desocupadas), que apresenta uma equação de correção a partir do tempo de reverberação da sala vazia.

A DIN 18041 estabelece a Equação 9 para cálculo do TR ótimo para ambientes classificados como “A3 – Educação/Comunicação (até 1000m³)”:

$$T_{\text{ott,A3}} = 0,32 \cdot \log(V) - 0,17 \quad (9)$$

Em que: T_{ott} é o tempo ótimo de reverberação para salas com 80% de ocupação.

Para encontrar o valor de correspondência de TR ótimo para salas desocupadas, a UNI 11532-2 estabelece a Equação 10:

$$T_{\text{opt,unocc}} = \frac{T_{\text{opt,occ}}}{1 - T_{\text{opt,occ}} \frac{\Delta A_{\text{pers}}}{0,16 \cdot V}} \quad (10)$$

Em que: $T_{\text{opt,unocc}}$ se refere ao TR ótimo para o caso de salas desocupadas e ΔA_{pers} é a taxa de absorção das pessoas em m².

O valor de ΔA_{pers} utilizado foi de 1 per/m², referente ao layout de carteiras típico das salas analisadas, estabelecendo como total ocupado 80% da capacidade de alunos. Com base nas Equações 9 e 10, foram calculados os valores de TR ótimo na frequência de 500 Hz para as salas desocupadas, Tabela 8. Os valores ajustados para as salas desocupadas serão utilizados como referência para as avaliações.

Tabela 8. TR ótimo mínimo para salas ocupadas e desocupadas

	80% de ocupação (DIN 18041:2016)	Sala desocupada (UNI 11532-2: 2020)
EEL010	0,5	0,8
CSE111	0,5	0,7
CSE106	0,5	0,6
CCJ003	0,5	0,8
CTC204	0,6	0,8
CFH334	0,5	0,7

Fonte: A autora (2024).

5 RESULTADOS

A apresentação dos resultados foi dividida com base nas análises propostas pelo trabalho:

- a) avaliação analítica, contendo os resultados dos métodos calculados de tempo de reverberação e análise de baixas frequências;
- b) resultados dos ensaios na etapa de estudo-piloto;
- c) medições acústicas, contendo os resultados dos ensaios *in loco*; e
- d) simulações, contendo os resultados obtidos com a simulação computacional e os resultados para validação do modelo digital.

5.1 AVALIAÇÃO ANALÍTICA COM BASE NAS DIMENSÕES E TEMPO DE REVERBERAÇÃO DAS SALAS DE AULA

Com base nos métodos analíticos de cálculo do tempo de reverberação (T_{60}) e acústica ondulatoria para análises em baixas frequências, o seguinte tópico trouxe os resultados das avaliações analíticas.

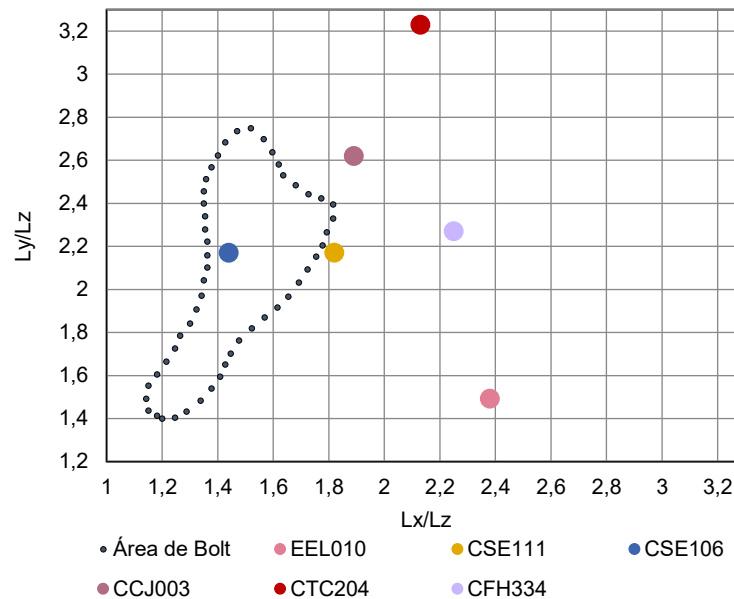
5.1.1 Gráfico de Bolt

As medidas das seis salas de aula foram inseridas abaixo no Gráfico 3, que demonstrou os limites das proporções aceitáveis (Área de Bolt) e as respectivas proporções das salas.

A conclusão foi de que apenas uma sala, a CSE106, atende proporções satisfatórias. As salas CSE111 e CCJ003 aproximam-se um pouco do referencial e as demais salas estão consideravelmente fora das proporções ideais.

As características das salas EEL010 e CFH334 reforçam problemas de ondas estacionárias por terem duas dimensões com medidas iguais (variações de menos de 5 cm), condição mencionada no Capítulo 2 como crítica.

Gráfico 3. Área de Bolt X Proporções das salas de aula da UFSC



Fonte: Elaborado pelos autores com base em Bolt (1946). Nota: Os eixos Lx, Ly e Lz representam a relação entre as medidas das salas de largura, comprimento e altura, respectivamente.

5.1.2 Cálculo dos modos normais e critérios de Bonello

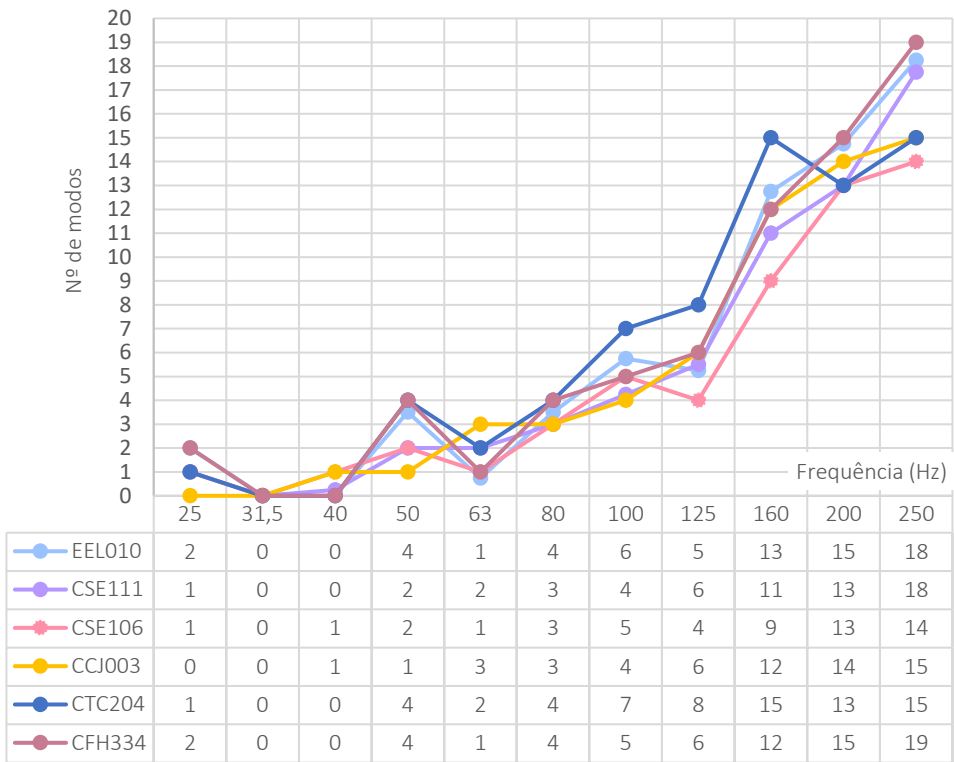
A partir do Gráfico 4 é possível concluir desarmonia entre a distribuição modal, como intervalos de frequências ausentes de modos e outros em que ocorrem modos em duplicidade.

Apenas a análise da distribuição modal da sala CCJ003 apresentou crescimento linear do número de modos, porém a duplicidade de modos é menor do que 5, atendendo apenas um dos critérios de Bonello.

A análise da distribuição modal das demais salas não mostrou aumento de modos monotonicamente, com presença de picos em que os modos aumentam e diminuem, apresentando comportamento mais estável a partir de 125 Hz, em que os modos efetivamente aumentam conforme a elevação da frequência.

Uma distribuição modal satisfatória seria a ordem de um modo por frequência, o que evita a concentração de energia em bandas muito estreitas (Brandão, 2016).

Gráfico 4. Distribuição modal



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

5.1.3 Frequência de Schroeder

A Tabela 9 mostra as dimensões e proporções das seis salas analisadas e cálculos da Frequência de Shroeder (F_s) e distância crítica, obtidos a partir das Equações 6 e 7.

Tabela 9. Proporções das salas e Frequência de Shroeder

Sala	Dimensões	Volume (m³)	Proporções	F _s (Hz)	Distância Crítica (m)
EEL010	7,12x7,11x2,99	151,36	2,38x2,38x1	212	1,05
CSE111	7,14x5,99x3,29	140,70	2,17x1,82x1	192	0,91
CSE106	7,14x4,75x3,29	111,58	2,17x1,44x1	216	0,85
CCJ003	5,93x8,20x3,13	152,19	1,89x2,61x1	217	0,91
CTC204	7,06x10,69x3,31	249,81	2,13x3,22x1	165	1,22
CFH334	7,15x7,09x3,15	159,68	2,26x2,25x1	206	0,89

Fonte: A autora (2024). Nota: Foram utilizados os valores calculados de T_{60} (sala ocupada) em 1000Hz (palavra falada). Dimensões em largura x comprimento x altura.

As distâncias críticas calculadas para as salas, valores entre 0,16 e 0,21 metros, são extremamente pequenas. Isso implica que, além de uma distância muito curta da fonte sonora (a voz humana), o campo sonoro reverberante domina completamente o ambiente (Beranek; Mellow, 2012). Arquitetonicamente, essa condição revela que as salas possuem baixíssima absorção sonora, permitindo que a energia sonora se acumule e persista por tempo demais.

As frequências de Schroeder calculadas, entre 165 Hz e 217 Hz, indicam que, abaixo desses valores, o comportamento acústico das salas é dominado por ondas estacionárias. Isso significa que as baixas frequências podem apresentar uma distribuição de energia não uniforme, gerando ressonâncias específicas ou “cancelamentos” em diferentes pontos do ambiente (Long, 2014).

5.1.4 Tempo de Reverberação Calculado

Utilizando a equação de Sabine, descrita no tópico “2.1.1” em conjunto com os coeficientes de absorção da Tabela 6, foi feito o cálculo analítico do tempo de reverberação (T_{60}) para as faixas de frequência 125-4000 Hz, com resultados expressos na Tabela 10.

Tabela 10. Valores de T_{60} calculado

		Frequência (Hz)					
		125	250	500	1000	2000	4000
Sala EEL010	TR ótimo (Tabela 9)						
TR Calculado sala vazia	0,8	2,6	2,6	2,0	1,7	1,5	1,5
TR Calculado 80% ocupada	0,5	1,5	1,3	1,1	0,9	0,9	0,8
Sala CSE111							
TR Calculado sala vazia	0,7	2,2	2,0	1,6	1,3	1,2	1,4
TR Calculado 80% ocupada	0,5	1,9	1,6	1,3	1,1	1,0	1,0
Sala CSE106							
TR Calculado sala vazia	0,6	1,6	1,6	1,4	1,3	1,2	1,3
TR Calculado 80% ocupada	0,5	1,4	1,3	1,2	1,0	1,0	0,9
Sala CCJ003							
TR Calculado sala vazia	0,8	2,0	2,0	1,9	1,8	1,7	2,0
TR Calculado 80% ocupada	0,5	1,6	1,5	1,3	1,2	1,1	1,1
Sala CTC204							
TR Calculado sala vazia	0,8	2,6	2,6	2,0	1,7	1,6	1,5
TR Calculado 80% ocupada	0,6	1,7	1,6	1,3	1,1	1,0	1,0
Sala CFH334							
TR Calculado sala vazia	0,7	2,8	2,5	1,9	1,7	1,6	1,6
TR Calculado 80% ocupada	0,5	2,2	2,0	1,5	1,3	1,2	1,2

Fonte: A autora (2024). Nota: Valores de T_{60} em segundos.

Com base nos valores de TR ótimo de referência, demonstrados pela correção das normas DIN 18041:2016 e UNI 11532-2:2020 da Tabela 9, todas as salas vazias ultrapassam em mais de 1,0 segundo os valores de referência.

Os melhores resultados aparecem nas frequências mais altas, acima de 1000Hz, mas mesmo com acréscimo de ocupação, nenhuma das salas alcança o TR ótimo recomendado.

5.2 ESTUDO-PILOTO

O seguinte tópico foi elaborado para apresentar os resultados da etapa preliminar do trabalho que consistiu no estudo-piloto. A etapa mediu apenas os resultados das salas EEL010 e CTC204, com o intuito de comparar os resultados dos dois métodos de ensaio *in loco*, ruído impulsivo e ruído interrompido.

Os resultados das medições de tempo de reverberação para cada conjunto de pontos de fonte sonora e microfone, com o método ruído interrompido e ruído impulsivo, estão expressos no Anexo A, nas Tabelas 15 e 16, respectivamente. Para comparação e aplicação nas simulações, foram calculados os valores médios do total de posições de microfone e fonte sonora, para cada banda de oitava, intervalo de 125-4000 Hz.

5.2.1 Resultados dos métodos comparados com TR ótimo

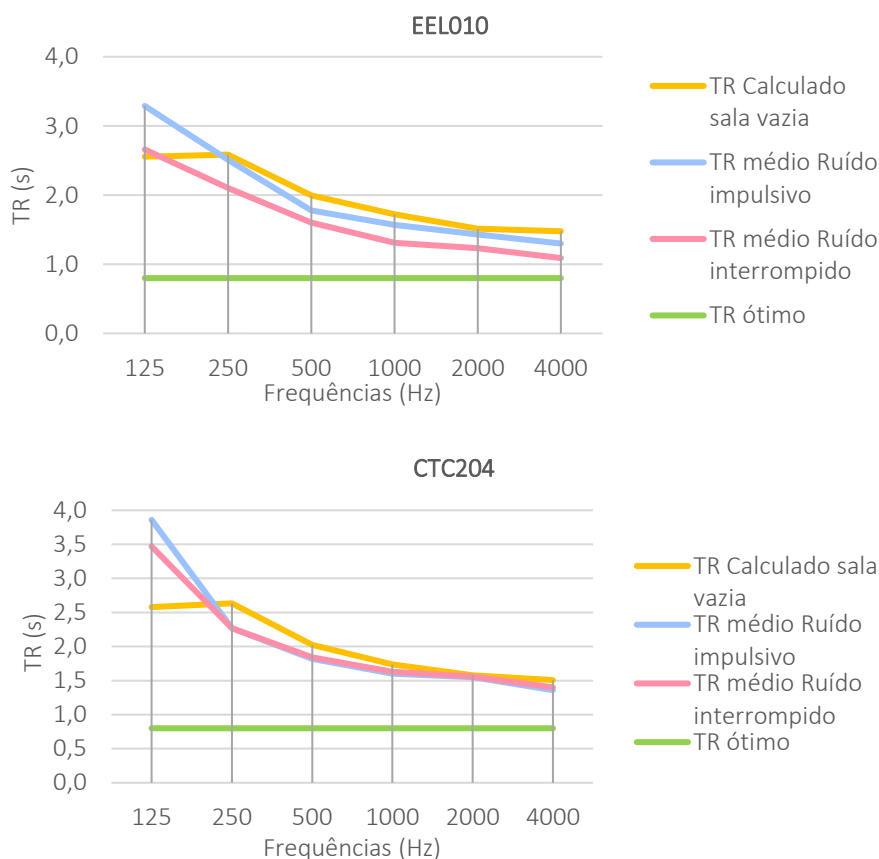
Para obter os primeiros dados de avaliação das salas, foram comparados os resultados dos dois métodos de medição *in-loco* e o tempo de reverberação calculado com os valores de referência ajustados para salas desocupadas apresentados na Tabela 9.

Os resultados de TR mais altos em todos os cenários ocorrem em baixas frequências, ressaltando a importância da análise mais aprofundada feita no tópico “5.1”, que demonstra a interferência de ondas estacionárias, mediante as três dimensões da sala.

O estímulo sonoro através do estouro de balão, apesar da facilidade de execução, apresentou algumas incertezas dada a diferença dos resultados em comparação com o método do ruído interrompido. A maior limitação do estouro de balão foi na captação dos resultados em baixas frequências, dada a variação do

volume de ar e a pressão interna do balão. Dessa forma, o gráfico 5 trouxe os resultados da etapa estudo-piloto.

Gráfico 5. Métodos de ensaio x TR ótimo



Fonte: A autora (2024).

Outros trabalhos como o de Pätynen, Katz e Lokkia (2011) concluíram que o estouro de balão é útil para gerar um ruído impulsivo, porém, não atende aos padrões estabelecidos pela norma ABNT ISO 3382 (ABNT, 2017a) para fontes omnidirecionais, pois o som não é irradiado igualmente em todas as direções. Para obter resultados confiáveis, é essencial que a fonte sonora irradie uniformemente em todas as direções.

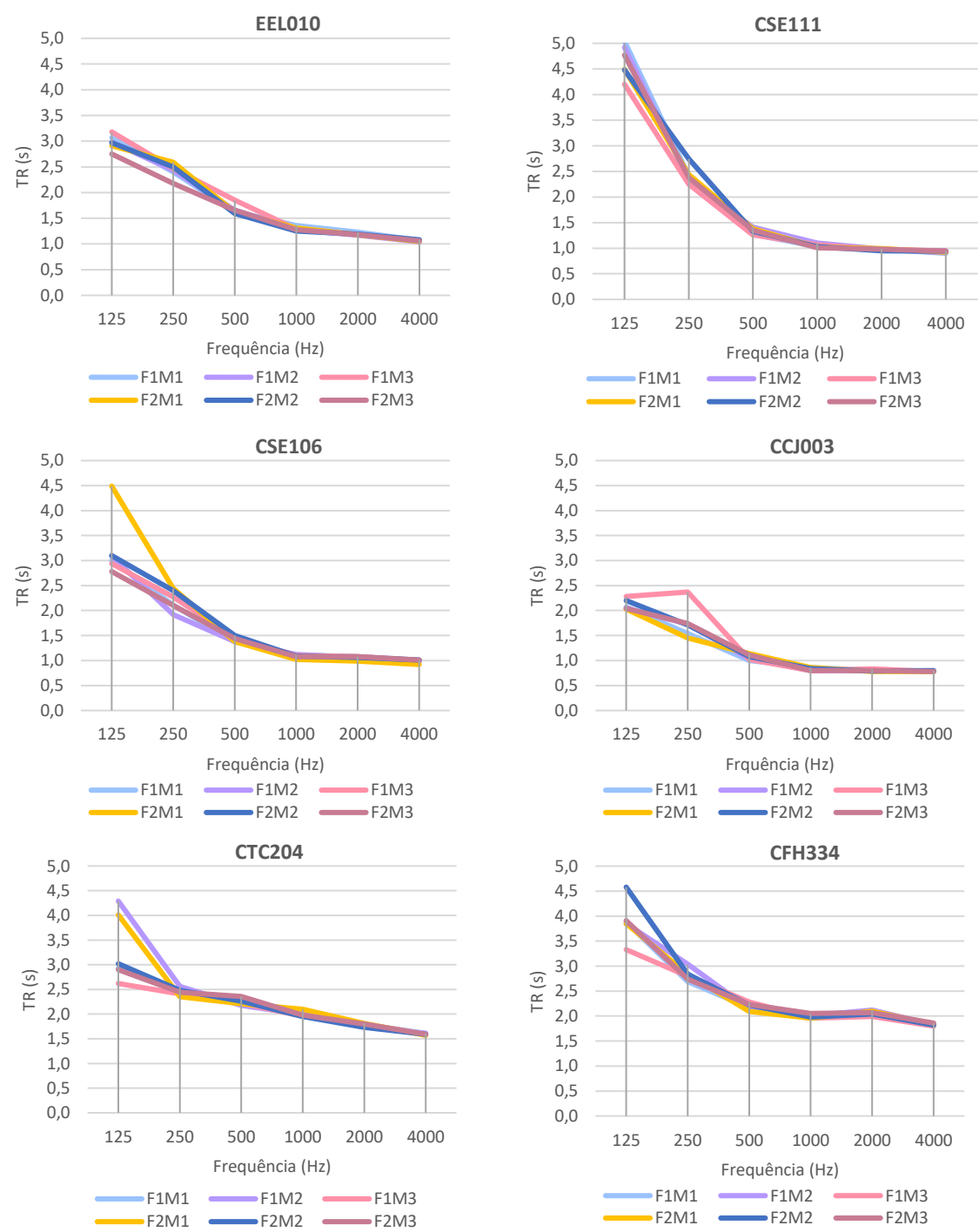
5.3 MEDIÇÕES *IN LOCO*

Após a análise dos resultados na etapa de estudo-piloto, a avaliação das salas adotou o método do ruído interrompido para as medições *in-loco*.

5.3.1 Tempo de reverberação medido (T_{30})

O gráfico 6 detalha os resultados do ensaio de tempo de reverberação com método do ruído interrompido.

Gráfico 6. Resultados TR por configuração de Fonte e Microfone



Elaborado pela autora (2025).

A análise foi feita com base nas medições de cada conjunto de pontos de fonte sonora (F) e microfone (M) no intervalo de frequências de 125Hz-4000Hz. Essa análise permitiu compreender em que pontos das salas houve maiores discrepâncias de TR ou se em todos os pontos os resultados apresentam uniformidade.

O comportamento sonoro das salas foi semelhante, com valores ultrapassando 2,0 segundos nas baixas frequências e maior uniformidade nas médias e altas frequências, sem outras discrepâncias. A tendência dos gráficos foi a queda dos valores conforme o aumento da frequência. Nenhum dos pontos apresentou valores aceitáveis de acordo com o TR ótimo descrito na Tabela 8, considerando nessa situação os valores corrigidos para sala desocupada.

A sala CSE111 apresentou o resultado mais alto, atingindo 5 segundos em 125 Hz. Esse comportamento ocorreu em todos os pontos, com variações entre 4,0 e 5,0 segundos, diminuindo para a faixa de 3,0 e 2,0 segundos na frequência de 250 Hz, até maior estabilidade a partir de 500 Hz, em que os valores em todos os pontos variaram menos, alcançando 1,0 segundo, registro mais baixo em 4000 Hz.

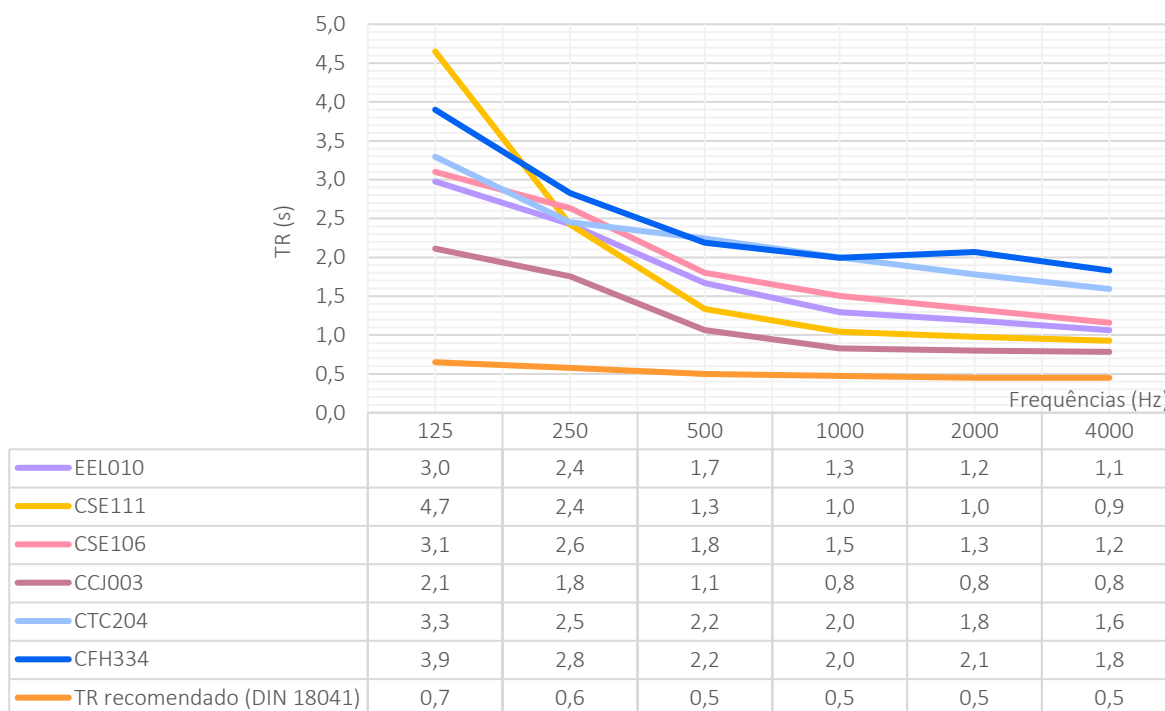
Os melhores resultados foram os da sala CCJ003, com valores abaixo de 1,0 segundo nas médias e altas frequências, característica mais favorável para a inteligibilidade da fala. Nesse gráfico observa-se a única situação de aumento do TR em 250 Hz, na configuração F1M3, ponto mais ao fundo da sala, próximo a janela e que a fonte sonora se encontra mais a frente, próxima ao quadro de vidro.

A sala EEL010 apresentou maior uniformidade entre os pontos medidos, variação inferior a 1,0 segundo, considerando as três posições de microfone.

As salas CTC204, CSE106 e CFH334 apresentaram maiores variações nos pontos de medição, com “picos” nas baixas frequências. Na sala CTC204 os pontos com valores mais uniformes estavam posicionados ao fundo da sala, posição M3. Os pontos F1M2 (meio da sala) e F2M1 (frente da sala) mostraram alterações.

Para análise dos valores de forma global, o Gráfico 7 demonstrou a média dos valores de TR para as seis salas com a comparação com os valores de TR ótimo recomendado pela DIN 18041 (linha laranja). Foi utilizada a referência para o volume médio das salas entre 150 m³, sabendo que na sala CTC204 a tolerância é de 0,1 segundo a mais, devido ao volume maior.

Gráfico 7. TR (médio) salas de aula – medição in loco



Elaborado pela autora (2025).

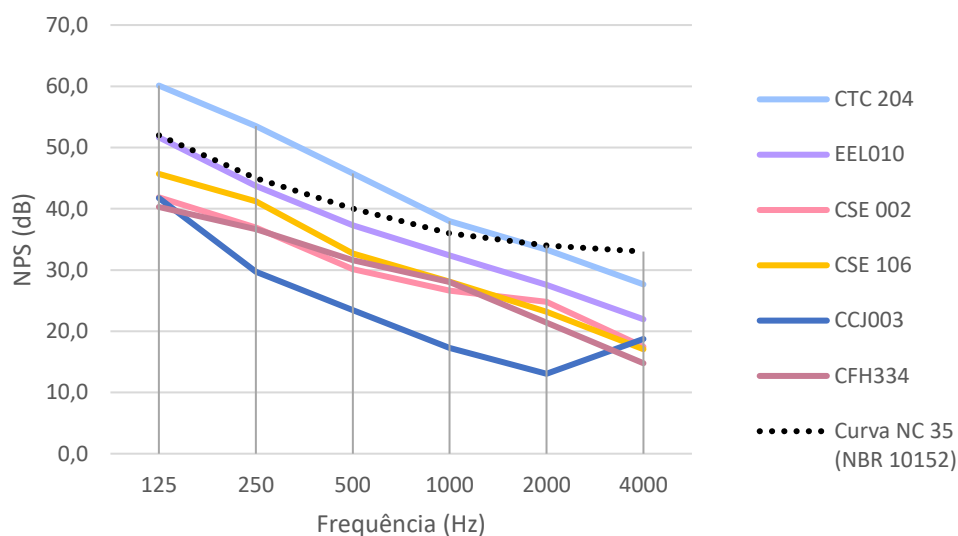
A partir dos valores de TR médios das salas, observou-se com mais ênfase os “picos” nas baixas frequências. A sala CFH334 confirmou-se como a sala mais reverberante. As salas do CSE, apesar de alcançarem valores de TR extremamente altos nas baixas frequências, apresentaram condicionamento melhor em comparação com as salas anteriores, principalmente a sala CSE106, a única que estava dentro das proporções da “Área de Bolt”, como comentado no tópico “5.1.1” com os resultados analíticos.

Os melhores resultados, considerando as frequências de 500 – 2000 Hz, são da sala CCJ003. No entanto, foi possível verificar que todas as salas se encontram fora dos valores recomendados de TR pelas normas técnicas e como consequência, condicionamento acústico deficiente.

5.3.2 Ruído residual

Os resultados da medição do ruído residual (B2) foram apresentados no Gráfico 8 para as seis salas de aula.

Gráfico 8. Ruído residual



Elaborado pela autora (2025).

Para a avaliação dos valores de ruído residual (dB) medidos, foram utilizados os dados da Curva NC (Noise Criteria) da ABNT NBR 10152. As Curvas NC são um método de avaliação para indicar se os níveis de pressão sonora estão adequados para um determinado ambiente de acordo com sua atividade (ABNT, 2017b).

Para salas de aula, a norma recomenda a Curva NC 30, com tolerância de até 5 para curvas NC, sendo assim, os valores foram comparados com a Curva NC 35, linha pontilhada preta no Gráfico 8. Dessa forma, apenas a sala CTC204 apresentou resultado acima do recomendado. É importante salientar que as medições foram feitas sem equipamentos de climatização ligados e janelas e portas fechadas.

Nas salas de aula, a presença de níveis elevados de ruído residual nas faixas de 125 Hz a 250 Hz, variando entre 40 e 60 dB, mesmo sem equipamentos ligados, indica a atuação predominante de ruído externo, transmitido tanto por vias aéreas quanto estruturais. Esse padrão espectral, caracterizado pela predominância de baixas frequências, é típico de ambientes expostos a fontes externas como tráfego intenso ou atividades urbanas próximas (Crocker, 2007). No caso, a maior presença de ruído no momento das medições foi decorrente da proximidade de uma rua de alto fluxo de veículos e a movimentação e conversa nos corredores.

O ruído de tráfego, especialmente de veículos pesados (ônibus, caminhões), é conhecido por concentrar energia acústica nas baixas frequências, frequentemente abaixo de 500 Hz (Irvine; Crocker, 2007). Essa energia se propaga com eficiência

através das estruturas do edifício, pois as ondas sonoras de baixa frequência possuem maior comprimento de onda e sofrem menor atenuação ao atravessar paredes e lajes (ISO, 2014). Além disso, as juntas construtivas ou vedações deficientes podem funcionar como vias de transmissão adicional, ampliando o nível interno de ruído residual.

A atenuação natural do som é mais eficaz em frequências altas, o que explica a redução gradual dos níveis até 4000 Hz. A norma ISO 16283-1 (ISO, 2014) orienta que a análise do ruído residual em ambientes como salas de aula deve ser feita, preferencialmente, em bandas de oitava, com atenção especial às faixas de 125 Hz e 250 Hz, que são mais críticas para avaliar a eficiência do isolamento acústico e o impacto sobre o conforto e a inteligibilidade da fala.

5.4 SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

As simulações computacionais foram feitas utilizando o software I-SIMPA de acordo com o processo descrito na etapa de metodologia (Capítulo 4), utilizando os coeficientes de absorção e espalhamento das Tabelas 6 e 7.

Nesse processo foram obtidos os parâmetros de T_{30} e D_{50} das salas vazias para comparação e cálculo dos valores de JND a partir dos resultados dos ensaios *in loco*.

5.4.1 Resultados simulados de Tempo de Reverberação (T_{30})

Foram feitas simulações do tempo de reverberação, considerando a situação de sala vazia e sala ocupada, utilizando respectivamente a equação de correção da norma UNI 11532-2, para obter os valores de referência para sala vazia, confrontando os resultados a partir das normas apresentadas na Tabela 1.

De forma geral, os resultados simulados acompanham a tendência de diminuição do tempo de reverberação com o aumento da frequência, apresentando similaridade nesse aspecto com os resultados das medições *in loco*. Os maiores valores também constam nos resultados de baixas frequências, ultrapassando mais de 2 segundos dos valores de recomendação, Tabela 11.

Tabela 11. Resultados de TR simulados

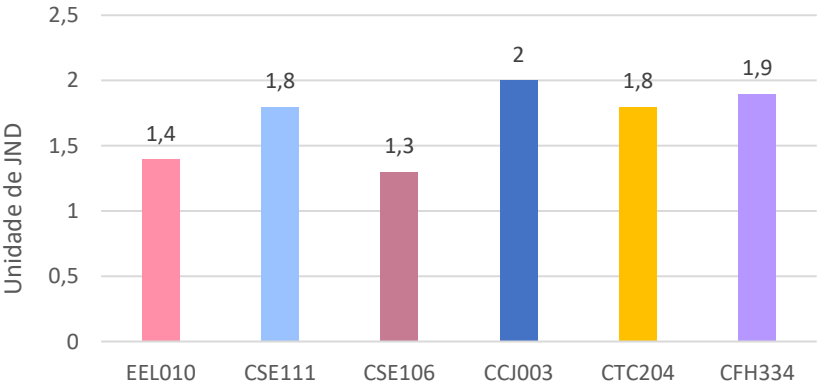
	Frequência (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
Sala EEL010						
TR Simulado sala vazia	3,2	2,8	2,1	1,7	1,5	1,3
TR Simulado 80% ocupada	1,7	1,5	1,2	1,1	1,0	0,9
Sala CSE111						
TR Simulado sala vazia	2,1	1,8	1,4	1,2	1,2	1,1
TR Simulado 80% ocupada	1,6	1,4	1,1	1,0	1,0	0,9
Sala CSE106						
TR Simulado sala vazia	2,0	1,8	1,4	1,3	1,2	1,1
TR Simulado 80% ocupada	1,5	1,3	1,1	1,0	0,9	0,8
Sala CCJ03						
TR Simulado sala vazia	1,9	1,8	1,8	1,9	1,8	1,6
TR Simulado 80% ocupada	1,4	1,4	1,3	1,5	1,5	1,3
Sala CTC204						
TR Simulado sala vazia	3,0	2,3	1,8	1,6	1,4	1,3
TR Simulado 80% ocupada	1,9	1,6	1,3	1,2	1,0	0,9
Sala CFH334						
TR Simulado sala vazia	3,5	2,8	2,1	1,9	1,7	1,6
TR Simulado 80% ocupada	2,2	2,0	1,5	1,3	1,2	1,2

Fonte: A autora (2025).

5.4.2 Validação da simulação com base no JND

Os valores de JND para a validação dos modelos digitais foram calculados a partir da Equação 9, utilizando a média dos valores obtidos no intervalo de frequência de 500 Hz a 2000 Hz, frequências da fala humana. Foram aplicados os resultados dos ensaios *in loco*, como variável de controle e os resultados das simulações das salas vazias. Dessa forma, os modelos digitais foram validados, considerando como aceitável até 2 JND. O Gráfico 9 contém os resultados de JND para cada sala.

Gráfico 9. Valores de JND Médios para 500Hz e 2000Hz

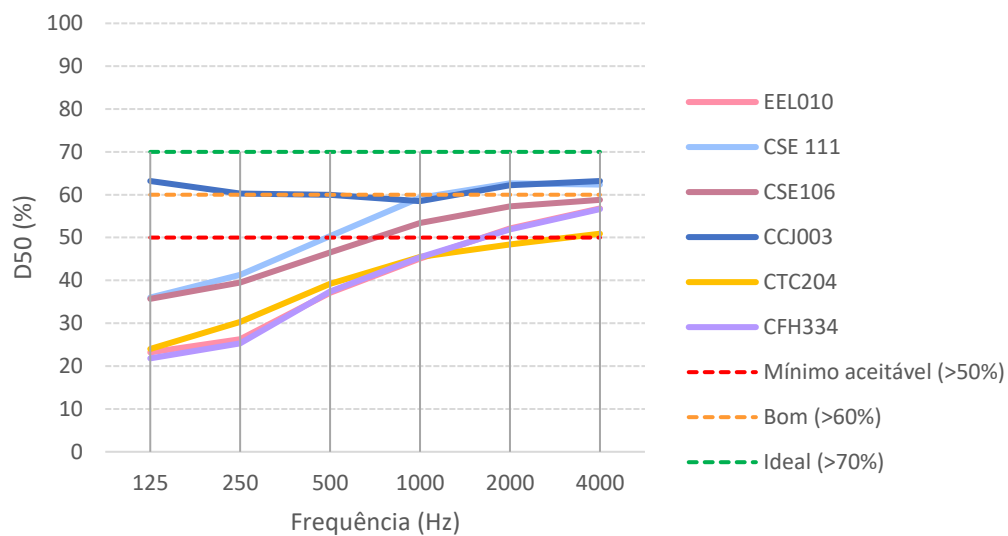


Fonte: A autora (2025).

5.5 DEFINIÇÃO (D_{50})

O parâmetro D_{50} , para complementação das análises, foi obtido através do modelo digital simulado no software I-SIMPA. Os resultados expressos no Gráfico 10, todos abaixo de 70%, foram coerentes com as conclusões do tempo de reverberação elevado.

Gráfico 10. Definição (D_{50}) – I-SIMPA



Fonte: A autora (2025).

Para a maioria das salas, observa-se uma tendência de aumento do D_{50} com o aumento da frequência. Isso é esperado, pois as frequências mais altas tendem a ser mais absorvidas e menos propensas à longa reverberação e ao mascaramento por reflexões tardias do que as baixas frequências.

Em 125 Hz e 250 Hz, o D_{50} é notavelmente mais baixo para a maioria das salas, caindo para a faixa de 20% a 40%. Isso indica que a clareza da fala é significativamente comprometida nos graves e médio-graves, onde a reverberação tende a ser mais pronunciada e o controle modal é mais difícil.

A sala CCJ003, ao apresentar valores de D_{50} acima de 60%, estima-se que tenha inteligibilidade, indicando que a maior parte da energia sonora percebida é "energia útil", que reforça a clareza do som original. Este desempenho superior pode ser atribuível a uma relação mais eficaz entre o volume da sala e a área total de absorção sonora, mostrando que essa sala possa ter materiais e dimensionamento que controlam melhor a reverberação, permitindo que a energia útil se sobressaia.

A sala CSE111 atende parcialmente/marginalmente às recomendações, atingindo valores acima de 60% apenas nas frequências mais altas (4000 Hz), mas fica abaixo disso nas frequências médias (entre 500 Hz e 2000 Hz) e cai significativamente nas baixas (abaixo de 50%). A inteligibilidade ocorreria nas frequências agudas, mas decrescente em frequências mais graves.

Na Sala CFH334 os valores de D_{50} ficam em sua maioria abaixo de 60% (atingindo cerca de 58% em 4000 Hz), embora acima do mínimo aceitável (50%) nas frequências mais altas. Nas baixas frequências (125 Hz e 250 Hz), o D_{50} é significativamente baixo.

As salas CSE106 e EEL010 também não atendem às recomendações, com valores começando abaixo de 40% nas baixas frequências e atingindo no máximo cerca de 54% e 57% nas frequências mais altas.

A sala CTC204 apresentou o pior desempenho, com valores consistentemente abaixo do mínimo aceitável de 50% na maioria das frequências, atingindo apenas cerca de 50% em 4000 Hz. A inteligibilidade da fala seria pobre a muito pobre em todas as frequências, sendo inaceitável para uma sala de aula.

5.6 INTELIGIBILIDADE DA FALA

Para a avaliação da inteligibilidade foram estimados os valores de Perda de Articulação de Consoantes (ALCons%) e Relação Sinal-Ruído (SNR).

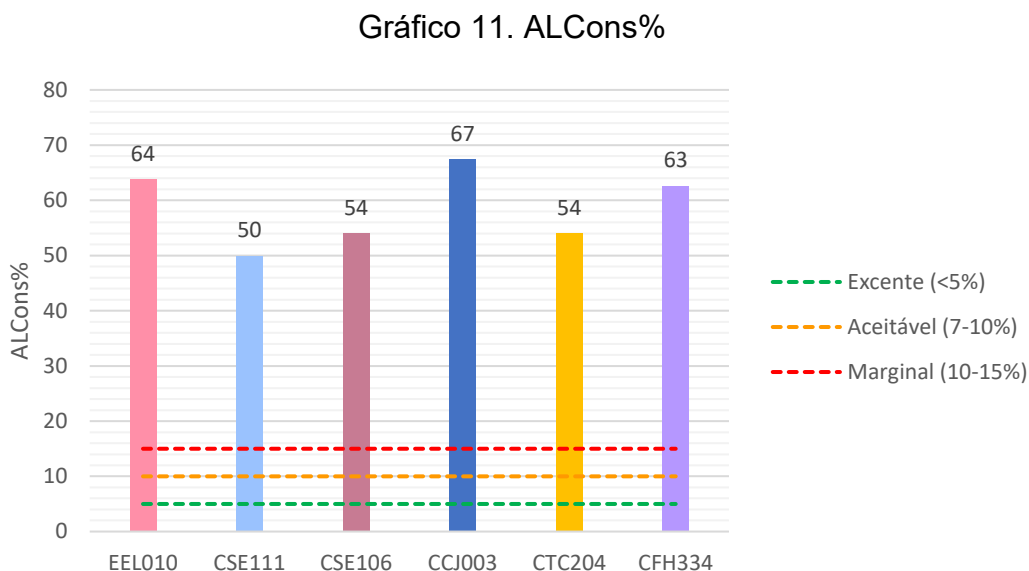
5.6.1 Análise da Perda de Articulação de Consoantes (ALCons%)

A avaliação da clareza da fala nos ambientes foi realizada através do cálculo da Perda de Articulação de Consoantes (ALCons%), uma métrica empírica que estima a porcentagem de consoantes que se tornam ininteligíveis devido às condições acústicas do espaço (Long, 2014).

Os valores de T_{60} utilizados para cada sala foram os de "TR Calculado sala vazia", conforme Tabela 10, na frequência de 1000 Hz, banda de frequência central e de alta relevância para a inteligibilidade da voz humana (Beranek; Mellow, 2012).

A análise dos resultados revelou que todas as salas apresentaram valores de ALCons% significativamente elevados, variando de aproximadamente 50% a 67%. Em comparação com os critérios de inteligibilidade estabelecidos, onde valores de

ALCons% abaixo de 5% são considerados excelentes e acima de 15% indicam inteligibilidade marginal ou inaceitável (Long, 2014), todas as salas se enquadram na categoria "Ruim/Inaceitável", como visto no Gráfico 11.



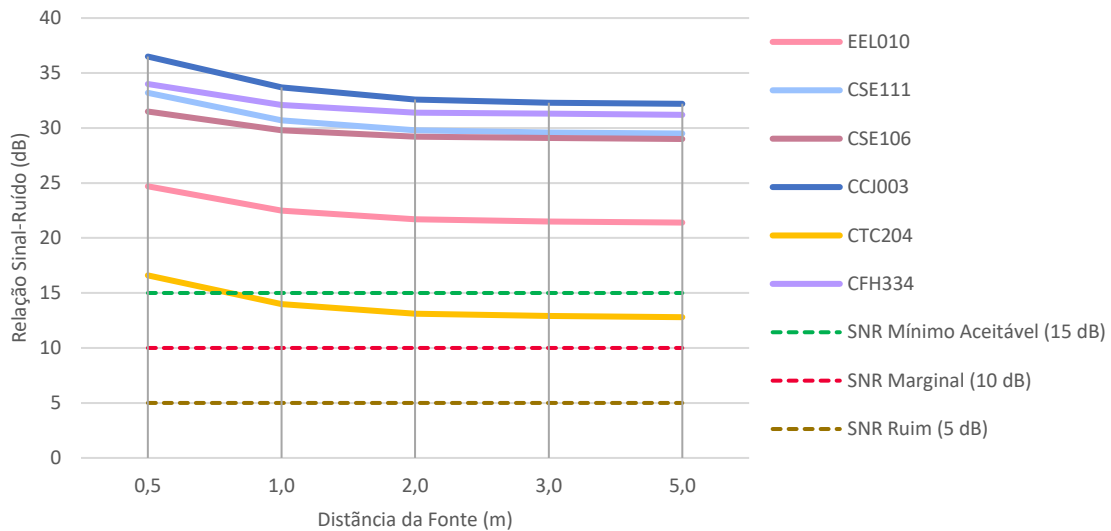
Fonte: A autora (2025).

Tais percentuais indicam que uma proporção muito substancial das consoantes é perdida, tornando a compreensão da fala extremamente difícil na prática. Esta condição é uma consequência direta dos elevados tempos de reverberação presentes nos ambientes (com T_{60} entre 1.3s e 1.8s na frequência de 1000 Hz), que causam o mascaramento temporal e o "borramento" do sinal de fala pelas reflexões tardias (Beranek; Mellow, 2012).

5.6.2 Relação Sinal-Ruído (SNR)

Para fins de comparação, a Relação Sinal-Ruído (SNR) foi calculada estimando diferentes distâncias da fonte sonora (voz humana), conforme as aulas expositivas acontecem. O valor de fonte sonora utilizado (L_s) foi de 65 dB, referente a voz humana. Foi calculado o Nível de Pressão Sonora do Sinal, considerando a contribuição do som direto e do som reverberante. Para tanto, os valores de NPS medidos *in-loco* foram ponderados em dB (A) para obter o ruído residual total em cada sala e simular a percepção do ouvido humano. Os resultados foram demonstrados no Gráfico 12.

Gráfico 12. Relação Sinal-Ruído (SNR) por sala e distância da fonte (m)



Fonte: A autora (2025).

Valores de SNR elevados, acima de 15 dB, como o exemplo de todas as salas exceto a sala CTC204, indicaram que o sinal é significativamente mais audível que o ruído residual, sendo uma condição necessária para inteligibilidade da fala.

Contudo, a inteligibilidade da fala em um ambiente não depende exclusivamente do SNR e como as salas medidas apresentaram TR elevado, provavelmente há ocorrência de mascaramento temporal.

Os cálculos de ALCons% e a simulação do D_{50} confirmaram que, apesar de valores de SNR altos, a reverberação excessiva nestas salas resulta em uma perda crítica de articulação. Logo, embora o sinal da voz humana seja suficientemente alto para sobressair ao ruído residual, a clareza da fala é gravemente comprometida pela sobreposição de reflexões tardias, inviabilizando a compreensão efetiva.

De acordo com os estudos de Long (2014), um SNR elevado é uma condição primária para a audibilidade, mas não é suficiente para garantir a inteligibilidade da fala em ambientes reverberantes. Para uma comunicação eficaz, além de um SNR adequado, o ambiente também deve apresentar um tempo de reverberação otimizado, que promova a clareza da fala e minimize o mascaramento temporal (Long, 2014).

5.7 CONSIDERAÇÕES ACERCA DOS RESULTADOS

Os resultados das avaliações utilizando as metodologias analíticas, medições *in loco* e simulação computacional, demonstraram a carência de condicionamento acústico nas características das seis salas analisadas. O objetivo desse trabalho foi pontuar esses resultados como consequências de projeto, uma vez que esses são derivados das características físicas das salas e a importância dessas condicionantes nas etapas de concepção do projeto arquitetônico.

O projeto de sala de aula reproduzido na universidade não atende as recomendações técnicas para melhores condições de aprendizagem e isso requer mudanças, principalmente no sistema construtivo, dimensionamento e de forma conjunta, materiais que precisam ter propriedades de absorção.

O exemplo da sala CCJ003, com melhor resultado entre as amostras, foi interessante pois essa diverge das demais por ter cadeiras estofadas, maior absorção nas altas frequências, laje rebocada e menor volume em relação às demais, tendo diferença de capacidade de apenas 10 alunos em relação a sala maior CTC204. Não foi uma sala com tratamento acústico, mas essas pequenas divergências demonstraram comportamento mais favorável.

Já as características de vigas aparentes, carteiras não estofadas e formato quadrado, indicaram diretrizes de projeto pouco satisfatórias no ponto de vista acústico, necessitando de mais áreas para absorção. Essas foram as características predominantes nas salas de aula analisadas nesse trabalho, na Universidade Federal de Santa Catarina.

6 PROPOSTAS DE INTERVENÇÃO

Com base nos resultados da avaliação das seis salas selecionadas, foram simuladas propostas de intervenção para corrigir os valores de tempo de reverberação das seis salas de aula, com base nos valores estabelecidos na Tabela 8.

6.1 ESTRATÉGIAS DE CORREÇÃO

Para a elaboração das estratégias de correção do tempo de reverberação das salas, foram estudadas soluções que pudessem contribuir para a diminuição da reverberação, o que implica na necessidade de aumento da absorção sonora da sala, com materiais com coeficiente de absorção alto.

As análises indicaram o aumento da absorção conforme o aumento das frequências, mas a absorção é bastante deficiente em todas as bandas de frequência medidas, com tempo de reverberação atingindo os valores mais altos nas baixas frequências.

Logo, a escolha de materiais precisou considerar tanto as frequências baixas, para atingir o mínimo necessário, utilizando as referências de tempo de reverberação para ambientes escolares da norma DIN 18041, quanto as médias e altas frequências, com ênfase nas frequências principais da fala, 500 Hz – 2000 Hz.

De forma prática, as estratégias descartaram materiais porosos e fibrosos pois esses possuem maior eficiência de absorção para altas frequências (Brandão, 2016). E buscou-se soluções com materiais de absorção com características de painel ressonante (Bistafa, 2018), eficientes nas baixas frequências.

Foram estudadas também soluções com forros acústicos, nas situações em que houvesse viabilidade de instalação, considerando a limitação de altura do teto.

6.1.1 Painéis de madeira perfurados

A proposta de tratamento das baixas frequências estudou o uso de painéis de madeira perfurados com espaçamento mínimo de 20cm das paredes, conforme indicação dos fabricantes e laudos técnicos de ensaio dos sistemas de tratamento acústico.

Os painéis perfurados são utilizados como elementos de tratamento acústico, funcionando como absorvedores sonoros ressonantes, com base no princípio da ressonância de Helmholtz. São superfícies rígidas com vários furos, instaladas na frente de uma cavidade que pode conter um material poroso ou apenas ar. A interação entre o ar nos furos atua como massas vibrantes e o ar na cavidade posterior funciona como uma mola, conferindo um sistema massa-mola similar ao ressonador de Helmholtz clássico (Egan, 1988).

A frequência de ressonância do painel é influenciada por fatores como o diâmetro e espaçamento dos furos, a espessura do painel, a profundidade da cavidade de ar e a porcentagem da área perfurada (porosidade). A absorção sonora é mais eficaz próximo a essa frequência de ressonância, pois a energia sonora é convertida em calor devido ao atrito do ar nos furos e à dissipação adicional se houver materiais porosos na cavidade (Egan, 1988).

Devido à sua natureza ressonante, os painéis perfurados são especialmente eficientes na absorção de frequências médias e baixas, onde absorvedores porosos tradicionais costumam ser menos eficazes. Além disso, seu desempenho pode ser ajustado modificando seus parâmetros construtivos para atender às necessidades específicas do ambiente. Essa versatilidade os torna uma solução ideal para projetos arquitetônicos que exigem controle preciso da reverberação e melhoria da inteligibilidade da fala, como em auditórios, salas de aula e estúdios (Egan, 1988).

6.1.2 Baffles lineares

Para a elaboração das estratégias também foram feitos estudos de simulação com baffles lineares, que por sua vez, possuem alta absorção nas médias e altas frequências.

Os baffles acústicos são elementos suspensos verticalmente ou horizontalmente no interior de ambientes, geralmente instalados no teto, com o objetivo de aumentar a absorção sonora em locais onde as superfícies refletoras predominam.

Os baffles são, na maioria das vezes, compostos por materiais porosos, como lã de vidro ou lã mineral, permitindo a penetração das ondas sonoras no material absorvente. Ao serem dispostos em paralelo e com espaçamento adequado, criam uma série de superfícies duplas expostas ao som incidente, ou seja, ambos os lados

de cada baffle participam do processo de absorção. Isso duplica sua eficiência por unidade de material, quando comparado a um revestimento plano sobre uma parede ou teto (Egan, 1988).

Além disso, os baffles são eficazes em absorver som em uma ampla faixa de frequências, especialmente nas médias e altas. Sua contribuição é relevante para reduzir o tempo de reverberação e controlar o ruído em ambientes industriais ou de grande volume, onde a aplicação de absorvedores em paredes ou forros contínuos pode ser inviável ou insuficiente. A eficiência do sistema depende do número de baffles, do espaçamento entre eles, da altura em que são instalados e das propriedades do material absorvente (Egan, 1988).

6.1.3 Forros acústicos

Os forros acústicos são superfícies instaladas no teto dos ambientes com o objetivo primordial de absorver o som, reduzir o tempo de reverberação e melhorar a inteligibilidade da fala. Segundo Egan (1988), esses forros podem atuar como absorvedores porosos, ressoantes ou uma combinação de ambos, dependendo de sua composição.

Os forros porosos, tipicamente feitos de painéis de lã mineral, espuma acústica ou materiais fibrosos microperfurados, dissipam a energia sonora através do atrito viscoso nas fibras e de efeitos térmicos à medida que o som penetra nos poros do material. Quando existe um espaço de ar entre o forro e a laje superior, esse *plenum* atua como uma câmara que intensifica a absorção, particularmente em frequências mais baixas (Kuttruff, 2016).

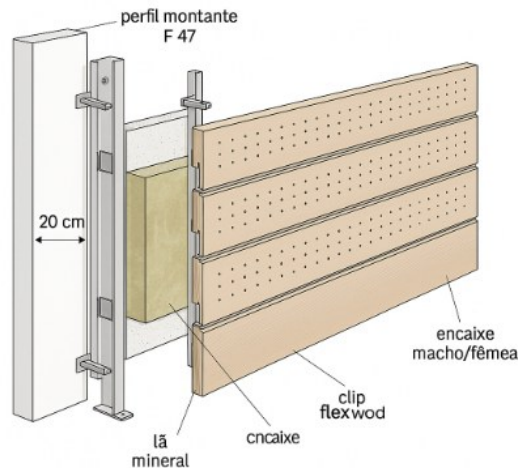
6.1.4 Propriedades e aplicação

Os estudos de simulação para o tratamento das salas consideraram as estratégias de tratamento: 1) painéis de madeira perfurados, 2) baffles lineares e 3) forros acústicos, observando que essas poderiam ser aplicadas ou não dependendo da limitação de cada sala.

Os painéis de madeira perfurados foram simulados como superfície retangular, representando a área de placas com as medidas 2750 mm (comprimento)

x 160 mm (largura). O sistema possui camada de lã de rocha, sendo fixado a 200 mm da parede para obter uma câmara de ar, configuração mais eficiente.

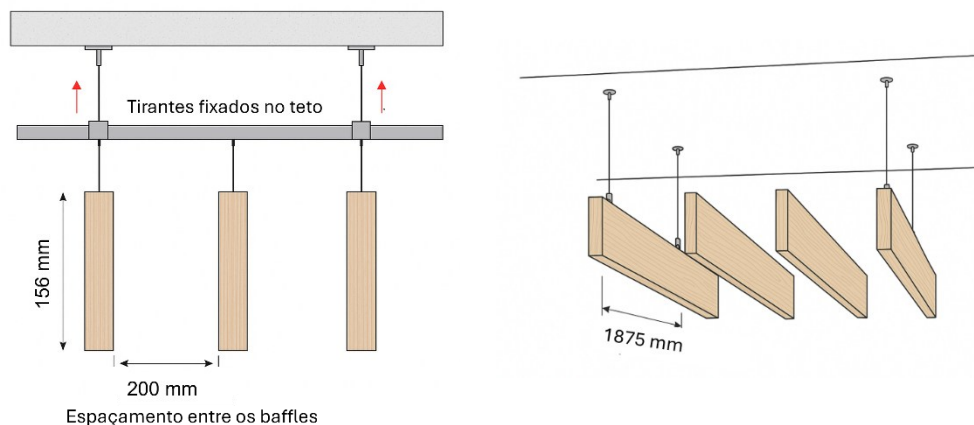
Figura 22. Desenho esquemático do sistema de painel acústico perfurado



Fonte: A autora, com auxílio da Inteligência artificial generativa Google Gemini (2025).

Os baffles lineares foram simulados considerando o formato de 1875 mm de comprimento, 156 mm de altura, espessura de 35 mm e o espaçamento entre baffles de 200 mm.

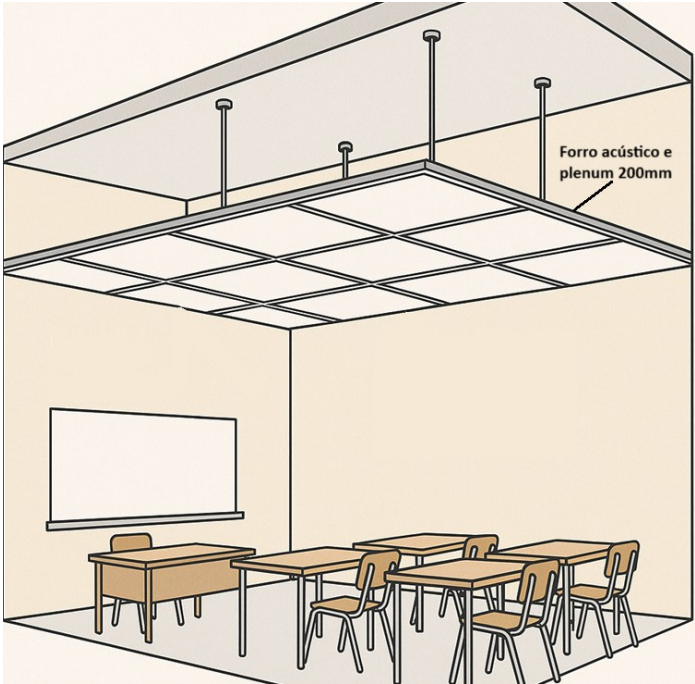
Figura 23. Desenho esquemático do sistema dos baffles lineares



Fonte: A autora, com auxílio da Inteligência artificial generativa Google Gemini (2025).

Os forros acústicos foram simulados considerando a configuração com absorção mais eficiente e plenum de 200 mm. A Figura 24 ilustrou

Figura 24. Desenho esquemático do sistema dos forros acústicos



Fonte: A autora, com auxílio da Inteligência artificial generativa Google Gemini (2025).

Os respectivos valores de coeficiente de absorção utilizados para as três estratégias de tratamento seguem apresentados na Tabela 12.

Tabela 12. Coeficientes de absorção dos materiais de tratamento

Material	Coeficiente de absorção por banda de oitava (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
Forro acústico	0,50	0,40	0,30	0,45	0,25	0,20
Painel perfurado	1,35	1,25	1,10	1,00	0,75	0,40
Baffle linear 156mm	0,15	0,48	0,76	0,86	1,08	1,03

Fonte: Ecophon (2025), Flexacustic (2025), Sonex (2025), adaptado pela autora (2025). Nota: Valores de área de superfície.

6.2 PROPOSTAS DE CORREÇÃO

A partir da avaliação das seis salas de aula analisadas, foram feitas propostas de correção com auxílio da simulação computacional. Para aplicação dos valores de referência para o TR ótimo expressos pela DIN 18041, as simulações consideraram a ocupação de 80%.

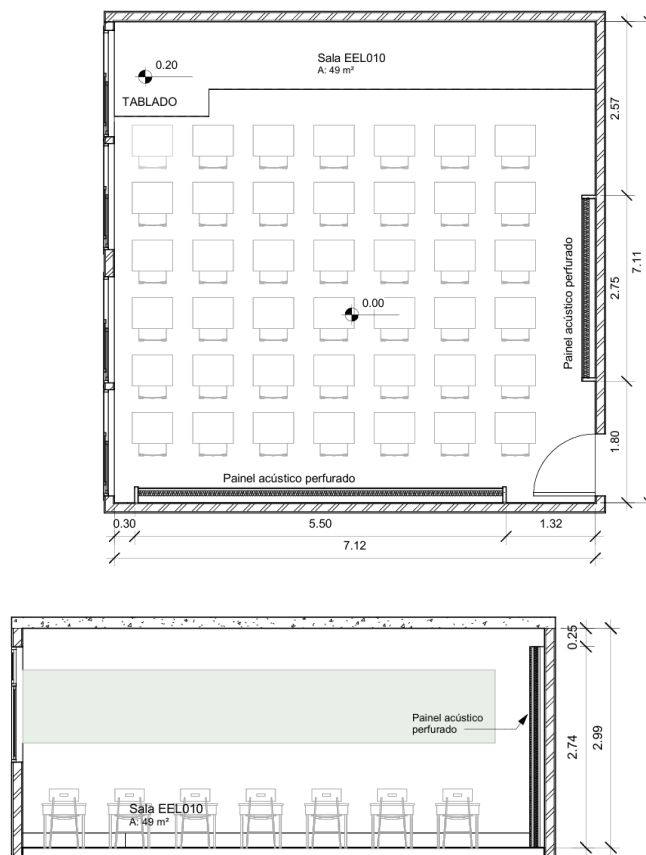
6.2.1 Correção da sala EEL010

A proposta de correção da sala EEL010 levou em consideração as análises em baixas frequências que indicaram incidência de ondas estacionárias, principalmente considerando a geometria quadrada da sala.

Foram feitos testes com forros acústicos, verificando se esses poderiam alcançar resultados satisfatórios. O teto foi simulado com forro acústico de alta performance e 20 cm de *plenum*, aplicação que o material apresentaria absorção máxima. No entanto, os resultados da simulação foram insatisfatórios, indicando que os valores de referência, principalmente nas baixas frequências, não seriam alcançados, ficando acima de 1,0 segundo.

Dessa forma, visando equilibrar também a absorção das baixas frequências, foram feitos testes com a estratégia dos painéis de madeira perfurados simulando aproximadamente a área de 22 m². A estratégia foi ilustrada na Figura 25.

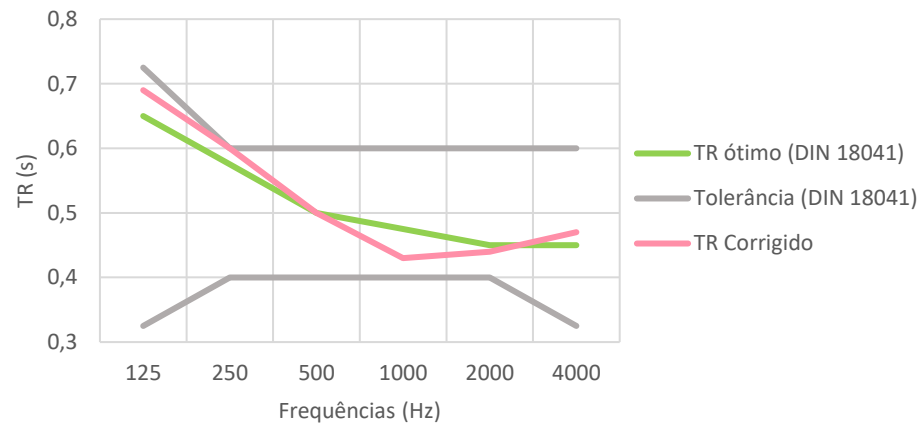
Figura 25. Planta e corte da solução de tratamento da Sala EEL010



Fonte: A autora (2025).

O que os testes demonstraram é que a proposta com painéis perfurados alcançaria os valores necessários também nas frequências críticas da fala (500Hz-2000Hz), sendo essa a opção de tratamento mais eficiente, com os resultados exibidos no Gráfico 13.

Gráfico 13. TR Corrigido Sala EEL010

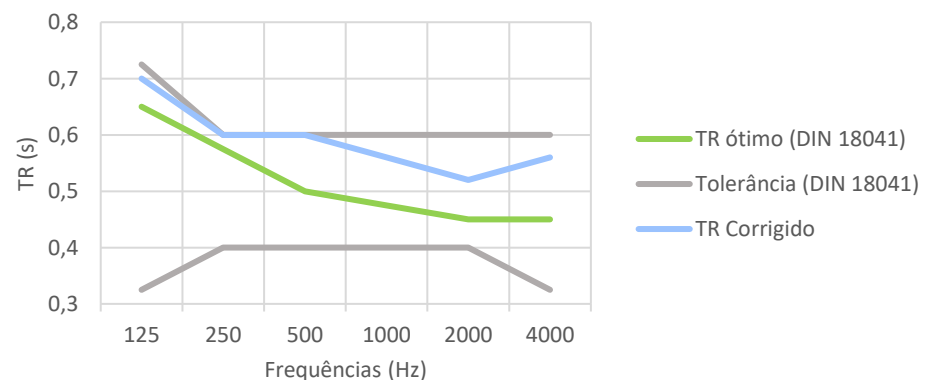


Fonte: A autora (2025).

6.2.2 Correção da sala CSE111

Assim como a sala EEL010, os testes priorizaram soluções que pudessem tratar a carência de absorção considerável também das baixas frequências. A situação da sala CSE111 trouxe algumas limitações principalmente devido as vigas aparentes.

Gráfico 14. TR Corrigido Sala CSE111

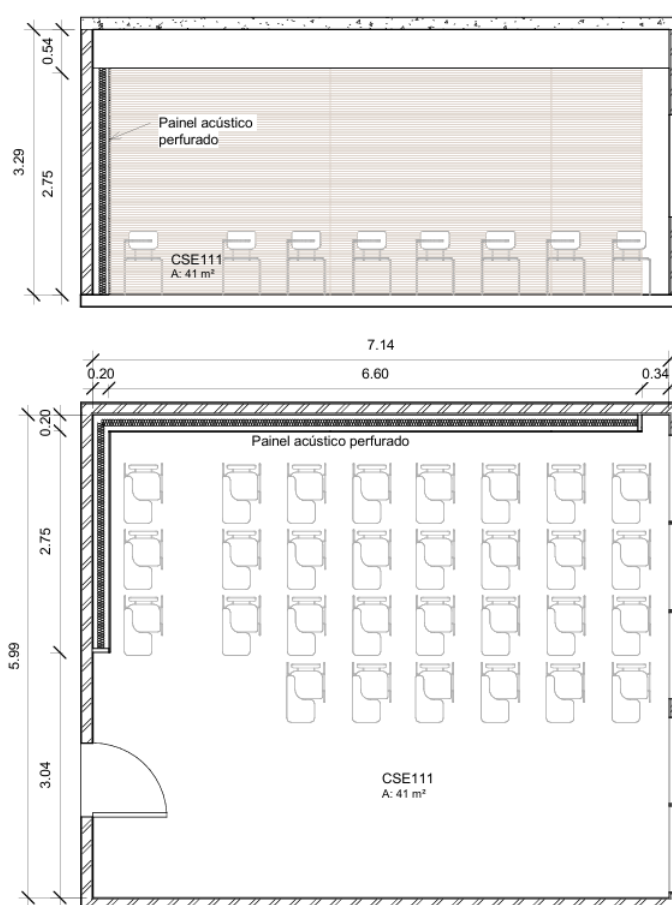


Fonte: A autora (2025).

Comparando os resultados do Gráfico 14 (TR tratado) com os resultados do Gráfico 7 (TR medido *in loco*), os valores reduziram de 1,3 segundos (500 Hz) para 0,6 segundos, melhorando consideravelmente a reverberação do ambiente.

Utilizando a proposta dos painéis perfurados, esses também apresentaram resultados satisfatórios, utilizando os espaços disponíveis das paredes sem aberturas, cerca 26 m². Os painéis foram dispostos respeitando a modulação do material, ilustrados na Figura 26.

Figura 26. Planta e corte da solução de tratamento da Sala CSE111



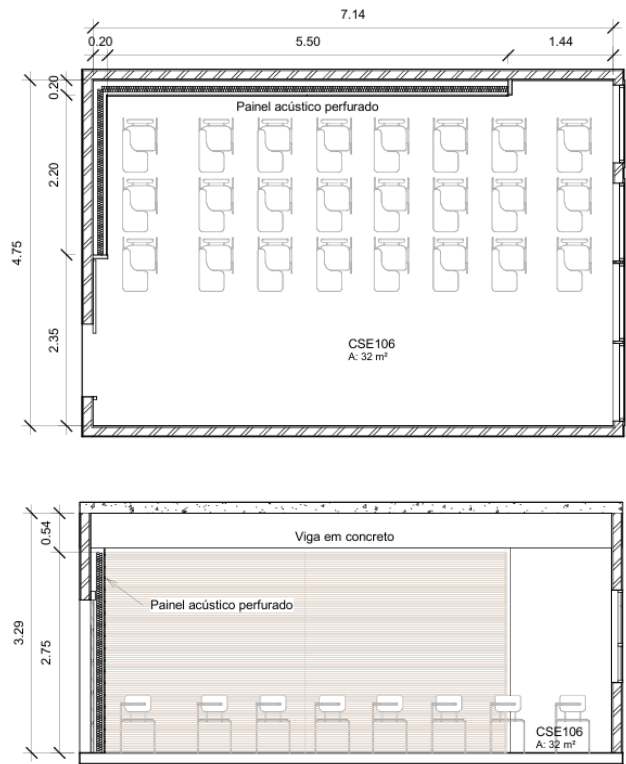
Fonte: A autora (2025).

6.2.3 Correção da sala CSE106

Considerando que as características físicas da sala CSE106 são as mesmas da sala CSE111, os testes também foram feitos com a estratégia de painéis

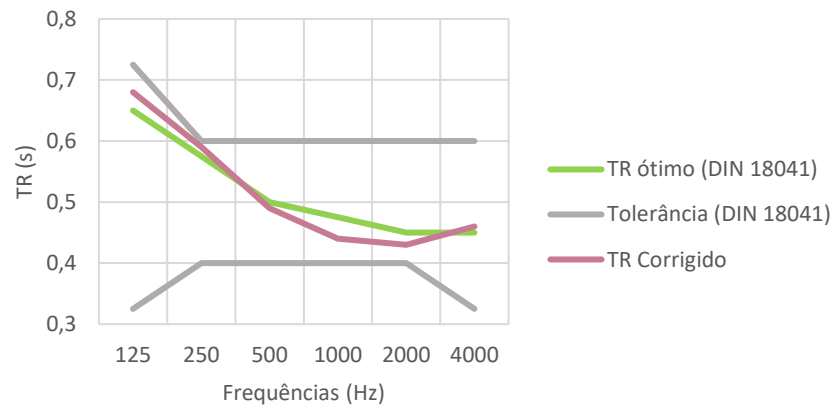
perfurados. Foram utilizados cerca de 20 m², distribuídos em duas paredes, Figura 27. Os resultados seguem apresentados no Gráfico 15.

Figura 27. Planta e corte da solução de tratamento da Sala CSE106



Fonte: A autora (2025).

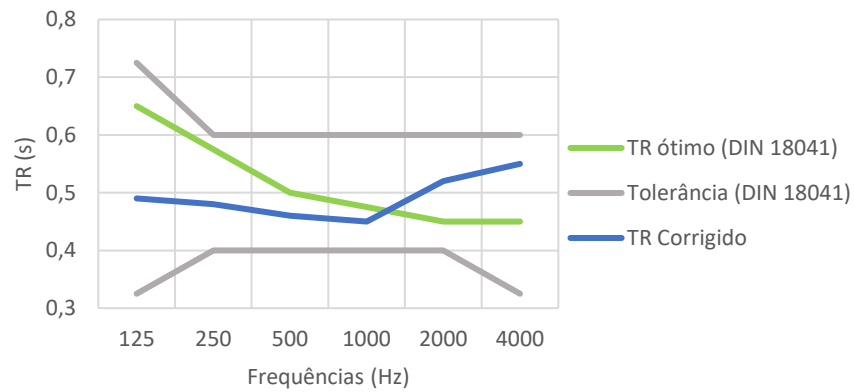
Gráfico 15. TR Corrigido Sala CSE106



Fonte: A autora (2025).

Essa foi a estratégia mais eficiente considerando a necessidade de uma área menor de material. Os resultados seguem abaixo no Gráfico 16.

Gráfico 16. TR Corrigido Sala CCJ003



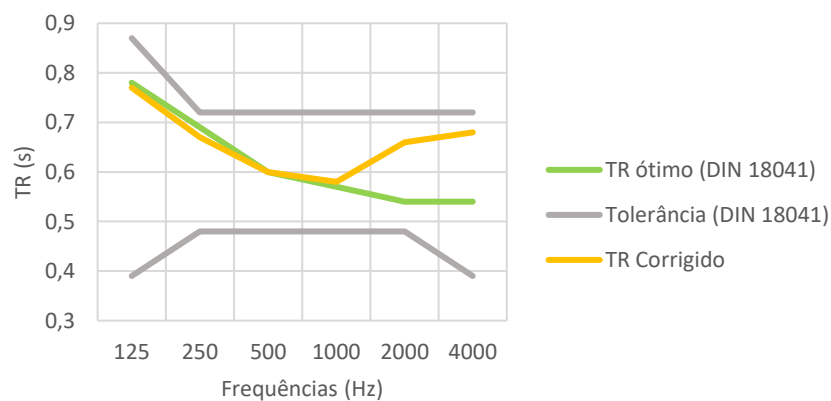
Fonte: A autora (2025).

6.2.5 Correção da sala CTC204

Apesar do comportamento da sala CTC204 divergir pouco das demais salas com acabamentos em concreto aparente, altamente reflexivas, essa foi a maior sala do estudo e consequentemente, a que necessitou de maior área de absorção.

Dessa forma, os testes incluíram baffles lineares, aumentando também a absorção nas médias e altas frequências. A combinação das duas soluções demonstrou resultados favoráveis, como demonstrado no Gráfico 17.

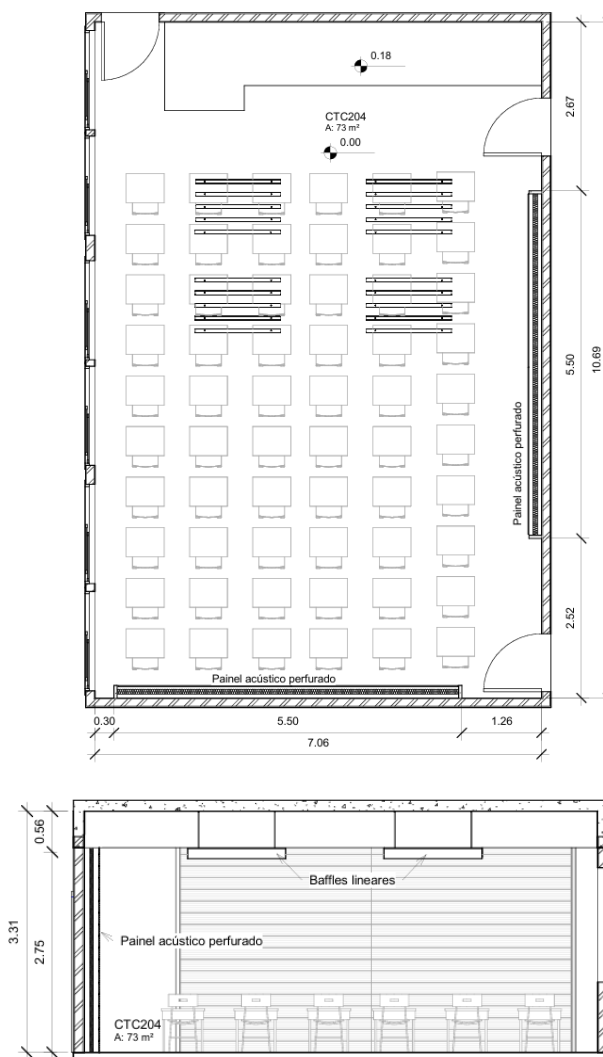
Gráfico 17. TR Corrigido Sala CTC204



Fonte: A autora (2025).

A Figura 29 ilustra a disposição das soluções de tratamento na sala, com a locação dos baffles lineares no teto, 20 unidades, e painéis acústicos perfurados em duas paredes, cerca de 30m².

Figura 29. Planta e corte da solução de tratamento da Sala CTC204



Fonte: A autora (2025).

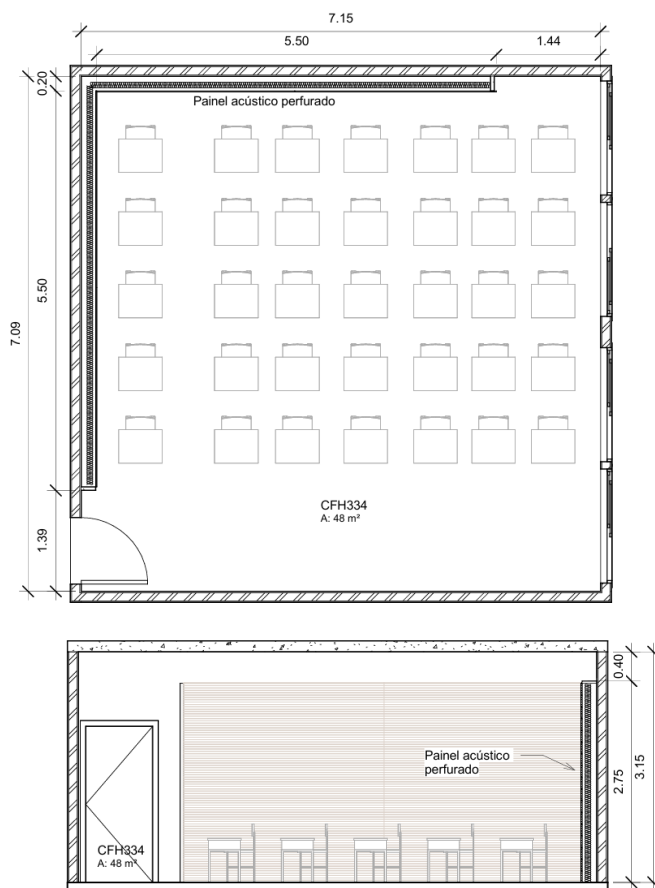
6.2.6 Correção da sala da Sala CFH334

Os testes na sala CFH334 com forros acústicos resultaram em TR acima de 1,0 nas frequências críticas da fala (500 Hz – 2000 Hz) e acima de 1,5 nas baixas frequências (125 Hz e 250 Hz), resultados insatisfatórios.

A proposta mais eficiente nessa sala também foi a aplicação dos painéis perfurados. A simulação foi feita com painéis em duas paredes, cerca de 30 m². Os

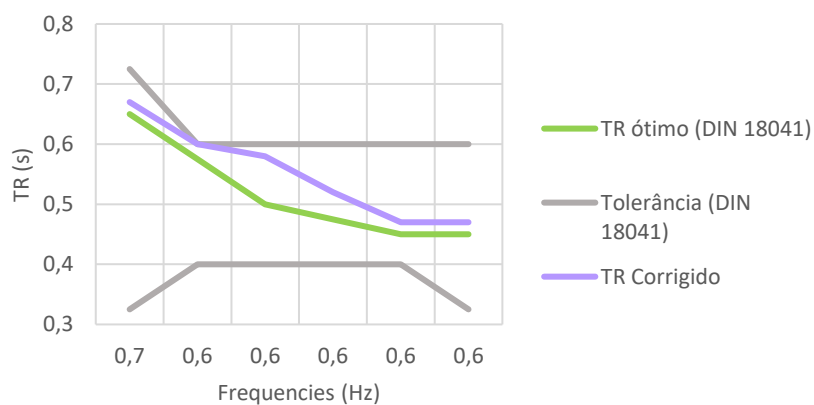
resultados foram bastante favoráveis, reduzindo consideravelmente os níveis de TR, como mostrado abaixo no Gráfico 18.

Figura 30. Planta e corte da solução de tratamento Sala CFH334



Fonte: A autora (2025).

Gráfico 18. TR Corrigido Sala CFH334

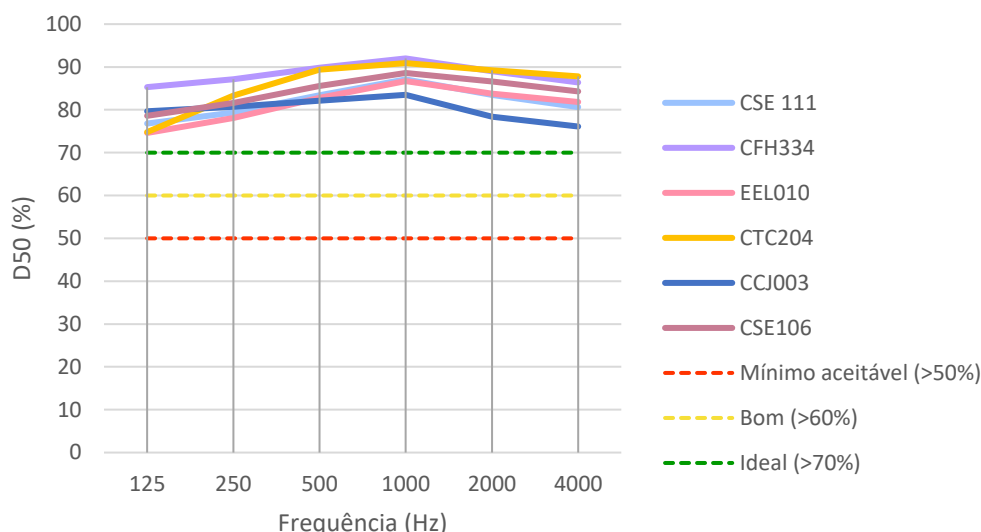


Fonte: A autora (2025).

6.3 VALORES D_{50} SIMULADOS COM TRATAMENTO

Após a proposta de tratamento, todas as salas atingiram valores acima do ideal (70%) para o descritor D_{50} , como demonstrado no Gráfico 19.

Gráfico 19. D_{50} após tratamento



Fonte: A autora (2025).

Todas as salas atendem ou superam o critério de D_{50} Ideal (>70%) para salas de aula nas frequências mais relevantes (de 500 Hz a 4000 Hz). Isso indica que a inteligibilidade da fala nesses ambientes após o tratamento é satisfatória. A energia sonora que chega nos primeiros 50ms é dominante em relação à energia sonora total.

Os valores nas baixas frequências acima de 70% também mostraram que o tratamento foi eficaz na redução da reverberação em frequências graves.

6.4 ANTES E DEPOIS DAS PROPOSTAS DE CORREÇÃO

A partir dos valores de TR tratado das salas, foi feito o comparativo “antes e depois”, considerando os valores de referência para 500 Hz do Gráfico 7.

A Tabela 13 demonstrou a diminuição significativa dos valores, aplicando as propostas de tratamento. Todas as salas alcançaram os valores de recomendação das normas após as propostas de tratamento.

As salas mais reverberantes, CTC204 e CFH334, com níveis de TR acima de 2 segundos, foram consequentemente as salas que mais careceram de superfícies de tratamento. Observa-se que as salas EEL010, CSE111 e CSE106 precisaram de quase a mesma quantidade de tratamento.

Tabela 13. Comparativo TR antes e depois

	TR medido <i>in loco</i>	TR tratado	Proposta de tratamento	
EEL010	1,6	0,5	Paineis perfurados	22 m ²
CSE111	1,3	0,5	Paineis perfurados	26 m ²
CSE106	1,4	0,5	Paineis perfurados	20 m ²
CCJ003	1,1	0,5	Paineis perfurados	15 m ²
CTC204	2,2	0,6	Paineis perfurados	30 m ²
			Baffles lineares	20 unidades
CFH334	2,2	0,6	Paineis perfurados	30 m ²

Fonte: A autora (2025). Nota: Foram utilizados os valores de referência para 500Hz. Valores em segundos.

Como os testes com forros acústicos não demonstraram bons resultados em nenhuma das salas com a viabilidade do acabamento no teto, as simulações indicaram que a melhor solução para salas com o comportamento sonoro analisado na UFSC seria o painel de madeira perfurado.

Em relação a estimativa da inteligibilidade, ao avaliar o descritor D₅₀, esse indicou resultado positivo das simulações das estratégias de tratamento aplicadas, com valores acima do ideal, principalmente nas frequências significativas para a fala, em todas as salas. Esse é um parâmetro mais preciso que as estimativas calculadas com as fórmulas ALCons% e SNR, indicadas apenas como critério investigativo preliminar, portanto não foram comparadas pós-tratamento.

Acrescenta-se que essa solução de tratamento por ser bastante eficiente, exige cuidados, tais como disponibilidade de fornecimento e mão de obra especializada para instalação. Outros materiais mais simples não conseguiriam suprir a carência de absorção das salas mais críticas, o que questiona mais uma vez o impacto dos problemas do sistema construtivo atual, exclusivamente reflexivo.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A avaliação do condicionamento acústico das salas de aula da Universidade Federal de Santa Catarina, a partir dos seis exemplares de salas de aula selecionadas, com base na ocupação de alunos, demonstrou que todas não alcançam os níveis de tempo de reverberação esperado pelas normas técnicas nacionais e internacionais e o quanto os sistemas construtivos praticados na universidade precisam de tratamento acústico eficiente para isso.

Por mais que as normativas internacionais estabeleçam valores exigentes para o tempo de reverberação, distantes da realidade construtiva de muitas salas de aula universitárias brasileiras, como pontuado nos trabalhos analisados no levantamento bibliográfico, os resultados obtidos neste estudo confirmam as severas deficiências na qualidade acústica.

A ausência de tratamento acústico nessas salas reforça os problemas já indicados pela literatura sobre o impacto negativo no ambiente de aprendizado. Logo, uma resposta para a dificuldade de correção tardia desses espaços, que pode limitar as estratégias de solução, como ocorrido nas seis salas avaliadas, é a proposta de análise do condicionamento acústico não como elemento secundário ou corretivo, mas sim integrado como um requisito fundamental desde as fases preliminares do projeto arquitetônico. Tendo em vista que as características envolvidas na avaliação acústica de salas são justamente as condicionantes de projeto do ambiente construído.

Esse trabalho analisou salas de aula com características parecidas, porém as simples diferenças nas salas mais reverberantes e menos reverberantes consequentemente, demonstraram o impacto de ter superfícies mais absorvedoras e o dimensionamento apropriado, como visto também nas análises mais aprofundadas nas baixas frequências e o volume das salas.

Com isso, os objetivos desta pesquisa foram alcançados: foram avaliadas salas de aula reais quanto aos seus parâmetros de condicionamento acústico; foi verificada a aderência dos espaços aos critérios normativos; e foram utilizadas ferramentas de simulação computacional, validadas a partir de medições *in loco*, como suporte metodológico para propor melhorias.

A metodologia aplicada nessa pesquisa considerada o potencial da modelagem acústica como instrumento técnico de apoio à tomada de decisão projetual e à

correção de deficiências acústicas em salas de aula já existentes, podendo contribuir para ambientes mais propícios à aprendizagem.

Mais do que um diagnóstico, o trabalho oferece possibilidades de avaliação acústica, integrando cálculos, medições *in loco* e simulações, que podem ser aplicadas para a melhoria contínua não apenas dos espaços da UFSC, mas de outras instituições de ensino que enfrentam desafios similares.

7.1 LIMITAÇÕES DA PESQUISA

Algumas limitações do trabalho foram a ausência de equipamentos para a medição completa de parâmetros acústicos de salas, utilizando fórmulas teóricas para estimativas, por exemplo, o índice de articulação da fala. Apesar disso, a análise do tempo de reverberação, realizada com medições técnicas *in loco* e a partir delas as simulações computacionais, serviu como um forte indicador da qualidade acústica e do possível prejuízo à inteligibilidade.

Outra limitação foi uso do software I-SIMPA, proposto como uma ferramenta acessível, o software possui aplicabilidade para espaços pouco complexos como as salas de aula analisadas e é utilizado em trabalhos científicos, porém a simulação de alguns materiais ainda carece de ajustes mais sensíveis, diferente de softwares de alta precisão em que a geometria do elemento, os baffles lineares, por exemplo, é compreendida mais próxima do formato executado de forma real.

7.2 TRABALHOS FUTUROS

Como trabalhos futuros a pesquisa pode ser continuada acrescentando mais parâmetros acústicos de avaliação de salas, com a viabilidade da medição da resposta impulsiva para a medição *in loco* de parâmetros de inteligibilidade da fala.

A análise também pode ser complementada com a avaliação de parâmetros subjetivos, mencionados na norma ABNT ISO 3382, incluindo a percepção do usuário por meio de questionários ou testes de palavras.

Outro ponto que pode ser investigado por trabalhos posteriores é a realização de uma análise de custo-benefício para as diferentes soluções de tratamento acústico propostas, a fim de gerar dados que possam subsidiar a tomada de decisão administrativa e a alocação de recursos para futuras reformas ou construções.

REFERÊNCIAS

- AMORIM, A. E. B. **Formas geométricas e qualidade acústica de salas de aula: estudo de caso em Campinas-SP**. 2007. 241 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Campinas, SP, 2007. Disponível em: <https://hdl.handle.net/20.500.12733/1605006>. Acesso em: 8 nov. 2024.
- ARNAL, A. G. et al. Noise Pollution Challenges in University Classrooms: An Empirical Analysis of Acoustic Performance Standards. **International Journal of Computational Methods and Experimental Measurements**, [s. l.], v. 12, n. 4, p. 395–402, 2024.
- ASSIS, L. N. **Estudo experimental do leiaute de disposição dos materiais de absorção sonora em uma sala de aula**. 2023. 111 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2023.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 12179**: Tratamento Acústico em Recintos Fechados. Rio de Janeiro, 1992.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16313**: Acústica - Terminologia. Rio de Janeiro, 2025.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR ISO 3382**: Acústica — Medição de parâmetros de acústica de salas - Parte 2: Tempo de reverberação em salas comuns. Rio de Janeiro, 2017a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10152**: Acústica – Níveis de pressão sonora em ambientes internos a edificações. Rio de Janeiro, 2017b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR IEC 60268-16**: Equipamento eletroacústico – Parte 16: Objetivo do método de avaliação da inteligibilidade da fala por transmissão acústica. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
- AVELAR, M. et al. Determinação da faixa de frequência para a abordagem estatística em acústica de salas. In: ENCONTRO DA SOBRAC, 28., 2018, Porto Alegre. **Anais eletrônicos...** Campinas: Galoá, 2018. Disponível em: <https://proceedings.science/sobrac/trabalhos/determinacao-da-faixa-de-frequencia-para-a-abordagem-estatistica-em-acustica-de?lang=pt-br>. Acesso em: 20 set. 2024.
- BHANDARI, N.; TADEPALLI, S.; GOPALAKRISHNAN, P. Investigation of acoustic comfort, productivity, and engagement in naturally ventilated university classrooms: Role of background noise and students' noise sensitivity. **Building and Environment**, [s. l.], v. 249, p. 111131, 2024.
- BRANDÃO, E. **Acústica de salas**: projeto e modelagem. São Paulo: Blucher, 2016.
- BARRON, R. F. **Industrial Noise Control and Acoustics**. New York: Marcel Dekker, Inc, 2003.

BERANEK, L. L.; MELLOW, T. J. **Acoustics: Sound Fields and Transducers**. 1. ed. Oxford: Academic Press, 2012. 691 p.

BISTAFA, S. R. Adaptive Control of Low-Frequency Acoustic Modes in Small Rooms. **The Open Acoustics Journal**, [s. l.], v. 5, n. 1, p. 16–22, 2012.

BERARDI, U.; IANNACE, G.; TREMATERRA, A. Acoustic Treatments Aiming to Achieve the Italian Minimum Environmental Criteria (CAM) Standards in Large Reverberant Classrooms. **Canadian Acoustics**, [s. l.], v. 47, n. 1, p. 73–80, 2019.

BISTAFA, S. R. **Acústica aplicada ao controle do ruído**. 3. ed. São Paulo: Blucher, 2018.

BOLT, R. Note on Normal Frequency Statistics for Rectangular Rooms. **J. Acoust. Soc. Am.**, v. 18, n. 1, p. 130-133, 1946.

BONELLO, O. J. A New Criterion for the Distribution of Normal Room Modes. **J. Audio Eng. Soc.**, v. 29, n. 9, 1981.

BRADLEY, J. S. Predictors of speech intelligibility in rooms. **Journal of the Acoustical Society of America**, v. 80, n. 3, p. 837-845, 1998.

BRANDÃO, E. **Acústica de Salas: projeto e modelagem**. 1. ed. São Paulo: Blucher, 2016.

BREGINSKI, T. B. **Desempenho acústico de cortinas em um ambiente de sala de aula**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2021.

BURFOOT, M. et al. Developing virtual classroom environments for intelligent acoustic simulations. In: INTERNATIONAL CONFERENCE OF THE ARCHITECTURAL SCIENCE ASSOCIATION (ANZASCA), 54., 2020. **Anais...** [S. l.]: ANZAScA, 2020.

BURFOOT, M. et al. Passive variable acoustic technology for classroom reverberation time: a case study. **Smart and Sustainable Built Environment**, [S. l.], 23 nov. 2022.

CASTRO-MARTÁNEZ, J. A. *et al.* Effects of classroom-acoustic change on the attention level of university students. **Interdisciplinaria: Revista de Psicología y Ciencias Afines**, [s. l.], v. 33, n. 2, 2017. Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=18049289001>. Acesso em: 12 mar. 2024.

CHOI, Y.-J. Effect of occupancy on acoustical conditions in university classrooms. **Applied Acoustics**, [s. l.], v. 114, p. 36–43, 2016.

CHOI, Y. J. Effects of the distribution of occupants in partially occupied classrooms. **Applied Acoustics**, [s. l.], v. 140, p. 1–12, 2018.

CHOI, Y. J. Evaluation of acoustical conditions for speech communication in active university classrooms. **Applied Acoustics**, [s. l.], v. 159, p. 107089, 2020.

COSTA NETO, P. L. O. **Estatística**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2002.

CROCKER, M. J. **Handbook of Noise and Vibration Control**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2007.

ČUDINA, M.; PREZELJ, J.; PUŠLAR-ČUDINA, M. The impact of paintings hung on lecture room walls on the speech intelligibility and perception of background noise. **Indoor and Built Environment**, [s. l.], v. 25, n. 4, p. 659–673, 2016.

ČUROVIĆ, L. et al. Estimation of sound absorption coefficient at modal frequencies using decay time measurements and eigenvalue model in a small room. **Building Acoustics**, [S. l.], 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/14613484241258622>. Acesso em: 30 maio 2025.

DE LA HOZ-TORRES, M. L. et al. Analysis of Impact of Natural Ventilation Strategies in Ventilation Rates and Indoor Environmental Acoustics Using Sensor Measurement Data in Educational Buildings. **Sensors**, [s. l.], v. 21, n. 18, p. 6122, 2021.

DELIBERADOR, M. S. **O processo de projeto da arquitetura escolar no Estado de São Paulo: caracterização e oportunidades**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Campinas, 2010.

DELIBERADOR, M. S.; KOWALTOWSKI, D. C. C. K.. Importância dos agentes para a arquitetura escolar: aplicação de jogo de apoio ao processo participativo. **Ambiente Construído**, v. 18, n. 2, p. 273–288, abr. 2018.

DHALLUIN, A.; LIMAM, K. Comparison of natural and hybrid ventilation strategies used in classrooms in terms of indoor environmental quality, comfort and energy savings. **Indoor and Built Environment**, [s. l.], v. 23, n. 4, p. 527–542, 2014.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN). **DIN 18041: Hörsamkeit in Räumen - Anforderungen, Empfehlungen und Hinweise für die Planung**. Berlin, 2016.

DIAS, A. **Avaliação das condições de conforto térmico e acústico de salas de aula em escola de tempo integral: estudo de caso da Escola Padre Josimo em Palmas (TO)**. 2009. 141 p. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

DIAS, F. A. M.; SANTOS, B. A. DOS; MARIANO, H. C. Níveis de pressão sonora em salas de aula de uma Universidade e seus efeitos em alunos e professores. **CoDAS**, v. 31, n. 4, p. e20180093, 2019.

DORREGO, F. D. S.; VIGEANT, M. C. A study of the just noticeable difference of early decay time for symphonic halls. **J Acoust Soc Am**, v. 151, p. 80-94, 2022. DOI: 10.1121/10.0009167. PMID: 35105034.

EGAN, D. M. **Architectural Acoustics**. New York: McGraw-Hill, 1988.

ENTE ITALIANO DI NORMAZIONE. **UNI 11532-2: Caratteristiche acustiche interne di ambienti confinati Metodi di progettazione e tecniche di valutazione – Parte 2: Settore scolastico**. [S. l.]: Ente Italiano di Normazione, 2020. (Technical Report).

FERREIRA, A. M. C. **Avaliação do conforto acústico em salas de aula**: estudo de caso na Universidade Federal do Paraná. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Paraná, 2006.

GAUDEOSO, C.; BARBO, M.; BRANDÃO, E. Tutorial para o Uso do Software Gratuito de Simulação em Acústica Geométrica: I-Simpa. In: ENCONTRO DA SOBRAC, 28., 2018, Porto Alegre. **Anais eletrônicos...** Campinas: Galoá, 2018. Disponível em: <https://proceedings.science/sobrac/trabalhos/tutorial-para-o-usodo-software-gratuito-de-simulacao-em-acustica-geometrica-i-s?lang=pt-br>. Acesso em: 20 fev. 2024.

HUANG, W.; PENG, J.; XIE, T. Study on Chinese speech intelligibility under different low-frequency characteristics of reverberation time using a hybrid method. **Archives of Acoustics**, v. 48, n. 2, p. 151-157, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.24425/aoa.2023.145229>. Acesso em: 30 maio 2025.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 16283-1:2014**: Acoustics — Field measurement of sound insulation in buildings and of building elements — Part 1: Airborne sound insulation. Geneva: ISO, 2014.

IRVINE, T. J.; CROCKER, M. J. **Noise and Vibration Control Engineering**: Principles and Applications. 2. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2007.

KRISTIANSEN, J. *et al.* A study of classroom acoustics and school teachers' noise exposure, voice load and speaking time during teaching, and the effects on vocal and mental fatigue development. **International Archives of Occupational and Environmental Health**, [s. l.], v. 87, n. 8, p. 851–860, 2014.

KURI, A. B.; PÉREZ R., S. J. Acoustic study and architectural proposals to improve acoustic comfort in a university campus of Mexico City. **Applied Acoustics**, [s. l.], v. 185, p. 108416, 2022.

KUTTRUFF, H. **Room acoustics**. 6. ed. Boca Raton: CRC Press, 2016.

LAVANDIER, M. *et al.* A series of SNR-based speech intelligibility models in the Auditory Modeling Toolbox. **Acta Acustica**, [s. l.], v. 6, p. 20, 2022.

LECCESE, F.; ROCCA, M.; SALVADORI, G. Fast estimation of Speech Transmission Index using the Reverberation Time: Comparison between predictive equations for educational rooms of different sizes. **Applied Acoustics**, [s. l.], v. 140, p. 143–149, 2018.

LEVANDOSKI, G.; ZANNIN, P. H. T. Quality of Life and Acoustic Comfort in Educational Environments of Curitiba, Brazil. **Journal of Voice**, v. 36, n. 3, p. 436, 2022.

LONG, M. **Architectural Acoustics**. 2. ed. Oxford, UK: Elsevier, 2014.

LUO, J.; HAGE, S. R.; MOSS, C. F. The Lombard Effect: From Acoustics to Neural Mechanisms. **Trends in Neurosciences**, v. 41, n. 12, p. 938–949, 2018.

MEALINGS, K. et al. Towards an Acoustically Accessible Campus: A Case Study of the Acoustic Conditions of an Australian University. **Acoustics Australia**, [s. l.], v. 52, n. 2, p. 273–278, 2024.

NESTORAS, C.; DANCE, S. The Interrelationship between Room Acoustics Parameters as Measured in University Classrooms Using Four Source Configurations. **Building Acoustics**, [s. l.], v. 20, n. 1, p. 43–53, 2013.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DE SAÚDE (OMS). **Coronavirus disease (COVID-19)**. Disponível em: https://www.who.int/health-topics/coronavirus/coronavirus#tab=tab_1. Acesso em: 13 set. 2024.

PEUTZ, V. M. A. Articulation loss of consonants as a criterion for speech transmission in a room. **Journal of the Audio Engineering Society**, 19(11), 915–919, 1971.

PICAUT, J.; FORTIN, N. I-Simpa, a Graphical User Interface Devoted to Host 3D Sound Propagation Numerical Codes. In: ACOUSTICS 2012 NANTES, 2012, Nantes, France. **Anais...** Nantes, France: Société Française d' Acoustique, 2012. Disponível em: <http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00810893>. Acesso em: 10 abr. 2024.

PILCH, A. Sensitivity testing in room acoustic modeling on changes of input parameters on the example of selected concert halls. In: CONVENTION OF THE EUROPEAN ACOUSTICS ASSOCIATION FORUM ACUSTICUM, 10., 2023, Turin, Italy. **Anais...** Turin, Italy: European Acoustics Association, 2024. Disponível em: https://dael.euracoustics.org/confs/landing_pages/fa2023/000955.html. Acesso em: 14 maio 2024.

PINHO, P. G. et al. Aspects concerning the acoustical performance of school buildings in Portugal. **Applied Acoustics**, v. 106, p. 129-134, maio. 2016.

PORTO, C.; RÉGNIER, K. **O ensino superior no Mundo e no Brasil condicionantes, tendências e cenários para o horizonte 2003-2025: uma abordagem exploratória**. Brasília: Ministério da Educação, 2003.

RICCIARDI, P.; BURATTI, C. Environmental quality of university classrooms: Subjective and objective evaluation of the thermal, acoustic, and lighting comfort conditions. **Building and Environment**, [s. l.], v. 127, p. 23–36, 2018.

RIBEIRO, R. S. et al. Assessing acoustical quality in university classrooms in Brazil: Measurements and simulations. **Building Acoustics**, [S. l.], p. 1351010X231218410, 11 jan. 2024.

RIBEIRO, R. S. **Caracterização do condicionamento acústico de uma sala de aula com o uso de painéis de madeira**. 2020. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2020.

SELIM, A. M.; SAEED, D. M. Enhancing the classroom acoustic environment in Badr University, Egypt: A case study. **Building Acoustics**, [s. l.], v. 29, n. 4, p. 577–596, 2022.

SILVA, N. B. C. **Avaliação da Qualidade Acústica de Ambientes Escolares e de seu Entorno Situado Próximo às Quadras Poliesportivas**. 2018. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2018. Disponível em: https://peu.uem.br/Nadyeska_Silva.pdf. Acesso em: 13 nov. 2024.

TAMINATO, F. O.; TENENBAUM, R. A. Construção das respostas impulsivas biauriculares em salas através de redes neurais artificiais. In: ENCONTRO DA SOBRAC, 28., 2018, Porto Alegre. **Anais eletrônicos...** Campinas: Galoá, 2018. Disponível em: <https://proceedings.science/sobrac/trabalhos/construcao-das-respostas-impulsivas-biauriculares-em-salas-atraves-de-redes-neur?lang=pt-br>. Acesso em: 14 mar. 2024.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA. **Sistema Integrado de Espaço Físico**. [S. l.]: UFSC. Disponível em: <https://sief.sistemas.ufsc.br/>. Acesso em: 10 abr. 2024.

VAN DEN HEUIJ, K. et al. Challenging listening environments in higher education: an analysis of academic classroom acoustics. **Journal of Applied Research in Higher Education**, [s. l.], v. 13, n. 4, p. 1213–1226, 2021.

VORLÄNDER, M. **Auralization: Fundamentals of acoustics, modelling, simulation, algorithms and acoustic virtual reality**. Berlin: Springer, 2008.

YANG, D.; MAK, C. M. Relationships between indoor environmental quality and environmental factors in university classrooms. **Building and Environment**, [s. l.], v. 186, p. 107331, 2020.

YANG, D.; MAK, C. M. Effects of acoustical descriptors on speech intelligibility in Hong Kong classrooms. **Applied Acoustics**, [s. l.], v. 171, p. 107678, 2021.

ZANNIN, P. H. T.; FERREIRA, A. M. C.; SANT'ANA, D. Q. Comparação do tempo de reverberação e índice de transmissão da fala (STI) em salas de aula construídas em décadas diferentes. **Ambiente Construído**, v. 9, n. 3, p. 125–139, 2009. Disponível em: <https://seer.ufrgs.br/index.php/ambienteconstruido/article/view/6993>. Acesso em: 20 set. 2024.

ZANNIN, P. H. T.; MARCON, C. R. Objective and subjective evaluation of the acoustic comfort in classrooms. **Applied Ergonomics**, v. 38, n. 5, p. 675–680, 1 set. 2020.

ZHOU, X. Predicting the reverberation time in rectangular rooms with non-uniform absorption distribution. **Applied Acoustics**, v. 171, p. 107539, 1 jan. 2021.

ZWIRTES, D. P. Z. **Avaliação do desempenho acústico de salas de aula: estudo de caso nas Escolas Estaduais do Paraná**. 2006. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Paraná, 2006. Disponível em: <https://hdl.handle.net/1884/5955>. Acesso em: 13 nov. 2024.

ANEXO A – Resultados do estudo-piloto

Tabela 14. Valores de T_{30} medidos - Ruído interrompido

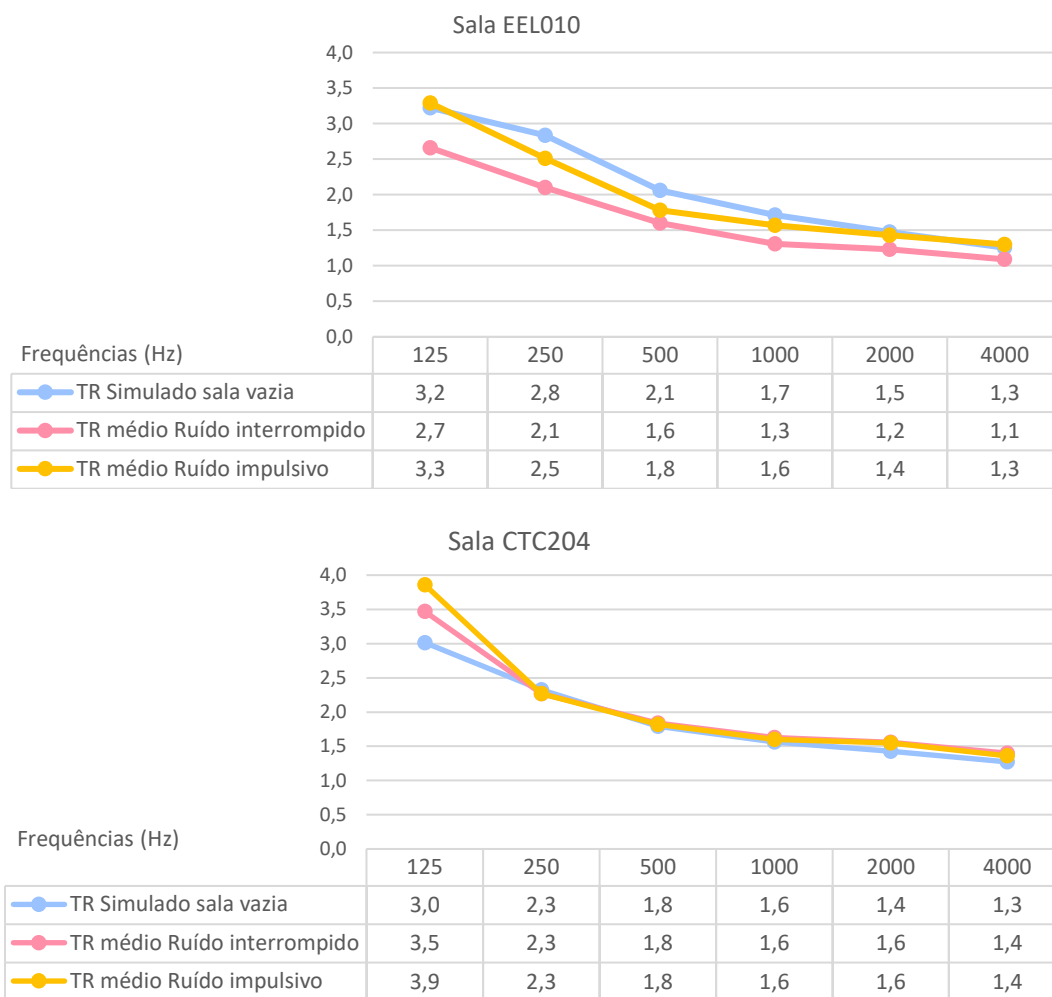
	Frequência (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
Sala EEL010						
F1M1	2,5	2,0	1,6	1,3	1,2	1,1
F1M2	2,9	2,2	1,5	1,3	1,2	1,1
F1M3	2,8	2,1	1,6	1,3	1,2	1,1
F2M1	2,4	2,0	1,6	1,4	1,3	1,1
F2M2	2,8	2,3	1,7	1,3	1,2	1,1
F2M3	2,6	2,0	1,6	1,3	1,2	1,1
Média	2,7	2,1	1,6	1,3	1,2	1,1
Desvio Padrão	0,2	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0
Sala CTC204						
F1M1	3,1	2,2	1,8	1,7	1,5	1,4
F1M2	3,5	2,2	1,9	1,6	1,5	1,4
F1M3	3,4	2,1	1,8	1,6	1,6	1,4
F2M1	2,9	2,4	1,8	1,6	1,5	1,4
F2M2	4,2	2,4	1,9	1,6	1,6	1,4
F2M3	3,7	2,3	1,8	1,6	1,5	1,4
Média	3,5	2,3	1,8	1,6	1,5	1,4
Desvio Padrão	0,5	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0

Fonte: A autora (2024).

Tabela 15. Valores de T_{30} medidos - Ruído impulsivo

	Frequência (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
Sala EEL010						
F1M1	3,8	2,5	1,8	1,6	1,5	1,3
F1M2	3,1	2,6	1,7	1,6	1,4	1,3
F1M3	3,1	2,6	1,8	1,5	1,4	1,3
F2M1	3,3	2,4	1,9	1,6	1,4	1,3
F2M2	3,2	2,4	1,7	1,5	1,4	1,3
F2M3	3,3	2,7	1,7	1,6	1,4	1,3
Média 2	3,3	2,5	1,8	1,6	1,4	1,3
Desvio Padrão	0,3	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0
Sala CTC204						
F1M1	4,09	2,24	1,88	1,6	1,53	1,39
F1M2	3,03	2,31	1,84	1,6	1,54	1,4
F1M3	3,44	2,16	1,87	1,59	1,55	1,41
F2M1	3,22	2,39	1,98	1,63	1,57	1,38
F2M2	3,47	2,2	1,88	1,65	1,56	1,42
F2M3	3,61	2,23	1,74	1,6	1,56	1,39
TR médio Ruído impulsivo	3,9	2,3	1,8	1,6	1,6	1,4
Desvio Padrão	0,4	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0

Fonte: A autora (2024).

Gráfico 20. Valores de T_{30} ensaiados x simulados

Fonte: A autora (2024).