

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

Christian Vargas Gutterres

**MELHORIA DO CONDICIONAMENTO ACÚSTICO DE SALAS DE AULA
EXISTENTES A PARTIR MEDIÇÕES E SIMULAÇÕES**

Santa Maria, RS
2023

Christian Vargas Gutterres

**MELHORIA DO CONDICIONAMENTO ACÚSTICO DE SALAS DE AULA EXISTENTES
A PARTIR MEDIÇÕES E SIMULAÇÕES**

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

Orientador: Prof. Roberto Aizik Tenenbaum

Coorientadora: Prof.^a Viviane Suzey Gomes de Melo

Santa Maria, RS
2023

Gutterres, Christian V.
Melhoria do condicionamento acústico de salas de aula
existentes a partir medições e simulações / Christian V.
Gutterres.- 2023.
75 p.; 30 cm

Orientador: Roberto A. Tenenbaum
Coorientadora: Viviane S. G. Melo
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil, RS, 2023

1. Salas de aula 2. Conforto acústico 3.
Inteligibilidade 4. Simulação computacional I. Tenenbaum
, Roberto A. II. Melo, Viviane S. G. III. Título.

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

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

Christian Vargas Gutterres

**MELHORIA DO CONDICIONAMENTO ACÚSTICO DE SALAS DE AULA EXISTENTES
A PARTIR MEDIÇÕES E SIMULAÇÕES**

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

Aprovado em 30 de agosto de 2023:

**Roberto Aizik Tenenbaum, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)**

Giane de Campos Grigoletti, Dr.^a (UFSM)

Elisabeth A. C. Duarte Gonçalves, Dr.^a (UFAL) (videoconferência)

Santa Maria, RS
2023

DEDICATÓRIA

Aos meus amados pais, José Jorge Pinheiro Gutterres e Vera Regina Vargas Gutterres, minha irmã, cunhado e sobrinhos. Um casal de amigos que são mais que irmãos para mim, Nicolás e Caren que, no momento de maior necessidade estiveram me ajudando e não mediram esforços para tal, a vocês meu muito obrigado, amo todos vocês. Nessa árdua jornada, alguns pedaços de mim, ficaram pelo caminho. Perdi um tio para uma peste pandêmica e meus avós, Jesus e Maria. Infelizmente não terei a satisfação de compartilhar essa conquista com eles, mas com certeza é a eles essa grande vitória da minha vida. E falando em vida, aprendi que na vida tudo são escolhas, algumas certas, outras erradas, infelizmente não sabemos quais são as melhores, mas o que vale é o aprendizado e saber dar valor para as novas oportunidades que essa mesma vida nos dá. E sempre trazer consigo as coisas boas e as pessoas de real valor que encontramos na jornada. E nessa jornada conheci uma pessoa que tem tornado meus dias melhores, e que hoje é minha namorada e a ela também dedico essa conquista, Laura Lemos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço imensamente ao meu professor e orientador Dr. Roberto A. Tenenbaum, que apesar de saber de minhas dificuldades e limitações, esteve sempre me puxando as orelhas e não desistiu de me auxiliar nessa conquista. Um agradecimento à professora Viviane Suzey Gomes de Melo que, além de compartilhar seus conhecimentos, aceitou coorientar este trabalho desenvolvido em um prazo tão curto.

Um agradecimento muito especial aos amigos que fiz nessa jornada, pessoas que me ajudaram demais no desenvolvimento deste trabalho, explicando, auxiliando e tirando dúvidas em alguns momentos. Esses amigos a quem agradeço são dois, o Arthur Brunno Dias e Silva e o Gabriel Braga Regattieri Sampaio. A vocês o meu muito obrigado, de coração. Ambos são acadêmicos do curso de Engenharia Acústica da Universidade Federal de Santa Maria, pessoas extremamente inteligentes e sempre dispostos a ajudar, independente do dia ou horário.

Agradeço imensamente à minha família por todo apoio e incentivo que sempre me deram em todas as minhas escolhas. Pai e mãe amo vocês!

Que homem é o homem que não faz o mundo melhor!

(Cruzada)

RESUMO

MELHORIA DO CONDICIONAMENTO ACÚSTICO DE SALAS DE AULA EXISTENTES A PARTIR MEDIÇÕES E SIMULAÇÕES

AUTOR: Christian Vargas Gutterres

Orientador: Roberto Aizik Tenenbaum

Coorientadora: Viviane Suzey Gomes de Melo

O trabalho encerra a avaliação acústica de uma sala de aula do Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Santa Maria e uma proposta de modificação interna que resulte em melhor condicionamento acústico. Primeiramente, a sala é medida acusticamente segundo as normas pertinentes, sendo calculado seu tempo de reverberação e seu tempo de decaimento inicial para seis posições de microfones. Em seguida, a sala é modelada e simulada acusticamente. Um procedimento de ajuste de coeficientes de absorção das superfícies é conduzido de modo a aproximar os resultados simulados aos medidos, uma vez que há grande incerteza nesses coeficientes. Na sequência, é apresentado um projeto de condicionamento acústico da sala de modo a buscar reduzir os tempos de reverberação a valores mais próximos do ideal, bem como a incrementar a definição na sala. Finalmente, a sala com o tratamento acústico preconizado é novamente simulada. São apresentados os resultados da medição, os resultados comparativos da medição *versus* simulação e comparadas as duas simulações (antes e depois do tratamento acústico proposto), evidenciando-se a melhoria substancial dos tempos de reverberação e do parâmetro definição, fortemente correlacionado à inteligibilidade da fala. Naturalmente, após a execução do tratamento acústico preconizado, será necessária uma segunda medição acústica de forma a confirmar as melhorias, previstas na simulação, para seus parâmetros acústicos.

Palavras-chave: Salas de aula. Conforto acústico. Inteligibilidade. Simulação computacional.

ABSTRACT

IMPROVEMENT OF ACOUSTIC CONDITIONING OF EXISTING CLASSROOMS BASED ON MEASUREMENTS AND SIMULATIONS

AUTHOR: Christian Vargas Gutterres

ADVISOR: Roberto Aizik Tenenbaum

CO-ADVISOR: Viviane Suzey Gomes de Melo

The work involves the acoustic evaluation of a classroom at the Technology Center of the Federal University of Santa Maria and a proposal for an internal modification that results in better acoustic conditioning. First, the room is acoustically measured according to the relevant standards, its reverberation time and its initial decay time being calculated for six microphone positions. Then the room is acoustically modeled and simulated. A procedure for adjusting the surfaces absorption coefficients is carried out in order to approximate the simulated results to the measured ones, since there is great uncertainty in these coefficients. Next, an acoustic conditioning project for the room is presented in order to seek to reduce the reverberation times to values closer to the ideal, as well as to increase the definition in the room. Finally, the room with the recommended acoustic treatment is simulated again. The measurement results are presented, the comparative results of the measurement versus simulation and the two simulations are compared (before and after the proposed acoustic treatment), showing the substantial improvement in reverberation times and the definition parameter, strongly correlated to speech intelligibility. Naturally, after carrying out the recommended acoustic treatment, a second acoustic measurement will be necessary in order to confirm the improvements foreseen in the simulation for its acoustic parameters.

Keywords: Classroom acoustics. Acoustic comfort. Intelligibility. Computer simulation

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Imagem de uma sala de aula em sua configuração tradicional	17
Figura 2 – Correlação entre o parâmetro objetivo D_{50} e o índice de articulação de salas	20
Figura 3 – Imagem de uma sala sem e com tratamento acústico	24
Figura 4 – Sequência seguida após escolha da sala	26
Figura 5 – Perspectiva da fachada principal do Centro de Tecnologia da UFSM	26
Figura 6 – Imagem aérea do Centro de Tecnologia da UFSM	27
Figura 7 – Imagens da Sala 152, anexo “A” do CT/UFSM	27
Figura 8 – Planta baixa da Sala 152	29
Figura 9 – Corte longitudinal da Sala 152	29
Figura 10 – Perspectiva interna da sala desenvolvida no REVIT	30
Figura 11 – Perspectiva da sala de aula	30
Figura 12 – Planta baixa da Sala 152	31
Figura 13 – Imagem tridimensional da Sala 152	31
Figura 14 – Imagem da sala de aula obtida no <i>software</i> AutoCad	32
Figura 15 – Imagem da sala de aula visualizada no <i>software</i> RAIOS 7	33
Figura 16 – Idem Figura 15, com os microfones e fontes posicionados	33
Figura 17 – Equipamentos utilizados nas medições	35
Figura 18 – Planta baixa com equipamentos posicionados na Sala 152 (dimensões em metros) 37	
Figura 19 – Perspectiva da sala com a altura dos receptores e fontes (dimensões em metros) 38	
Figura 20 – Corte da Sala 152 para visualização da altura do ouvinte (dimensões em metros) 39	
Figura 21 – Imagem da lista de materiais utilizados e seus coeficientes	41
Figura 22 – <i>Baffles</i> instalados em uma sala de reuniões	43
Figura 23 – Revest. ness instalados em sala de apresentações artísticas	44
Figura 24 – Imagem da sala em corte, mostrando a angulação dos refletores	44
Figura 25 – Imagem da sala de aula obtida através do <i>software</i> AutoCad	45
Figura 26 – Imagem da sala de aula gerada no RAIOS 7 já com a proposta de modificação 46	
Figura 27 – Resultados medidos de T_{20} para a Fonte 01 e Receptores 01 a 06, em 1/1 oitava, de 125 Hz a 4 kHz	48
Figura 28 – Resultados medidos de T_{20} para a Fonte 02 e Receptores 01 a 06, em 1/1 oitava, de 125 Hz a 4 kHz	49
Figura 29 – Resultados medidos para EDT para a Fonte 01 e Receptores 01 a 06, em 1/1 oitava, de 125 Hz a 4 kHz	50

Figura 30 – Resultados medidos para EDT para a Fonte 02 e Receptores 01 a 06, em 1/1 oitava, de 125 Hz a 4 kHz	51
Figura 31 – T_{20} medido × simulado para a Fonte 01 e Receptores 01 a 06, em 1/1 oitava, de 125 Hz a 4 kHz	52
Figura 32 – T_{20} medido × simulado para a Fonte 02 e Receptores 01 a 06, em 1/1 oitava, de 125 Hz a 4 kHz	53
Figura 33 – EDT medido × simulado para a Fonte 01 e Receptores 01 a 06, em 1/1 oitava, de 125 Hz a 4 kHz	54
Figura 34 – EDT medido × simulado para a Fonte 02 e Receptores 01 a 06, em 1/1 oitava, de 125 Hz a 4 kHz	55
Figura 35 – T_{20} sem tratamento × com tratamento acústico para a Fonte 01 e Receptores 01 a 06, em 1/1 oitava, de 125 Hz a 4 kHz	56
Figura 36 – T_{20} sem tratamento × com tratamento acústico para a Fonte 02 e Receptores 01 a 06, em 1/1 oitava, de 125 Hz a 4 kHz	57
Figura 37 – EDT sem tratamento acústico × com tratamento acústico para a Fonte 01 e Receptores 01 a 06, em 1/1 oitava, de 125 Hz a 4 kHz	58
Figura 38 – EDT sem tratamento × com tratamento acústico para a Fonte 02 e Receptores 01 a 06, em 1/1 oitava, de 125 Hz a 4 kHz	59
Figura 39 – D_{50} sem tratamento × com tratamento acústico para a Fonte 01 e Receptores 01 a 06, em 1/1 oitava, de 125 Hz a 4 kHz	60
Figura 40 – D_{50} sem tratamento × com tratamento acústico para a Fonte 02 e Receptores 01 a 06, em 1/1 oitava, de 125 Hz a 4 kHz	61
Figura 41 – Display do sonômetro – <i>input</i>	70
Figura 42 – Display do sonômetro – <i>frequency range</i>	71
Figura 43 – Display do sonômetro – <i>measurement control</i>	71
Figura 44 – Display do sonômetro – <i>generator</i>	72
Figura 45 – Display do sonômetro – <i>signal recording</i>	73
Figura 46 – Display do sonômetro – <i>post-processing</i>	73
Figura 47 – Imagem do gráfico de desempenho dos <i>Baffles</i> utilizados na proposta ...	74
Figura 48 – Imagem do gráfico de desempenho acústico <i>Revest ness</i> utilizados na proposta	74
Figura 49 – Imagem da planta baixa do pavimento térreo do anexo A do CT	75

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Tabela das etapas desenvolvidas na pesquisa	25
TABELA 2 – Tabela de equipamentos utilizados nas medições	34
TABELA 3 – Posições de fontes na Sala 152.....	38
TABELA 4 – Posições de receptores na Sala 152.....	38

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	JUSTIFICATIVA	14
1.2	OBJETIVOS	15
1.2.1	Objetivos gerais	15
1.2.2	Objetivos específicos	15
1.3	DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1	ACÚSTICA DE SALAS	16
2.1.1	Parâmetros de qualidade acústica	17
2.2	SIMULAÇÃO DE CAMPO ACÚSTICO	20
2.3	CARACTERÍSTICAS DO PROGRAMA DE SIMULAÇÃO RAIOS 7	21
2.4	MATERIAIS DE ACABAMENTO EM ABSORÇÃO	23
2.5	ABSORÇÃO, DIFUSÃO E REFLEXÃO SONORA	24
3	MÉTODO	25
3.1	CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA	26
3.2	SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS	28
3.2.1	Modelagem no <i>software</i> REVIT	29
3.2.2	Modelagem AutoCad	32
3.2.3	Modelagem no RAIOS 7	32
3.3	MEDIÇÕES ACÚSTICAS	33
3.3.1	Instrumentação	34
3.3.2	Medição de ruído residual	36
3.3.3	Resposta Impulsiva e curva de decaimento	39
3.3.4	Método do ruído interrompido	39
3.4	AJUSTE DOS COEFICIENTES	40
4	PROPOSTA DE CONDICIONAMENTO ACÚSTICO DA SALA	42
4.1	<i>BAFFLES</i>	42
4.2	PAINÉIS ACÚSTICOS	43
4.3	REFLETORES	44
4.4	PROPOSTA DE CONDICIONAMENTO ACÚSTICO	45
5	RESULTADOS	47
5.1	RESULTADOS DAS MEDIÇÕES	47
5.2	MEDIÇÕES VS. SIMULAÇÕES	52
5.3	SIMULAÇÕES SEM TRATAMENTO VS. COM TRATAMENTO ACÚSTICO	56
6	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	62
6.1	MEDIÇÕES ACÚSTICAS	62

6.2	MEDIÇÕES VS. SIMULAÇÕES ACÚSTICAS	62
6.3	SIMULAÇÃO SEM E COM TRATAMENTO	63
7	CONCLUSÕES.....	65
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67
	APÊNDICE A – TEMPLATE	70
	APÊNDICE B – LAUDOS DOS MATERIAIS UTILIZADOS NA PROPOSTA.....	74
	APÊNDICE C – PLANTA BAIXA CT.....	75

1 INTRODUÇÃO

Aspectos como segurança, conforto e acessibilidade são primordiais em uma instituição de ensino (BERNARDI; KOWALTOWSKI, 2006). Portanto, pensando no projeto arquitetônico de uma sala de aula, é necessário levar em consideração o ambiente onde está inserido, as necessidades da comunidade que a utilizará e os fatores sociais e econômicos (KOWALTOWSKI, 2011). Atualmente, pesquisas nas áreas de arquitetura e pedagogia buscam criar ambientes que se adéquem às diferentes formas de ensino e aprendizado.

Ao tratar do conforto de uma edificação, se está abordando o conforto térmico, lumínico, acústico e funcional. Porém, ao estudar este tema, é importante lembrar que a Associação Brasileira de Normas Técnicas, por meio da norma NBR 10152 (ABNT, 2017), estabelece os níveis de ruído compatíveis com o conforto acústico em ambientes diversos de edificações. O comportamento está relacionado ao conforto ambiental e uma edificação de ensino é de grande complexidade (ALVARES; KOWALTOWSKI, 2015).

Ao longo dos anos, foram desenvolvidos inúmeros estudos acústicos sobre salas de aula que, em sua grande maioria, tratam de escolas de ensino fundamental e médio (GOMES; BERTOLI, 2005)(BERNARDI; KOWALTOWSKI, 2006)(CORREIA; OITICICA, 2014)(RIBEIRO, 2020)(MELO; TENENBAUM; MUSAFIR, 2012). Observa-se que a configuração das salas de aula tanto para ensino fundamental, médio e superior é praticamente o mesmo, a única diferença sendo a faixa etária dos ouvintes. Por exemplo, as especificações constantes no Memorial Descritivo e Especificações Técnicas do Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação (FNDE), não trata, particularmente quanto a aspectos acústicos, de diferenciação entre salas de aula dos três níveis educacionais.

Além disso, é possível notar também que a imensa maioria dos estudos verifica, identifica e analisa a má qualidade acústica das salas de aula (BRADLEY; SATO, 2008), entre estas, estão as salas de aula brasileiras (GOMES; BERTOLI, 2005)(MEDRADO, 2004). Todavia, propostas de melhorias acústicas, como o projeto acústico propriamente dito, não têm sido apresentados.

Uma sala de aula é um espaço que requer o conforto acústico adequado, visto que, se inexistente, este pode prejudicar o processo de ensino e aprendizagem, considerando que a palavra falada pelo professor não será compreendida pelo aluno, vindo a causar também o estresse físico no professor (KRÜGER; ZANNIN, 2004).

Um dos problemas mais comuns em salas de aula é a reverberação excessiva, que ocorre quando o som reflete nas superfícies da sala, causando um prolongamento do tempo em que o som permanece no ambiente. Isso pode resultar em dificuldades de compreensão da fala, o que usualmente chamamos de *inteligibilidade da fala*.

Além disso, a falta de isolamento acústico adequado também pode ser um problema. Ruídos externos, como o tráfego de veículos, sirenes ou obras em andamento,

podem penetrar na sala de aula, causando distração e interferindo na concentração dos discentes. Da mesma forma, o ruído interno, como cadeiras arrastadas, conversas paralelas ou oriundas de outras salas ou ruídos dos equipamentos de ar condicionado, também pode ser perturbador e prejudicar o ambiente de aprendizagem. Com o aumento do ruído residual no momento em que o professor está falando, é necessário que este precise alterar o tom de voz, para que seja entendido, também sendo prejudicado (BRINK et al., 2020).

Outro desafio é o eventual desequilíbrio na distribuição do som na sala. A falta de uniformidade sonora pode ocasionar que em uma determinada região da sala os níveis sonoros sejam adequados ao bom entendimento, ao passo que em outras regiões os níveis podem ficar demasiadamente reduzidos ou mesmo amplificados. Isso pode ser causado por uma combinação de fatores, como a falta de absorção sonora em certas áreas e a má disposição do mobiliário e equipamentos.

O trabalho aqui desenvolvido, considera uma sala de aula de ensino superior, em seus aspectos físicos e acústicos. Como a sala em estudo consiste em um ambiente padrão no Centro de Tecnologia da UFSM, a análise de seu condicionamento acústico pode ser tomada como um paradigma para as demais salas de aula do Centro, em particular para aulas teóricas. No Apêndice C consta uma planta baixa do pavimento térreo do Anexo A do Centro de Tecnologia (CT), comprovando serem praticamente idênticas em termos geométricos as salas vizinhas à sala estudada.

A ideia central do trabalho, portanto, é o estudo de uma sala de aula tomada como paradigma, a partir de medições e simulações acústicas, e apresentar um projeto de condicionamento acústico para a sala padrão que leve à melhoria dos parâmetros de qualidade acústica: tempo de reverberação (T_{20}), tempo de decaimento inicial (EDT) e definição (D_{50}), buscando chegar a seus valores ideais.

1.1 JUSTIFICATIVA

O Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação (FNDE) em seu Memorial Descritivo e Especificações Técnicas relativas a espaços educacionais estabelece uma série de normativas quanto a: Arquitetura; Sistema construtivo; Elementos construtivos; Hidráulica; e Elétrica, para salas de aula. Todavia não há nenhuma referência às condições acústicas e lumínicas das mesmas.

Como mencionado na Introdução, dentre os diversos estudos brasileiros quanto à acústica de salas de aula, não foram encontradas referências a projetos de condicionamento acústico. A ideia central deste trabalho envolve, portanto, o estudo de uma sala de aula padrão de uma universidade pública, por meio de medições e simulações acústicas, e a apresentação de um projeto de condicionamento acústico baseado nos parâmetros de qualidade acústica medidos e simulados.

1.2 OBJETIVOS

Esta seção apresenta os objetivos geral e específicos desta pesquisa.

1.2.1 Objetivos gerais

Propôr um projeto de condicionamento acústico que seja aplicável em salas de aula existentes e que sigam o padrão do FNDE, utilizando materiais acústicos de baixo custo, disponíveis no mercado, e que, para sua execução, não exija alteração em seu sistema construtivo ou arquitetônico.

1.2.2 Objetivos específicos

1. Avaliar a qualidade acústica de uma sala de aula padrão do Centro de Tecnologia da UFSM.
2. Identificar os parâmetros acústicos que necessitam ser modificados para adequar-se a um ambiente educacional.
3. Desenvolver um projeto de condicionamento de baixo custo que otimize os parâmetros de qualidade acústica da sala e que possa ser estendido a outras salas similares.
4. Não interferir no sistema construtivo e/ou arquitetônico da sala.
5. Comparar, via simulação numérica, o comportamento acústico da sala antes e depois do projeto de condicionamento proposto.

1.3 DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

O Capítulo 2 apresenta alguns conceitos fundamentais relativos à acústica de salas de aula. O Capítulo 3 apresenta o método utilizado na pesquisa, visando a avaliação de salas de aula, por medições e simulações acústicas. Já o Capítulo 4 traz uma proposta de condicionamento acústico para uma sala de aula do Centro de Tecnologia da UFSM. O Capítulo 5 trata dos resultados obtidos nos ensaios em campo conduzidos na sala de aula avaliada, bem como das simulações acústicas realizadas. Apresenta, ainda, os resultados das simulações acústicas com a proposta de condicionamento. No Capítulo 6 são discutidos aspectos levados em consideração no decorrer deste trabalho. É apresentado primeiramente, uma discussão dos resultados das medições. Em seguida, é feita uma análise da comparação entre dados medidos e simulados. Na sequência, a comparação entre os resultados simulados sem e com o condicionamento acústico proposto é discutido. O Capítulo 7 apresenta as conclusões do trabalho.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são abordados os aspectos fundamentais para a elaboração do estudo. Primeiramente é necessário entender quais parâmetros construtivos são utilizados, como se dá a utilização de uma sala de aula, configuração na posição do docente e dos alunos. Para a identificação dos assim chamados problemas acústicos em uma sala de aula, é necessário estudar o tempo de reverberação (T_{20}), o tempo de decaimento inicial (EDT) e os parâmetros objetivos que tenham relação com a fala, por exemplo, a definição (D_{50}).

Segundo o Memorial Descritivo e Especificações Técnicas fornecido pelo FNDE, as escolas possuem basicamente o sistema construtivo em estrutura de concreto e alvenarias para vedação (blocos cerâmico, argamassa, emboço e reboco). Este é um fator que possibilita a replicação da proposta, já que o estudo foi desenvolvido em uma sala de aula que possui o mesmo sistema construtivo.

As salas de aula do CT são utilizadas por alunos de cursos técnicos e superiores, o que indica idade acima de 17 anos. Dessa maneira é possível seguir as indicações das normas técnicas em relação à altura dos ouvintes, que para medições acústicas é de 1,20 m, altura média da orelha de um adulto sentado. Dessa maneira, também, é possível definir em quais salas de aula a proposta pode ser replicada.

Segundo Brandão (2016), a faixa de frequência de maior sensibilidade da orelha humana é em torno de 4 kHz. Apesar da audição humana identificar frequências de 20 Hz a 20 kHz, a faixa de 1 kHz a 6 kHz é considerada a faixa crítica para a inteligibilidade da fala. A compreensão da voz humana está entre os níveis de 30 a 80 dB e frequências de 200 Hz a 6,3 kHz (BALLOU, 2008).

2.1 ACÚSTICA DE SALAS

A acústica de salas abrange uma ampla variedade de fenômenos relacionados ao som, desde a sua produção e transmissão até a sua recepção e percepção pelos seres humanos. Um dos principais objetivos da acústica de salas é compreender como o som se comporta em ambientes específicos, como salas de concerto, teatros, estúdios de gravação, espaços abertos etc., e como sua propagação pode ser aperfeiçoada para obter uma melhor qualidade sonora. A acústica de salas também desempenha um papel importante no projeto de sistemas de áudio, na engenharia de som.

A configuração de uma sala de aula desempenha um papel fundamental no processo de aprendizagem dos alunos. Primeiramente, o arranjo dos assentos pode influenciar a interação entre os estudantes. Muitos educadores preferem dispor as carteiras em

formato de círculo ou em grupos pequenos, promovendo a colaboração e a discussão. Isso estimula a participação ativa dos alunos, tornando o ambiente mais propício para trocas de ideias. Na Figura 1 é possível observar como é tradicionalmente disposta uma sala de aula.

Figura 1 – Imagem de uma sala de aula em sua configuração tradicional



Fonte: Adaptado de PROACÚSTICA (2019, p. 07).

A sala de aula tem como principal fonte a voz do professor que, na maioria das vezes, está posicionado na frente dos alunos, estando estes muitas vezes posicionados ao fundo da sala, ou seja, longe da fonte sonora. É comum dizer que determinados lugares de uma sala são melhores que outros, em termos de entendimento, ou seja, de inteligibilidade (SOUZA; ALMEIDA; BRAGANÇA, 2016).

2.1.1 Parâmetros de qualidade acústica

Parâmetros de qualidade acústica são medidas utilizadas para avaliar e descrever as características sonoras de um ambiente. Esses parâmetros são essenciais para entender como o som se comporta em um espaço e podem ser utilizados para otimizar a acústica de salas de concerto, estúdios de gravação, auditórios, dentre outros.

O comportamento da onda sonora pode ser descrito como se segue: o som é emitido por determinada fonte, choca-se contra as superfícies do ambiente e ocorrem três comportamentos em que parte da onda é refletida, parte é absorvida e se dissipa e parte é transmitida (KUTTRUFF, 2009).

Um dos parâmetros mais importantes é o tempo de reverberação, que mede o tempo necessário para que o som se dissipe em um ambiente após a fonte sonora ter sido interrompida. Um tempo de reverberação adequado é essencial para garantir clareza

e inteligibilidade do som, tanto para música quanto para fala. O mobiliário encontrado na sala também influencia na qualidade acústica, pois atua na reflexão, reverberação, distribuição e absorção sonora (SOUZA; ALMEIDA; BRAGANÇA, 2016).

Ao considerar parâmetros de qualidade acústica, é possível projetar espaços com sonoridades específicas para atender às necessidades e objetivos desejados. Esses parâmetros ajudam a garantir que a experiência sonora em um ambiente seja agradável, nítida e adequada ao propósito pretendido, seja ele um concerto, uma apresentação teatral ou uma gravação de áudio.

Outro parâmetro fundamental é a inteligibilidade da fala, que refere-se à capacidade de entendimento das palavras no discurso falado (LONG, 2014). É um aspecto fundamental da comunicação verbal, pois permite que informações sejam transmitidas e compreendidas pelos ouvintes. Todo ambiente que tenha foco na fala, necessita de atenção para este parâmetro acústico. É importante quantificar a qualidade acústica em uma sala, pois a fala é uma atividade humana fundamental (BRANDÃO, 2016).

O manual da ProAcústica para qualidade acústica em escolas diz que: “A inteligibilidade é a propriedade pela qual, dentro de uma sala, os ouvintes compreendem com mais ou menos dificuldade o que está sendo falado por um orador.” (PROACÚSTICA, 2019).

O tempo de reverberação, notado como T_{60} é o tempo necessário para a energia sonora no interior de uma sala decair de um milionésimo de sua energia inicial, ou seja, 60 dB (SABINE, 1922). Na prática, costumam-se utilizar T_{30} e T_{20} . Tanto o T_{30} quanto o T_{20} são determinados trechos do T_{60} equivalentes. É um ajuste da curva delimitada em uma faixa de -5 dB a -35 dB por exemplo. Com essa diferença obtemos o T_{30} e de -5 dB a -25 dB obtemos o T_{20} . É desconsiderada a faixa de 0 a -5 dB, pois há maior irregularidade nesse decaimento inicial, por isso a faixa de medições do tempo de reverberação inicia após o decaimento inicial de -5 dB. De acordo com Brandão (2016), é sempre útil medir T_{20} e T_{30} para procedimentos experimentais.

As Equações (2.1) e (2.2) apresentam as expressões matemáticas utilizadas para determinação de tais valores.

$$T_{20} = 3(t_{-25} - t_{-5}), \quad (2.1)$$

$$T_{30} = 2(t_{-35} - t_{-5}), \quad (2.2)$$

em que t_{-35} é o instante de tempo em que o nível de pressão sonora atinge -35 dB, t_{-25} é o instante de tempo em que o nível de pressão sonora atinge -25 dB e t_{-5} é o instante de tempo em que este atinge -5 dB, relativos ao nível de pressão sonora inicial.

O tempo de decaimento inicial (EDT) — do inglês *Early Decay Time* — é medido entre 0 e -10 dB (BRANDÃO, 2016). Ele também é uma estimativa do T_{60} , porém é uma medida a partir do seu ponto inicial, pois mede a inclinação da curva nos primeiros instantes em que esta acontece. Sua expressão matemática é dada por

$$\text{EDT} = 6(t_0 - t_{-10}), \quad (2.3)$$

em que t_0 é o instante de interrupção do ruído e t_{-10} é o instante em que o nível de pressão sonora decai de 10 dB. Neste trabalho, foram utilizados apenas valores de T_{20} o que é uma tendência das publicações atuais (BRINKMANN et al., 2021).

Segundo Brandão (2016), "Vale dizer também que o EDT se correlaciona um pouco melhor com a fala e a música com rápida sequência de notas (*staccato*), já que a cauda reverberante será mascarada pela próxima sílaba ou nota." (pág. 506).

O D_{50} , é denominado definição para a fala. O D_{50} apresenta valores entre 0 e 100%, sendo que valores acima de 50% indicam maior definição, uma melhor qualidade no entendimento da fala. As reflexões iniciais contidas nos primeiros 50 ms tendem a estar integradas com o som direto pelo sistema auditivo humano. Acima de 50% a energia contida no som direto e primeiras reflexões é maior do que a energia contida na cauda reverberante da resposta impulsiva da sala. A expressão matemática para o D_{50} é

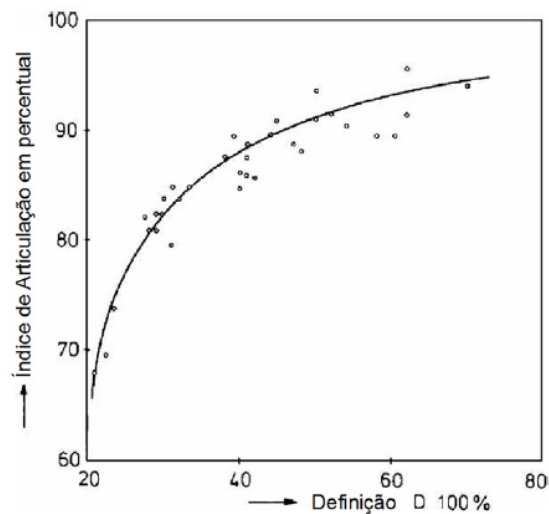
$$D_{50} = \frac{\int_0^{50\text{ms}} h^2(t) dt}{\int_0^{\infty} h^2(t) dt}, \quad (2.4)$$

em que $h(t)$ é a resposta impulsiva da sala para o par fonte-microfone. Observe que o D_{50} estima a razão da energia acumulada nos primeiros 50 milissegundos pela energia total.

Conforme apresentado na Figura 2, a definição (D_{50}) está altamente correlacionada com a inteligibilidade. Por esse motivo, é um parâmetro de grande importância em acústica de salas e por isso deve ser levado em consideração. É possível observar que com uma definição entre 60 e 80%, a inteligibilidade fica acima dos 90%.

A inteligibilidade da fala costuma ser medida pelo *índice de articulação* (HOUT-GAST; STEENEKEN, 1985). Grosso modo, o índice de articulação é avaliado a partir de testes de articulação, que consistem de ditados para o público presente na sala que, a posteriori, são corrigidos e é atribuído à sala um índice de articulação entre 0 e 100%, correspondendo ao índice de acertos.

Figura 2 – Correlação entre o parâmetro objetivo D_{50} e o índice de articulação de salas



Fonte: Adaptado de (Kuttruff, 2009).

2.2 SIMULAÇÃO DE CAMPO ACÚSTICO

A simulação de campo acústico é uma técnica amplamente utilizada para prever e analisar o comportamento das ondas sonoras em um determinado ambiente. Por meio da simulação, é possível estudar como o som se propaga e interage com objetos, superfícies e diferentes condições do meio ambiente. Utilizando algoritmos e modelos matemáticos, a simulação de campo acústico permite visualizar e prever características como a reflexão, difração e absorção do som em um espaço tridimensional.

Bistafa e Bradley (2001) utilizaram simulações computacionais com e sem tratamento acústico em salas de aula, com o intuito de avaliar parâmetros acústicos objetivos. Com essas simulações, foi possível observar aumentos de 75 a 100% no índice de transmissão da fala após serem acrescentados materiais acústicos de absorção.

Uma das aplicações mais comuns da simulação de campo acústico é na área de acústica arquitetônica, onde se busca otimizar o projeto de ambientes internos, como salas de concerto, teatros ou estúdios de gravação. Através da simulação, é possível analisar a distribuição do som nessas salas, ajustar a geometria e os materiais das superfícies, além de posicionar estrategicamente dispositivos de absorção ou difusão sonora.

Além disso, a simulação de campo acústico também é utilizada em setores como engenharia automotiva, aeroespacial e de dispositivos eletrônicos, onde a análise do comportamento acústico é crucial para o projeto e desenvolvimento de produtos. Ao prever como o som se comportará em diferentes condições, é possível otimizar o design de componentes e sistemas, reduzindo ruídos indesejados, melhorando a qualidade sonora e garantindo a conformidade com padrões regulatórios. Em resumo, a simulação de campo

acústico desempenha um papel fundamental na compreensão e controle do som em diversos contextos, permitindo o aprimoramento de projetos e a criação de ambientes sonoros mais agradáveis e eficientes (FONSECA et al., 2021). "A simulação numérica de acústica de salas tem sido um dos mais importantes enfoques de pesquisa em acústica de salas. Suas principais vantagens, comparando-se à simulação por modelo reduzido, são o baixo custo, a rapidez na modelagem e remodelagem da sala e no tratamento de resultados."(TENENBAUM et al., 2007).

Todos os grandes programas comerciais de simulação acústica de salas estão baseados no princípio de validade da acústica geométrica (AG). Essa hipótese considera raios acústicos, à semelhança de raios luminosos, ortogonais às frentes de onda, sendo válida enquanto os comprimentos de onda são pequenos comparados às dimensões dos principais elementos da sala.

Para frequências acima da assim chamada *frequência de Schroeder*, dada por

$$f_s = 2000\sqrt{\frac{T_{60}}{V}}, \quad (2.5)$$

os modelos da AG são considerados como válidos, o que é o caso do *software* RAIOS 7. Para frequências abaixo da frequência de Schroeder modelos numéricos como o método dos elementos finitos ou o método dos elementos de contorno, que modelam o comportamento modal da sala são os mais adequados.

Como será visto no Capítulo 5, o tempo de reverberação global médio medido foi de 1,16 s. Como a sala tem volume de 256 m³, aproximadamente, a frequência de Schroeder será

$$f_s = 2000\sqrt{\frac{1,16}{256}} = 134,6 \text{ Hz}. \quad (2.6)$$

Portanto, os resultados de simulação do *software* RAIOS 7 na banda de 1/1 oitava de 125 Hz se apresentarão não confiáveis, uma vez que o RAIOS 7 baseia-se em acústica geométrica.

2.3 CARACTERÍSTICAS DO PROGRAMA DE SIMULAÇÃO RAIOS 7

Programas de simulação acústica são ferramentas vitais na indústria da acústica, engenharia de som e engenharia acústica. Eles são usados para modelar e prever como o som se comportará em ambientes específicos, como salas de concerto, salas de cinema, estúdios de gravação e espaços arquitetônicos diversos, dentre estes, salas de aula.

Tais programas geralmente baseiam-se em algoritmos avançados que consideram a propagação das ondas sonoras, sua interação com superfícies e objetos, bem como a absorção e reflexão do som. Eles são fundamentais para projetar ambientes acusticamente eficientes, onde a qualidade sonora é priorizada (SVENSSON; SAVIOJA, 2015).

O programa RAIOS 7 é uma poderosa ferramenta de simulação e análise de propagação de ondas sonoras em ambientes complexos. Utilizando técnicas avançadas de traçado de raios e de transição de energia (TENENBAUM et al., 2007), o programa permite modelar com precisão o comportamento acústico em espaços internos e externos. Com ele, é possível estudar a propagação do som, calcular respostas impulsivas mono e binauriculares, determinar curvas de decaimento, calcular tempos de reverberação, otimizar o posicionamento de alto-falantes e avaliar o desempenho acústico de ambientes como salas de concertos, teatros, escritórios e salas de conferência. O RAIOS 7 oferece uma interface intuitiva e flexível, além de proporcionar resultados detalhados e confiáveis, auxiliando profissionais de engenharia acústica e projeto sonoro a aprimorar a qualidade acústica dos espaços em que trabalham. "O programa RAIOS foi testado nas duas últimas intercomparações internacionais de programas de simulação de acústica de salas, conhecidas como Round-Robins (RRs): o RR3, que ocorreu em 2001 e 2002; e o RR4 que foi lançado em 2016." (FONSECA et al., 2021). Ele calcula todos os parâmetros mais usuais de qualidade acústica entre as bandas de 1/1 oitava de 63 Hz até 16 kHz. T_{20} , T_{30} , EDT, D_{50} , C_{50} , entre outros.

Ao importar um arquivo com extensão .dxf para o *software* RAIOS 7, são aplicados os coeficientes de cada material de superfície presente na sala, como paredes, tetos e piso. No próprio *software* existe uma grande biblioteca de materiais já cadastrados em que seus coeficientes são conhecidos. Mas caso não exista na biblioteca fornecida pelo programa, é possível inserir novos materiais e seus respectivos coeficientes.

As reflexões especulares são calculadas, no *software* RAIOS 7, por meio de um algoritmo de traçado de raios otimizado. Já as reflexões difusas são calculadas por um algoritmo de matrizes de transição, que são similares à radiosidade, adotada em transmissão de calor. Além disso, é estimada a atenuação devido à propagação sonora no ar, particularmente importante para médias e altas frequências.

São dados de entrada do *software* a geometria da sala, coeficientes de absorção e espalhamento, ambos por bandas de 1/1 oitava, posicionamento e características acústicas das fontes sonoras (potência, espectro, direcionalidade) e dos receptores (suas HRIR/HRTFs). São dados de saída do programa as respostas impulsivas mono e binauriculares, curvas de decaimento e valores dos principais parâmetros de qualidade acústica por banda de 1/1 oitava, para cada par fonte-receptor.

O programa RAIOS foi testado nos dois últimos *Round Robins* (TENENBAUM et al., 2007), (CARNEIRO et al., 2022), bem como constou de diversas publicações recentes em periódicos (TENENBAUM; TAMINATO; MELO, 2018) (TENENBAUM; TAMINATO; MELO, 2020) (FONSECA et al., 2021) (MELO et al., 2021) (FONSECA et al., 2022).

2.4 MATERIAIS DE ACABAMENTO EM ABSORÇÃO

Os materiais que são utilizados para absorção tipicamente são fibrosos ou porosos. As lãs de rocha e de vidro, por exemplo, são materiais fibrosos enquanto as espumas são materiais porosos.

Materiais porosos dissipam energia acústica por meio das múltiplas reflexões que ocorrem no interior dos poros do material (BISTAFA, 2018). Já os materiais fibrosos, dissipam energia sonora por meio da vibração e resultante atrito entre as fibras do material.

Os materiais de acabamento com absorção sonora desempenham um papel fundamental na criação de espaços acusticamente confortáveis. Esses materiais são projetados para reduzir a reverberação sonora, minimizando os ecos indesejados e melhorando a qualidade sonora dos ambientes. Existem diversas opções disponíveis no mercado, cada uma com características específicas para atender às necessidades acústicas de diferentes espaços.

Um exemplo comum de material de acabamento em absorção sonora é a espuma. Esse material, geralmente feito de melamina expandida ou lã de PET (sigla para *polyethylene terephthalate*), apresenta uma estrutura porosa que permite a absorção eficiente das ondas sonoras. Essas espumas são amplamente utilizadas em estúdios de gravação, salas de cinema e auditórios.

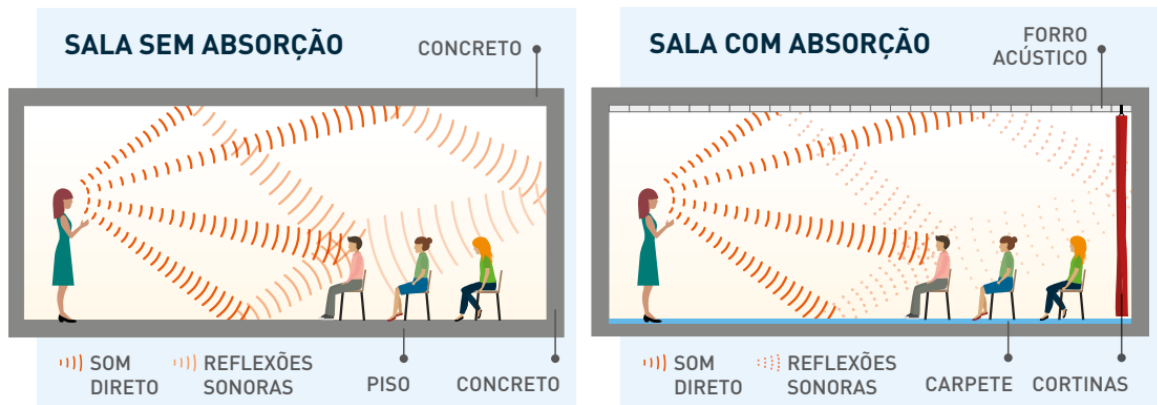
Além da espuma e dos materiais fibrosos, existem outros materiais utilizados para a absorção sonora, como painéis de fibra de vidro, painéis de madeira perfurada. Cada um desses materiais tem suas próprias características acústicas e estéticas, permitindo que sejam adaptados a diferentes tipos de ambiente e decorações.

É importante ressaltar que o projeto acústico de um espaço deve levar em consideração não apenas os materiais de absorção sonora, mas também outros elementos, como difusores e o próprio layout do ambiente. Uma combinação adequada desses elementos pode proporcionar um ambiente acusticamente balanceado e agradável, onde o som é absorvido de forma controlada, melhorando a experiência dos ocupantes.

É possível observar na Figura 3, como as ondas sonoras se comportam dentro de um ambiente sem tratamento e com tratamento acústico, facilitando o entendimento e evidenciando a necessidade de uma intervenção para melhoria desse espaço.

Em resumo, os materiais de acabamento com absorção ou difusão sonora desempenham um papel essencial na criação de ambientes acusticamente confortáveis. Eles ajudam a reduzir a reverberação e melhoram a qualidade sonora de espaços como estúdios, salas de cinema e auditórios. A escolha dos materiais adequados, combinada com um projeto acústico bem planejado, pode criar um ambiente equilibrado e agradável aos ouvintes.

Figura 3 – Imagem de uma sala sem e com tratamento acústico



Fonte: Retirado de PROACÚSTICA (2019, p. 17).

2.5 ABSORÇÃO, DIFUSÃO E REFLEXÃO SONORA

São três os principais fenômenos da propagação sonora que ocorrem em uma sala, sendo eles: absorção, reflexão especular e reflexão difusa. A difusão e a reflexão sonora são dois conceitos fundamentais no estudo e compreensão da acústica.

A difusão ocorre quando o som se propaga por um ambiente e é disperso em várias direções, resultando em uma distribuição uniforme da energia sonora na sala. Isso é especialmente importante em espaços de apresentação, como teatros e salas de concertos, onde a difusão ajuda a evitar a formação de ecos indesejados.

Por outro lado, a reflexão sonora refere-se ao fenômeno em que o som incide sobre uma superfície e retorna em direção ao ambiente. As superfícies refletoras podem ser paredes, pisos, tetos ou qualquer outro objeto sólido presente no ambiente. A reflexão sonora pode ser controlada através do uso de materiais acústicos absorventes ou difusores, que ajudam a controlar o tempo de reverberação.

Tanto a difusão quanto a reflexão sonora desempenham papéis importantes na criação de ambientes acusticamente agradáveis e na melhoria da inteligibilidade do som. A difusão ajuda a espalhar o som de forma mais uniforme pelo espaço, reduzindo a concentração de energia sonora em determinadas áreas do recinto e evitando a formação de pontos de audição “mortos” ou excessivamente reverberantes. Por outro lado, a reflexão sonora pode ser usada estrategicamente para direcionar o som para áreas específicas ou criar efeitos sonoros desejados em estúdios de gravação ou salas de concerto.

3 MÉTODO

No desenvolvimento desta pesquisa algumas etapas foram necessárias. Aqui são apresentados os métodos utilizados para o desenvolvimento do estudo. Desse modo, a execução do estudo ocorreu conforme a sequência apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 – Tabela das etapas desenvolvidas na pesquisa

Ordem	Trabalho desenvolvido
1°	Caracterização da amostra
2°	Simulações computacionais
3°	Medições acústicas
4°	Ajuste dos coeficientes
5°	Proposta de condicionamento
6°	Resultados
7°	Discussão
8°	Conclusões

Fonte: Autor (2023).

Este capítulo apresenta as quatro primeiras etapas que foram seguidas para o desenvolvimento deste trabalho e as demais etapas são apresentadas nos capítulos subsequentes. Na primeira, identificou-se a sala objeto do estudo que foi escolhida por fazer parte de um projeto de estudos dos acadêmicos do Curso de Engenharia Acústica da UFSM. Esta foi caracterizada de acordo com suas formas e medidas. A sala segue padrões construtivos, que são possíveis de serem observados a partir da Figura 49, que corresponde à planta disponível no apêndice "C". Na segunda etapa, foram realizadas as medições acústicas da sala com os equipamentos descritos na Seção 3.3.1, segundo as normas da ABNT NBR 10151:2019, NBR 10152:2017 e NBR ISO 3382-2:2017. Dessa forma, foram obtidos os parâmetros acústicos da sala em questão. A terceira e quarta etapas consistiram em simular, utilizando um *software* de acústica de salas, o ambiente e, em seguida, ajustar seus coeficientes de absorção. A quinta etapa do estudo constitui de um projeto de condicionamento acústico para a sala, de modo a otimizar os parâmetros acústicos obtidos nas medições e simulações. A sexta etapa também utilizou o mesmo *software* de simulação acústica utilizado na etapa anterior, porém agora para simular a proposta de condicionamento acústico. A sétima e última etapa consistiu em analisar os dados obtidos com a simulação da proposta, a fim de verificar a eficácia do projeto proposto.

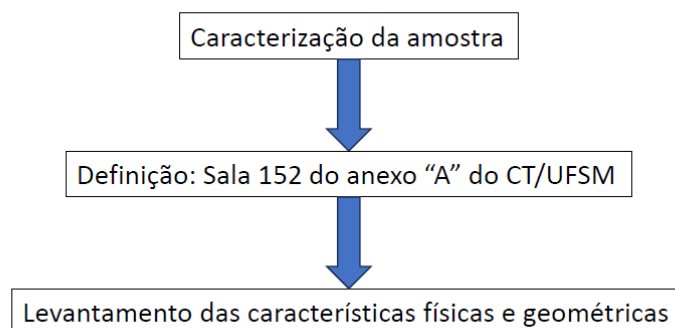
Naturalmente, a sala em consideração, após a execução do projeto de condicionamento proposto, deverá ser submetida a uma nova medição acústica, com as mesmas posições de fonte e microfones, de modo a confirmar a funcionalidade do projeto de con-

dicionamento. Todavia, esta etapa foge ao escopo deste trabalho de dissertação, pois depende da efetiva implementação, por parte da universidade, do referido projeto de condicionamento acústico da sala.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA

Nessa etapa foi definida a amostra e, então, levantadas todas as informações pertinentes para que se pudesse trabalhar na mesma, conforme a Figura 4.

Figura 4 – Sequência seguida após escolha da sala



Fonte: Autor (2023).

A sala de aula escolhida para as medições e projeto acústico foi a Sala 152, localizada no pavimento térreo do Anexo "A", do Centro de Tecnologia (CT) da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), campus Santa Maria, RS. As Figuras 5 e 6 ilustram a fachada e localização do prédio onde se encontra a respectiva sala de aula.

Figura 5 – Perspectiva da fachada principal do Centro de Tecnologia da UFSM



Fonte: Google, 2023.

Figura 6 – Imagem aérea do Centro de Tecnologia da UFSM



Fonte: Google maps, 2023.

A Sala 152 do CT possui 6,50 m de largura, 11,80 m de profundidade e um pé-direito de 3,34 m. No momento das medições acústicas as janelas e portas da sala foram fechadas e as cortinas das janelas recolhidas. A Figura 7 apresenta quatro diferentes imagens do interior da sala.

Figura 7 – Imagens da Sala 152, anexo “A” do CT/UFSM



Fonte: Autor (2023).

A Sala 152 possui piso em madeira do tipo parquet, as janelas são de estrutura em aço fechadas em vidro, protegidas por cortina de persiana vertical, portas em madeira, paredes em alvenaria de tijolos e teto em concreto, sendo este a laje de base para o segundo pavimento. Os itens presentes na sala de aula, além das mesas e cadeiras destinadas aos estudantes e professor(a), são dois equipamentos de ar condicionado do

tipo split, um projetor multimídia preso ao teto, dois ventiladores de teto e o quadro em PVC.

Após definido o objeto de estudo, é necessário o levantamento de algumas informações. Inicialmente, são definidas algumas propriedades geométricas, como dimensões de portas e janelas, altura de peitoril, pé-direito etc. Estas informações são fundamentais, pois o *software* REVIT (utilizado nesta pesquisa) permite que o desenho feito em duas dimensões, ou planta baixa seja visualizado posteriormente em três dimensões. Isso facilita a visualização e entendimento do espaço.

A utilização do REVIT foi necessária para chegar no tipo de arquivo lido pelo *software* de simulação de acústica de salas RAIOS 7, que importa arquivos com extensão .dxf. Após o desenho no REVIT, foi feita a importação para o *software* AutoCad, onde foram construídas *polylines*. Uma *polyline* é uma poligonal plana, fechada, sem emendas, que é construída para que no *software* RAIOS 7, sejam aplicadas as devidas propriedades de cada material.

Após feita a inserção das *polylines* em todos os objetos do desenho, ainda no *software* AutoCad, salva-se o arquivo no formato .dxf e este então poderá ser importado e lido pelo *software* RAIOS 7.

3.2 SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

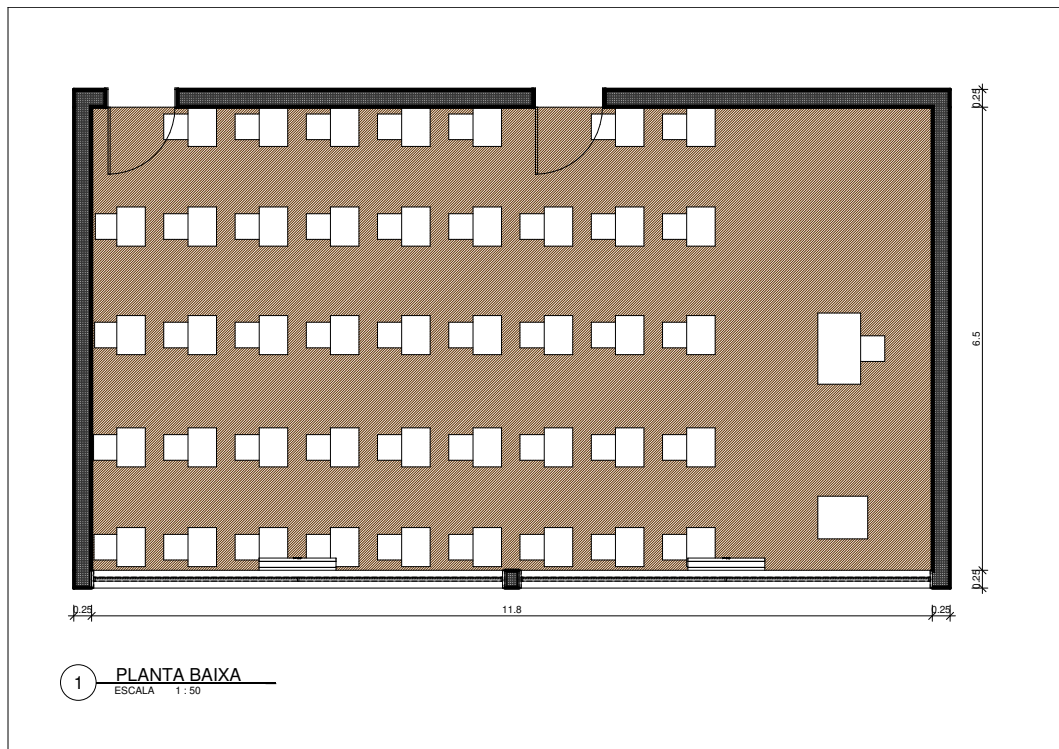
Com a utilização de vários *software*, é possível analisarmos todos os dados envolvidos, antes de qualquer intervenção. Por exemplo, antes de executarmos uma obra de um projeto arquitetônico residencial, levamos em consideração vários fatores como: circulação, ventilação, orientação solar; tudo isso antes da obra. Com isso, utilizamos as ferramentas computacionais disponíveis, para sabermos se determinada proposta contribuirá ou não no problema encontrado ou evitando um problema futuro. Dessa maneira, para tal estudo, utilizou-se os *software* REVIT, AutoCad e RAIOS 7.

No REVIT, foi desenhada a planta baixa e com esta, foi obtido o desenho tridimensional da sala objeto do estudo. Ainda nesse *software* foram inseridos os assentos das cadeiras, tampos das mesas, quadro, barramento de proteção das paredes, janelas, portas, piso e alvenarias. Após essa etapa, foi gerado um arquivo com extensão .dwg, o qual é lido pelo AutoCad, onde foram inseridas as *polylines* necessárias para a próxima etapa, que é o *software* RAIOS 7. O RAIOS 7 lê arquivos do tipo .dxf, que é gerado pelo AutoCad e efetua a simulação acústica da sala. O REVIT também gera arquivo com extensão do tipo .dxf, porém as *polylines* necessárias usadas no RAIOS 7, são feitas no AutoCad.

3.2.1 Modelagem no *software* REVIT

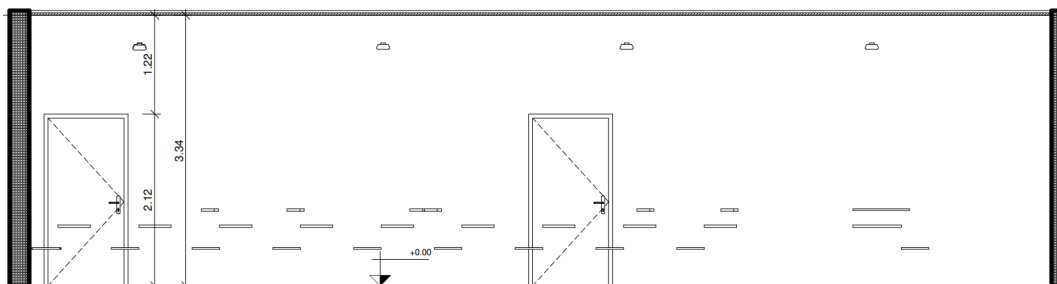
A sala de aula 152 é apresentada em planta baixa na Figura 8, produzida no *software* REVIT, contendo apenas o mobiliário existente, mesas e cadeiras. A Figura 9 exibe um corte longitudinal da sala.

Figura 8 – Planta baixa da Sala 152



Fonte: Autor, 2023.

Figura 9 – Corte longitudinal da Sala 152



Fonte: Autor, 2023.

Na Figura 10 é possível observar uma imagem tridimensional da sala. Esta imagem foi obtida com a utilização do *software* REVIT. Ela foi elaborada para que fosse possível uma melhor visualização e entendimento do espaço, se realmente havia conformidade

entre o espaço existente e o modelado. A Figura 11 é uma foto da sala, podendo-se comparar o real e o desenhado.

Figura 10 – Perspectiva interna da sala desenvolvida no REVIT



Fonte: Autor, 2023.

Figura 11 – Perspectiva da sala de aula



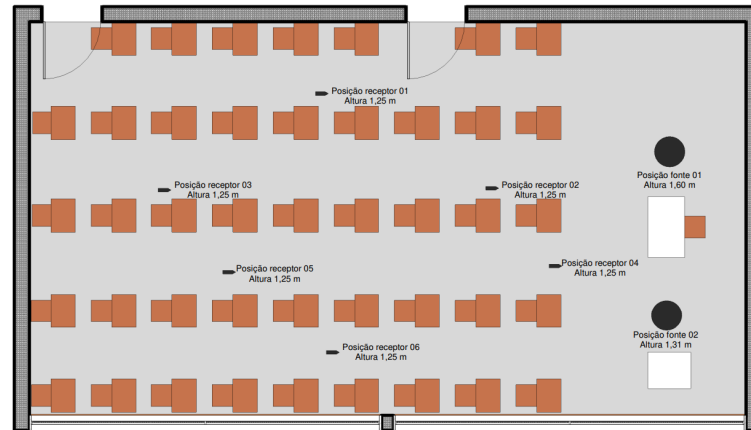
Fonte: Autor, 2023.

O *software* REVIT permite a inserção das cadeiras e mesas, tal qual elas são, devido às inúmeras possibilidades de desenho que esse *software* permite. Contudo, para

a simulação computacional no *software* RAIOS 7, esse detalhamento é desnecessário, incrementando significativamente o custo computacional. Dessa forma, a Figura 10 não apresenta as pernas das cadeiras e mesas, somente os tampos.

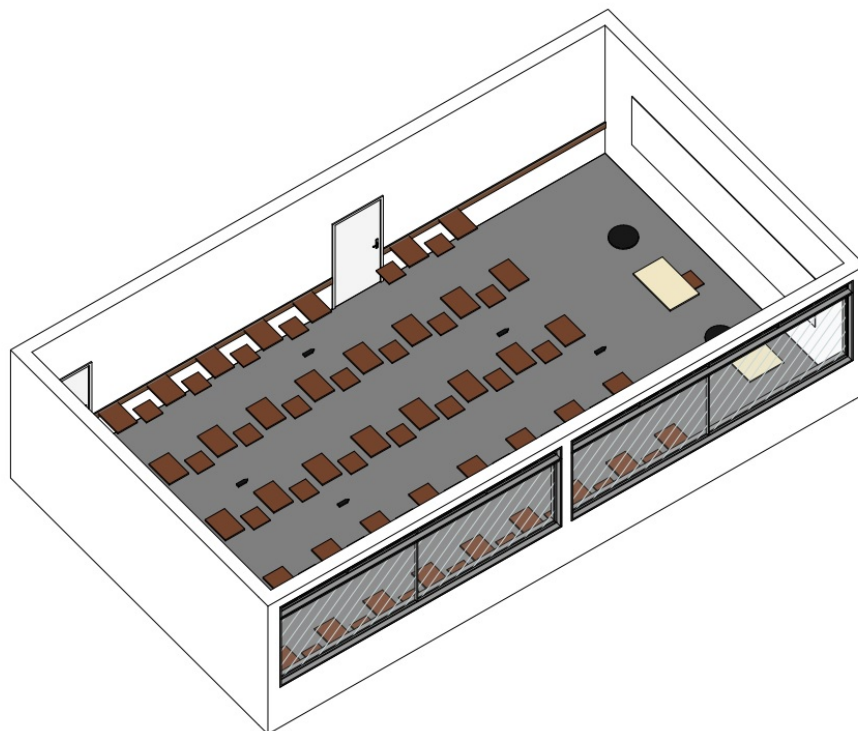
A Figura 12 ilustra a planta baixa da sala já com a indicação da posição das duas fontes e seis receptores, já a Figura 13 apresenta o modelo computacional 3D com os receptores e fontes, ambas geradas no *software* REVIT.

Figura 12 – Planta baixa da Sala 152



Fonte: Autor, 2023.

Figura 13 – Imagem tridimensional da Sala 152

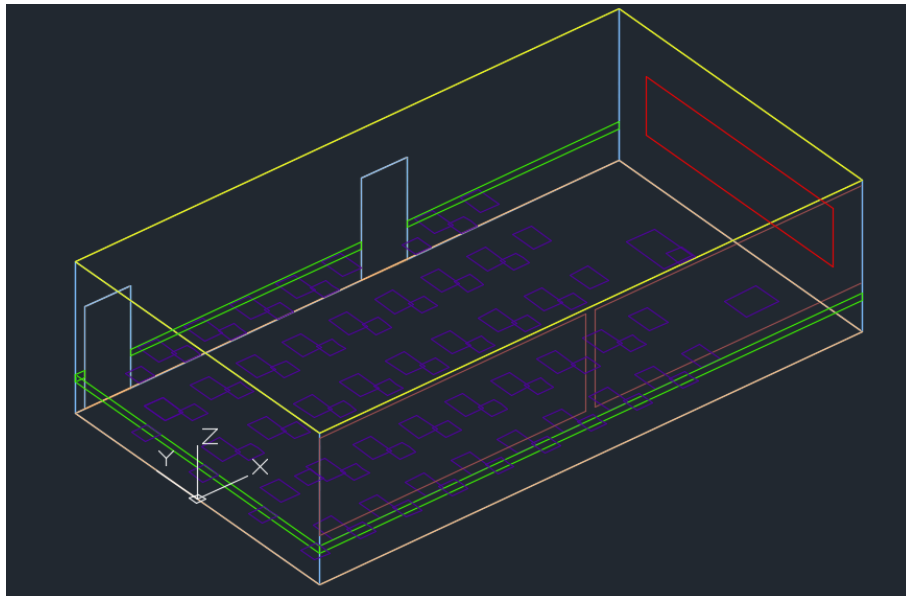


Fonte: Autor, 2023.

3.2.2 Modelagem AutoCad

Na Figura 14 é possível observar a sala de aula modelada no *software* AutoCad com os eixos coordenados. Nessa mesma figura é possível observar as diferentes *polylines* necessárias para então passar para a próxima etapa que é a criação de um arquivo de extensão *.dxf* e a indicação dos materiais acústicos que irão integrar a proposta. Para evitar que os diferentes materiais sejam confundidos nas etapas seguintes, cada *polyline* recebe uma cor diferente, sendo correspondente a um dado material.

Figura 14 – Imagem da sala de aula obtida no *software* AutoCad

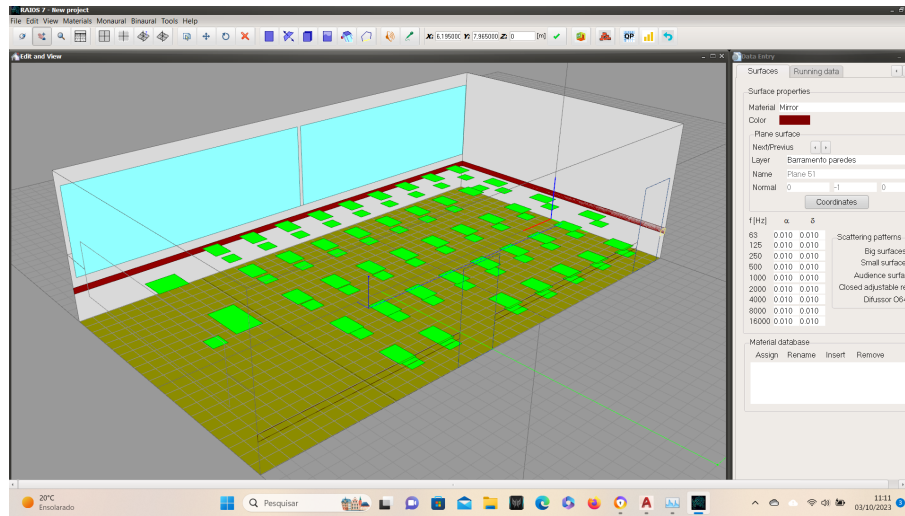


Fonte: Autor, 2023.

3.2.3 Modelagem no RAIOS 7

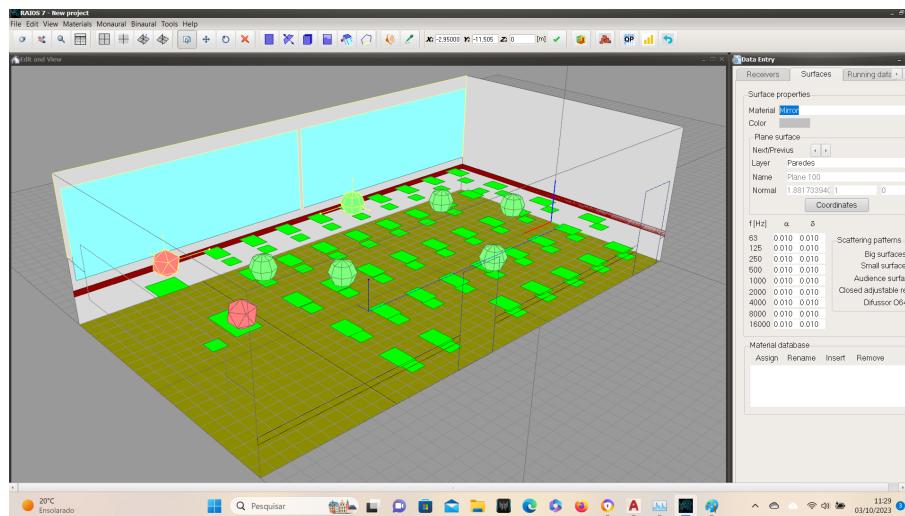
Na Figura 15 é apresentada uma imagem da sala tal como inserida no *software* RAIOS 7. Nessa imagem estão inseridos apenas os itens existentes na sala, como mesas, cadeiras e materiais como paredes, vidros e portas. As diferentes cores vistas em desenho, são os diferentes materiais, apresentando a sala ainda em sua configuração original. A Figura 16 mostra a sala, agora com as fontes sonoras (dodecaedros vermelhos) e os receptores (poliedros verdes) posicionados tal como na medição.

Figura 15 – Imagem da sala de aula visualizada no *software* RAIOS 7



Fonte: Autor, 2023.

Figura 16 – Idem Figura 15, com os microfones e fontes posicionados



Fonte: Autor, 2023.

3.3 MEDIÇÕES ACÚSTICAS

Para as medições, foram seguidas as normas técnicas aplicáveis (NBR 10151, 2019), (NBR 10152, 2017) e (NBR ISO 3382-2, 2017). Estas são relativas ao processo e todas as etapas seguidas de forma ordenada, com listagem de equipamentos a serem utilizados e procedimentos a seguir. Esse processo é necessário para evitar que resultados obtidos estejam em desacordo com as normas e que possam ser validados em seus posteriores resultados. Todos os equipamentos utilizados para tais medições, atendem às

exigências necessárias e suas respectivas utilizações foram executadas de acordo com as normas citadas.

Antes de iniciar as medições, é necessário aferir as condições climáticas do ambiente em que estamos trabalhando, sendo estas a temperatura, umidade relativa do ar e pressão atmosférica. Para obtermos temperatura e umidade utiliza-se um termohigrômetro. A pressão atmosférica foi consultada na data das medições e retirada de um *website* de meteorologia (WEATHERSPARK, 2023).

3.3.1 Instrumentação

Os equipamentos utilizados para as medições acústicas desta pesquisa são os descritos na Tabela 2 e ilustrados na Figura 17.

A fonte sonora utilizada para a obtenção da resposta impulsiva da sala é o dodecaedro, conforme visto na Figura 17a. Esse equipamento possui 12 auto-falantes que emitem o tipo de ruído/som configurado no sonômetro para excitação da sala em teste de forma onidirecional que, para este estudo, foi o ruído rosa.

O receptor utilizado nas medições, foi um transdutor, o mesmo da Figura 17b, também definido como microfone de campo livre, sem a espuma. Esse microfone é compatível com o sonômetro utilizado e da mesma marca, sendo ambos fabricados pela empresa Brüel & Kjaer (B&K). O microfone utilizado foi o de campo livre, sendo feita a correção no sonômetro para campo difuso.

Tabela 2 – Tabela de equipamentos utilizados nas medições

Equipamento	Modelo	Marca
Sonômetro	2270	Brüel & Kjaer
Transdutor	4189	Brüel & Kjaer
Amplificador de potência sonora	2716	Brüel & Kjaer
Fonte onidirecional	4292 L	Brüel & Kjaer
Cabo Speakon	-	-
Cabo USB	-	-
Notebook	Predator	Acer
Termohigrômetro	-	-
Tripés	-	-

Fonte: Autor (2023).

Figura 17 – Equipamentos utilizados nas medições



(a) Dodecaedro



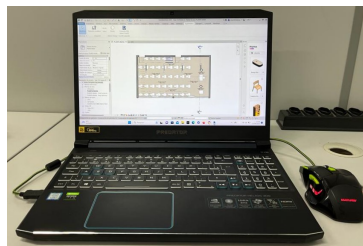
(b) Transdutor



(c) Sonômetro



(d) Amplificador



(e) Notebook



(f) Termohigrômetro

Fonte: Autor, 2023.

O sonômetro 2270, da B&K, apresentado na Figura 17c, possui dois canais, aprovado para o tipo classe 1. Os dois canais são independentes. Isso possibilita que sejam utilizados dois microfones simultaneamente. Por exemplo, em uma medição, é possível que seja medido o ambiente interno e externo ao mesmo tempo. Porém para este estudo foi utilizado apenas um microfone, ou seja, um canal.

O equipamento permite a configuração de *templates* que ficam salvos em sua memória, auxiliando assim em casos de novas medições que utilizem a mesma configuração.

O sonômetro emite o ruído rosa e o mesmo necessita ser amplificado para que o dodecaedro emita o ruído. Então, para tal fim, utilizou-se o amplificador, Figura 17d, também da marca B&K, modelo 2716.

O equipamento utilizado para rodar os *software* e analisar os dados obtidos, foi um Notebook Predator Helios 300, de propriedade do autor, apresentado na Figura 17e. Esse equipamento foi utilizado em todos os procedimentos, desde o processamento dos

resultados das medições, até a geração da proposta.

Para a aferição da temperatura e umidade relativa do ar na data das medições, foi utilizado o termohigrômetro, apresentado na Figura 17f.

3.3.2 Medição de ruído residual

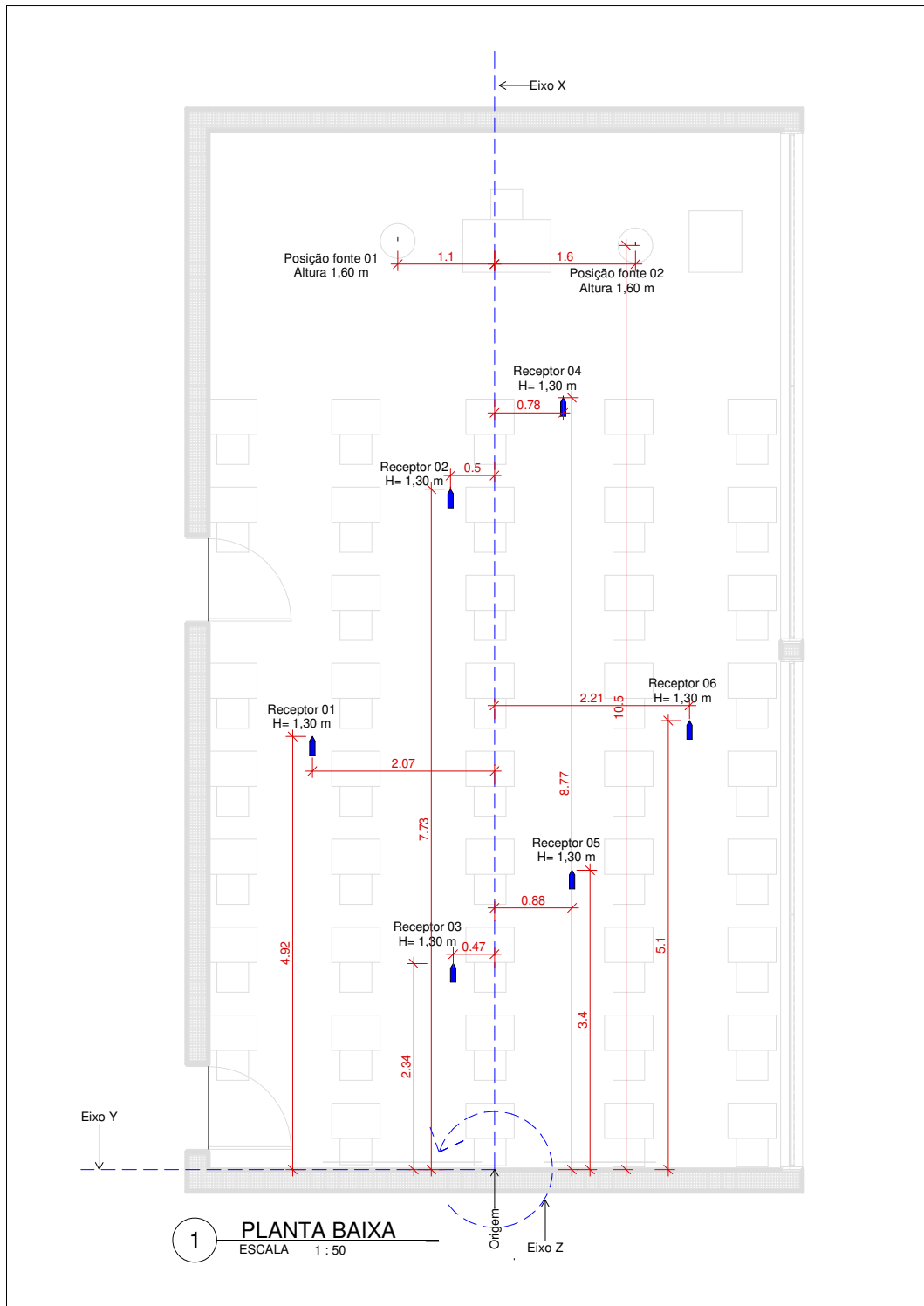
Primeiramente deve-se conferir a data da calibração do equipamento, que possui prazo de validade de até 24 meses, dependendo da utilização. É necessário medir o ruído residual para identificar o nível de pressão sonora global no ambiente para identificação de sons contínuos ou intermitentes. É recomendado apagar as lâmpadas para evitar o ruído gerado na frequência de 60 Hz. Após isso, inicia-se a gravação. Na sequência, repete-se a medição para as demais posições de microfone. Conforme a norma NBR ISO 3382-2 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2017), para o método de engenharia são utilizadas seis combinações entre fonte e receptor, sendo dois pontos para fonte sonora e três posições de microfone (receptor). Contudo, foram utilizados seis posições de receptor para cada fonte, para ter uma melhor visualização da heterogeneidade do campo sonoro. São em número de três os decaimentos utilizados para o método do ruído interrompido.

Foi medido o nível de pressão sonora contínua equivalente ponderada em A, e integrada em um intervalo de tempo T , $L_{Aeq,T}$, bem como o nível de pressão sonora contínua linear, integrado em um intervalo de tempo T , $L_{eq,T}$.

Para obtenção dos níveis equivalentes, é necessário selecionar o *template* do sonômetro “Análise em frequência” e gravar por um minuto. O Apêndice A apresenta a configuração utilizada no *template* para as medições. Assim, tem-se seu espectro e seu nível global. O sonômetro fornece os níveis globais de pressão com ponderação A e Z (linear), no intervalo de tempo T igual a um minuto.

Na Figura 18 é possível ver a posição exata de cada fonte e receptor em que foram feitas as medições. Nessa imagem é possível observar que as coordenadas cartesianas (X, Y, Z) têm sua origem no meio do fundo da sala.

Figura 18 – Planta baixa com equipamentos posicionados na Sala 152 (dimensões em metros)



Como sinal de excitação, foi emitido um ruído rosa na Fonte 01 e medido em seis pontos de receptores, posteriormente emitido o mesmo ruído na Fonte 02 e também medido nos seis pontos de recepção. As medições foram realizadas no dia 13 de maio de 2023, e foi aferida a temperatura de 17,6 °C e umidade relativa do ar 62%, às 10h40min.

Também são apresentadas, nas Tabelas 3 e 4, as posições de cada da fonte e receptor, respectivamente.

Tabela 3 – Posições de fontes na Sala 152

Fonte	Eixo X	Eixo Y	Eixo Z
01	10,55 m	1,1 m	1,6 m
02	10,5 m	-1,6 m	1,6 m

Fonte: Autor, 2023.

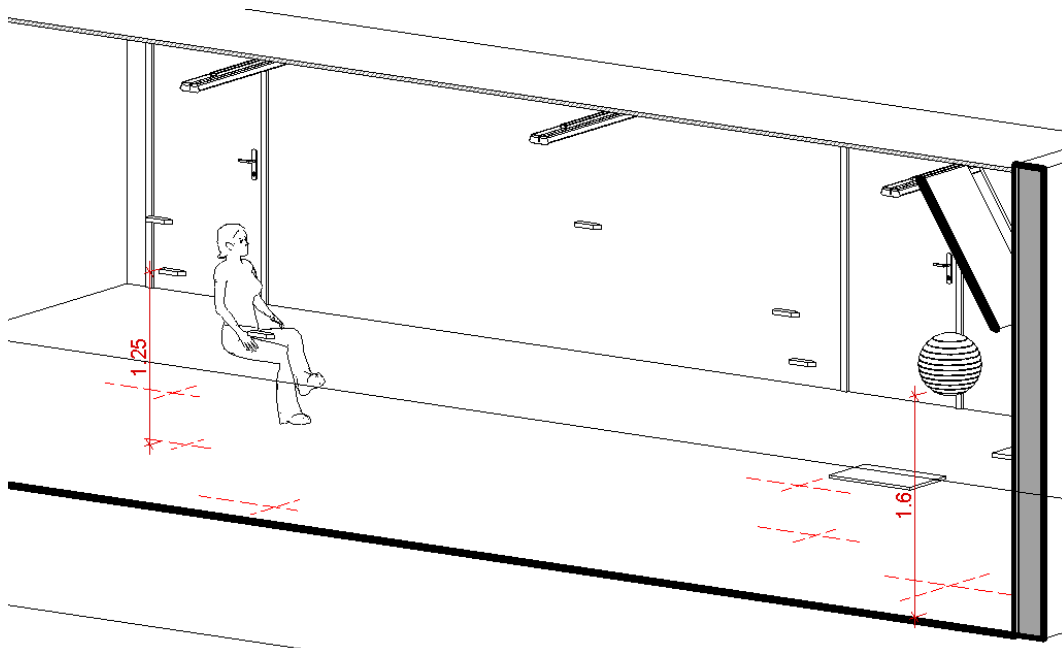
Tabela 4 – Posições de receptores na Sala 152

Receptor	01	02	03	04	05	06
Eixo X	4,92 m	7,73 m	2,34 m	8,77 m	3,4 m	5,1 m
Eixo Y	2,07 m	0,5 m	0,47 m	-0,78 m	-0,88 m	-2,21 m
Eixo Z	1,25 m	1,25 m	1,25 m	1,25 m	1,25 m	1,25 m

Fonte: Autor, 2023.

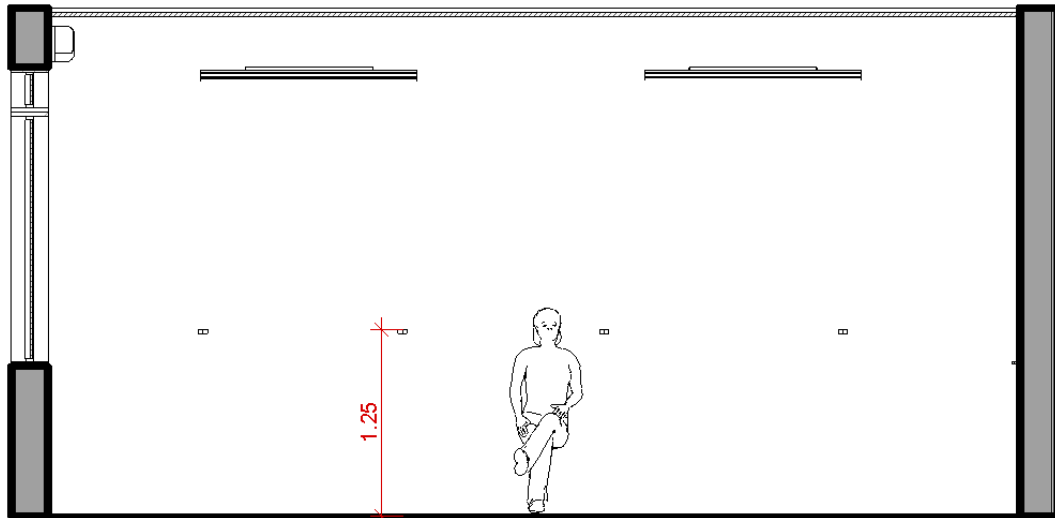
As Figuras 19 e 20 mostram a altura dos receptores e das fontes.

Figura 19 – Perspectiva da sala com a altura dos receptores e fontes (dimensões em metros)



Fonte: Autor, 2023.

Figura 20 – Corte da Sala 152 para visualização da altura do ouvinte (dimensões em metros)



Fonte: Autor, 2023.

3.3.3 Resposta Impulsiva e curva de decaimento

Segundo Brandão (2016) o primeiro parâmetro objetivo definido foi o tempo de reverberação (TR), estabelecido por W. C. Sabine. Ele mede o tempo necessário para que a energia decorrente da excitação do ambiente, decaia 60 dB. A norma NBR ISO 3382-2 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2017) indica quais os procedimentos para o cálculo de alguns parâmetros objetivos, como T_{60} entre outros. Ela também especifica quais equipamentos e procedimentos para se fazer tal medição. A partir do momento em que cessa a fonte sonora, ocorre o decaimento, e é aí que são aplicadas as fórmulas de T_{20} e T_{30} , apresentadas na Subseção 2.1.1 do Capítulo 2.

3.3.4 Método do ruído interrompido

Para a medição de parâmetros acústicos objetivos, temos a alternativa do método do ruído interrompido. Este método consiste em gerar um sinal de espectro plano que é enviado para a fonte (neste estudo foi utilizado o ruído rosa). A fonte emite esse ruído por alguns segundos, até que a sala entre em regime estacionário e, em seguida, o sinal é interrompido. Quando cessamos a fonte, grava-se o decaimento da pressão sonora.

O ruído rosa é um ruído de banda larga, aleatório, que decai 3 dB por oitava. O nome ruído rosa é decorrente de uma associação com a luz dessa cor, que emite mais energia na região da cor vermelha do espectro.

Segundo recomenda a norma NBR 10151 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2019) após o término das medições, é necessário proceder novo ajuste do microfone, lembrando que este não pode ter valor diferente do indicado, sendo tolerado até $\pm 0,5$ dB, do valor ajustado inicialmente. Estando tudo em conformidade, os dados são extraídos e passados para o computador e, então, analisados.

3.4 AJUSTE DOS COEFICIENTES

É bem conhecido o fato de a incerteza na medição de coeficientes de absorção em câmara reverberante constituir um grande desafio para os programas de simulação em acústica de salas, onde esses coeficientes desempenham um importante papel nos dados de entrada das simulações (VÖRLANDER, 2013). Portanto, toda simulação acústica de salas sobre uma sala existente esbarrará inevitavelmente na incerteza relativa aos coeficientes de absorção dos materiais de que a sala é constituída, principalmente se a construção for antiga, o que obrigatoriamente alterará, pelo uso, os coeficientes estabelecidos em tabelas de materiais construtivos.

Como citado anteriormente, alguns materiais tiveram seus coeficientes ajustados devido a fatores como desgaste, exposição ou alguma outra ação do tempo ou uso. Um exemplo disso é o piso em parquet da sala, que sofreu desgaste acentuado. Sendo assim, seus coeficientes de absorção e espalhamento, foram alterados.

Usualmente quando têm-se salas complexas, a maneira mais eficaz de otimizar os valores dos coeficientes de absorção é a adoção de um modelo de otimização. No nosso caso, por tratar-se de uma sala bastante simples geometricamente, essa otimização foi efetuada por meio de tentativa e erro. A sala é simulada com os coeficientes encontrados em tabelas de amplo conhecimento com os materiais mais próximos possível daqueles encontrados na sala real. A partir daí, comparam-se os valores dos tempos de reverberação (T_{20}) medidos e simulados. Busca-se então, modificar os coeficientes — principalmente aqueles em que há maior incerteza — de modo a executar nova simulação com os coeficientes modificados. Desse modo, vai-se convergindo o T_{20} simulado para o T_{20} medido.

A Figura 21 apresenta uma tabela com os valores dos coeficientes de absorção (α) e espalhamento (δ) adotados na simulação após o ajuste.

Figura 21 – Imagem da lista de materiais utilizados e seus coeficientes

Janelas	glass	α	0,160	0,140	0,120	0,120	0,120	0,140	0,140	0,140	0,140	
		δ	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010
Portas	portas	α	0,300	0,300	0,200	0,150	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	
		δ	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	
Tampo mesas	plywood c	α	0,110	0,110	0,110	0,120	0,120	0,100	0,100	0,100	0,100	
		δ	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	
Quadro negri	pvc r	α	0,100	0,150	0,150	0,150	0,200	0,400	0,350	0,350	0,350	
		δ	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	
Barramento pai	mogno	α	0,190	0,190	0,230	0,250	0,300	0,370	0,420	0,420	0,420	
		δ	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	
Paredes	alvenaria pared	α	0,050	0,050	0,040	0,020	0,040	0,050	0,050	0,050	0,050	
		δ	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	
Piso	parquet 0,3	α	0,200	0,200	0,150	0,500	0,500	0,500	0,500	0,150	0,200	
		δ	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	
Laje	smooth concre	α	0,010	0,010	0,010	0,010	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	
		δ	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	

Fonte: Adaptada do software RAIOS 7, 2023.

Quanto aos coeficientes de espalhamento (δ), há pouquíssima informação na literatura, principalmente em relação a materiais usuais de construção civil. Por essa razão, foi adotado o valor $\delta = 0,010$ para todas as superfícies, como sugere o *benchmark for room acoustical simulation* (BRINKMANN et al., 2021).

4 PROPOSTA DE CONDICIONAMENTO ACÚSTICO DA SALA

Com as medições realizadas, foi possível observar a necessidade real de uma redução do tempo de reverberação (TR) da sala. Em todas bandas de 1/1 oitava entre 250 Hz e 4 kHz, o TR medido ficou acima do que é considerado ideal. Muitos dos resultados dos receptores apresentaram TR acima dos 1,5 s, mostrando a necessidade de condicionamento acústico.

Segundo Long (2014): “*As a general rule reverberation times should be less than 0.8 seconds for good intelligibility*” (como regra geral, tempos de reverberação devem ser inferiores a 0,8 segundos para uma boa inteligibilidade).

Neste capítulo é apresentado um projeto de condicionamento acústico da Sala 152 do CT, constando, basicamente, da introdução de materiais absorventes, visando reduzir o TR da sala de aula. Nesta dissertação, que parte do pressuposto do acordo estabelecido entre a empresa Acústica Jr., do Curso de Engenharia Acústica da UFSM, e uma empresa fabricante de material acústico (Trisoft), todo o projeto de condicionamento acústico foi pensado utilizando-se os materiais desse fabricante.

4.1 BAFFLES

Baffles são dispositivos projetados para controlar o fluxo sonoro e otimizar a qualidade do som em ambientes. Eles são painéis ou estruturas colocadas em paredes e tetos para reduzir a propagação de ondas sonoras indesejadas. Os *baffles* ajudam a direcionar e dispersar o som de maneira mais uniforme, aumentando a clareza sonora em salas de concertos, estúdios de gravação, salas de cinema e outras instalações.

Os *baffles* são, essencialmente, absorvedores sonoros, utilizados para atenuar as reflexões. Este material é fixado na laje ou teto do ambiente através de um parafuso e um fio de aço bastante fino e com regulagem de comprimento, para que a altura seja ajustada.

Os *baffles* desenvolvidos pela empresa Trisoft, por exemplo, são desenvolvidos em lã de pet. Portanto, são materiais reciclados e leves, o que não acarreta uma carga considerável na estrutura onde são fixados. A Figura 22 ilustra um exemplo de tamanho, cor e modelo.

Figura 22 – *Baffles* instalados em uma sala de reuniões



Fonte: <https://trisoft.com.br/baffles-trisoft>.

4.2 PAINÉIS ACÚSTICOS

Os painéis acústicos denominados pelo fabricante Trisoft como *revest ness chanfrado* (RNC), assim como os *baffles*, têm a função absorvedora. Esses painéis são colados diretamente na superfície. Podem ser dispostos em diferentes posições ou formando uma grande peça, tudo de acordo com a necessidade.

Na Figura 23 é possível observar em um ambiente pronto, como podem ser utilizados os absorvedores RNC. Eles possibilitam criar diferentes configurações *layout* nos locais em que sejam inseridos. Seu nome se dá, devido ao fato de serem revestimentos, que podem ser usados em tetos e paredes por exemplo, e possuem suas bordas chanfradas, no caso das utilizadas na proposta de projeto.

Os materiais desenvolvidos pela empresa, são atóxicos, não proliferam fungos, não causam coceira, não utilizam água em seu processo de elaboração e são auto-extinguíveis, ou seja, não propagam as chamas (TRISOFT, 2023).

Figura 23 – Revest ness instalados em sala de apresentações artísticas



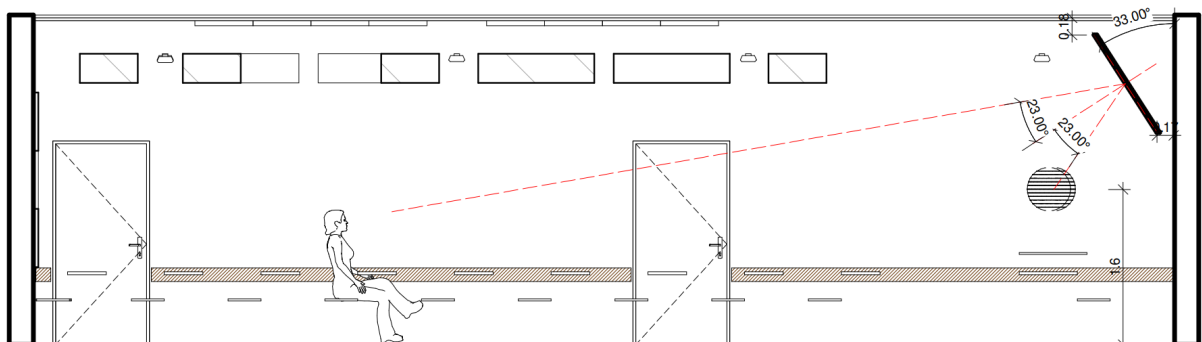
Fonte: <https://trisoft.com.br/revest-trisoft>.

4.3 REFLETORES

Como anteriormente mencionado, a proposta visa o condicionamento acústico da sala, e isso envolve, além do conforto ambiental, o entendimento da informação que está sendo passada aos ouvintes.

Com isso, foram utilizados painéis refletores, para projetar o som para os alunos que estejam na região posterior da sala. Os painéis utilizados na proposta possuem 1,20 m de altura e 1,20 m de largura, com espessura de 1,8 cm, feitos em MDF. A angulação destes, foi aplicada levando em consideração a reflexão especular dos raios sonoros, pois a superfície do MDF é lisa e refletora. Na Figura 24, é possível observar a angulação dos painéis em relação à parede e onde os raios refletidos atingem.

Figura 24 – Imagem da sala em corte, mostrando a angulação dos refletores



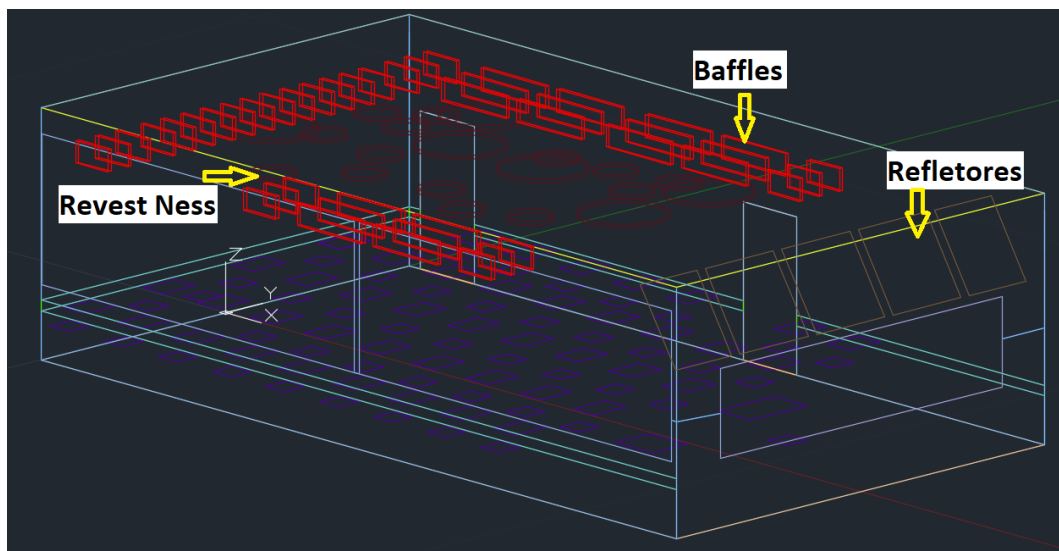
Fonte: Autor, 2023.

4.4 PROPOSTA DE CONDICIONAMENTO ACÚSTICO

A proposta de condicionamento acústico da sala objeto do estudo levou em consideração outro ponto importante, que é o de segurança dos ocupantes, por isso os materiais escolhidos não propagam chamas e são antialérgicos. As janelas não foram obstruídas com nenhum tipo de isolamento, mantendo assim a ventilação e iluminação natural existente e nenhuma das portas foram obstruídas ou sofreram alteração. Basicamente o projeto visa melhorar o conforto acústico sem causar grande impacto na edificação e que seja exequível e de baixo custo. A definição da posição dos materiais acústicos foi feita de modo a não interferir na visão de alunos e professor, nem alterar substancialmente a sala. Também levou em consideração a seleção de cores naturais, de modo a evitar a distração e o stress visual.

Após a identificação do principal problema da sala de aula, a saber, os altos valores do TR em todas as bandas de 1/1 oitava, foram propostas a inserção de alguns materiais absorventes, tais como: RNC no teto e parede do fundo da sala, *baffles* no teto, em disposição mostrada na Figura 25; e refletores de MDF logo acima do quadro, também vistos na Figura 25.

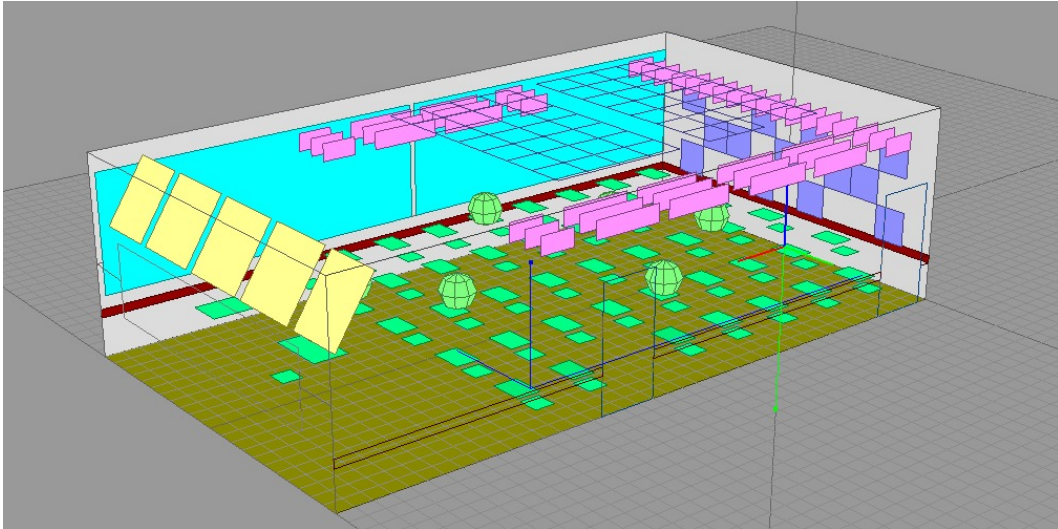
Figura 25 – Imagem da sala de aula obtida através do *software* AutoCad



Fonte: Autor, 2023.

Os coeficientes de absorção dos materiais são os fornecidos pelos fabricantes e adicionados ao conjunto de materiais já constantes da sala original. A Figura 26 apresenta a sala com o projeto de condicionamento acústico inserida no *software* RAIOS 7.

Figura 26 – Imagem da sala de aula gerada no RAIOS 7 já com a proposta de modificação



Fonte: Autor, 2023.

Na Figura 26 é possível observar diferentes cores, isso se deve ao fato de que, cada cor representa um material e cada material possui um diferente coeficiente de absorção.

5 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados, em forma de gráficos, os resultados obtidos para T_{20} e EDT com as medições e posteriormente das medições *versus* simulações, sendo as simulações sem tratamento. a sequência, são apresentados os gráficos da simulação sem tratamento *versus* com tratamento acústico.

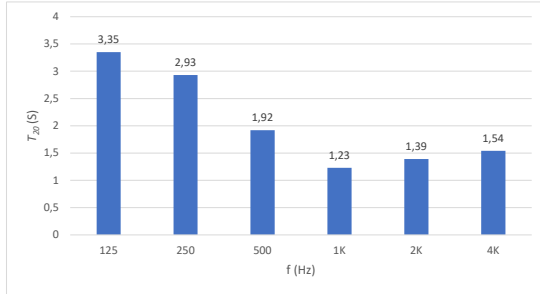
Foi possível, ainda, a análise de outro parâmetro, avaliado a partir do *software* RAIOS 7, que fornece os valores para a definição (D_{50}). Dessa forma, foi possível também comparar os dados simulados desse parâmetro sem tratamento e com tratamento acústico, também apresentados gráficos comparativos.

5.1 RESULTADOS DAS MEDIÇÕES

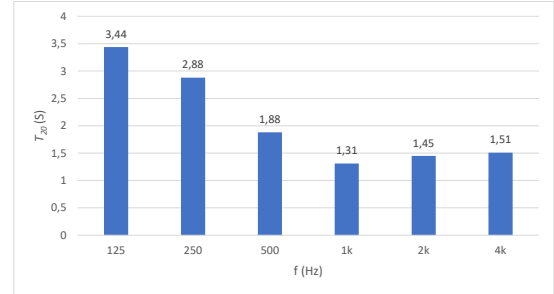
Na Figura 27 são apresentados, em gráficos de barras, os resultados das medições dos seis microfones (receptores) com a Sala 152 excitada pela Fonte 01. Já na Figura 28, são apresentados os resultados das medições para os seis microfones para a Fonte 02.

Nas Figuras 29 e 30 são apresentados os tempos de decaimento inicial (EDT), respectivamente para as Fontes 01 e 02, para todos os seis receptores. É possível observar nos gráficos apresentados que os valores de EDT também são altos, para todas as bandas de frequência.

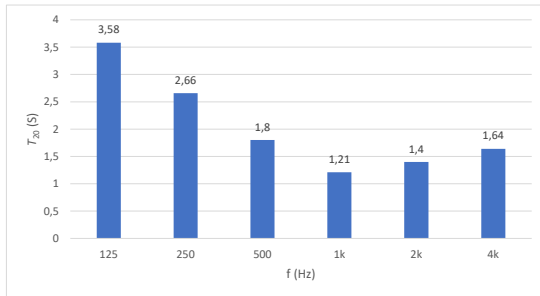
Figura 27 – Resultados medidos de T_{20} para a Fonte 01 e Receptores 01 a 06, em 1/1 oitava, de 125 Hz a 4 kHz



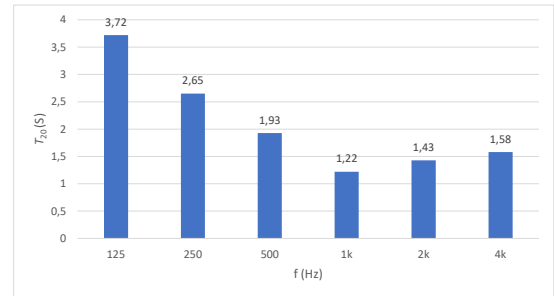
(a) Receptor 01



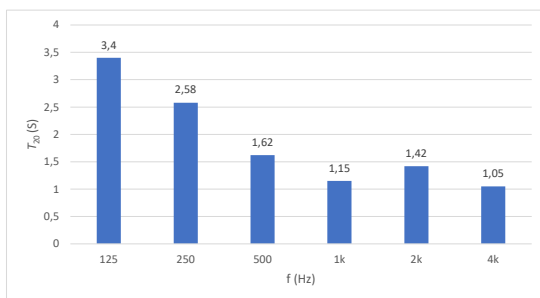
(b) Receptor 02



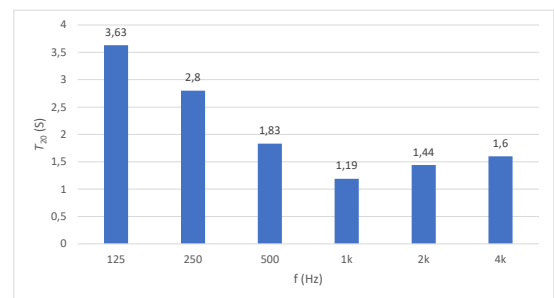
(c) Receptor 03



(d) Receptor 04



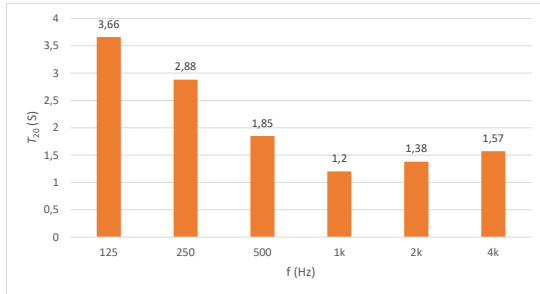
(e) Receptor 05



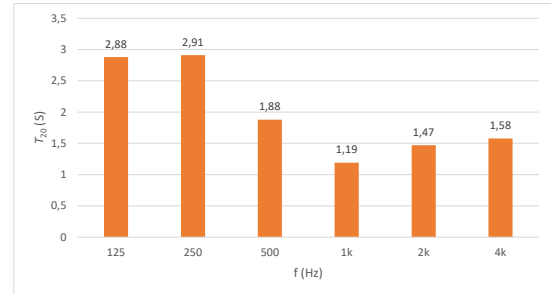
(f) Receptor 06

Fonte: Autor, 2023.

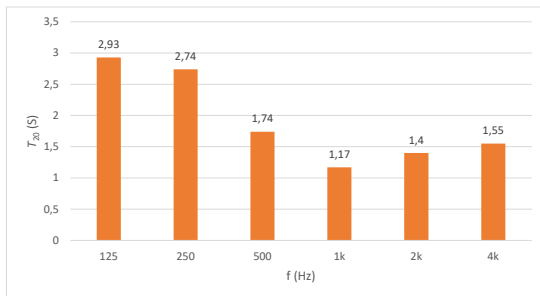
Figura 28 – Resultados medidos de T_{20} para a Fonte 02 e Receptores 01 a 06, em 1/1 oitava, de 125 Hz a 4 kHz



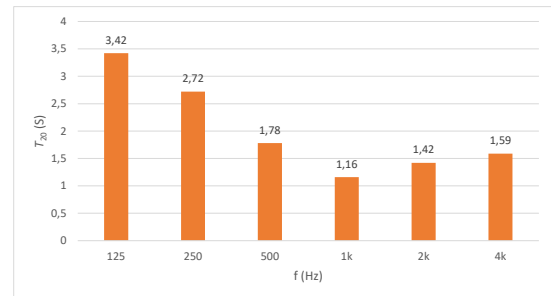
(a) Receptor 01



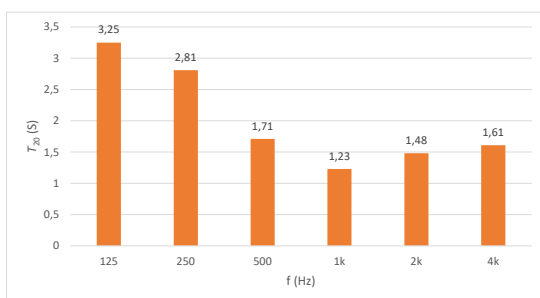
(b) Receptor 02



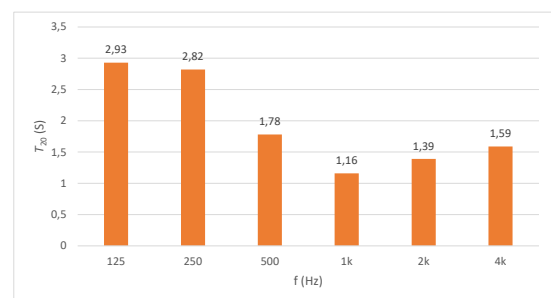
(c) Receptor 03



(d) Receptor 04



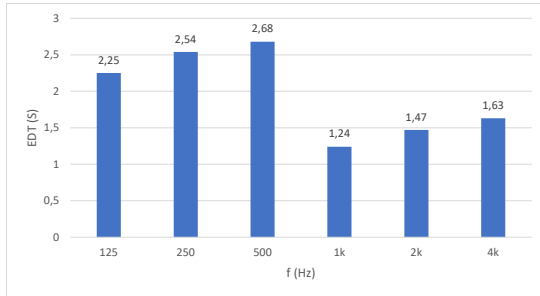
(e) Receptor 05



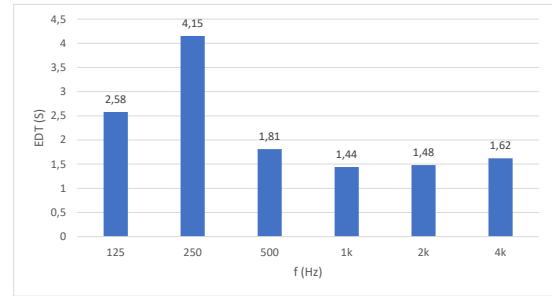
(f) Receptor 06

Fonte: Autor, 2023.

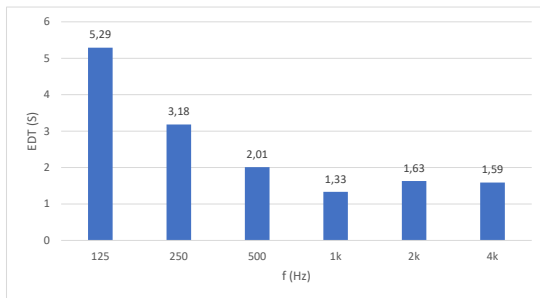
Figura 29 – Resultados medidos para EDT para a Fonte 01 e Receptores 01 a 06, em 1/1 oitava, de 125 Hz a 4 kHz



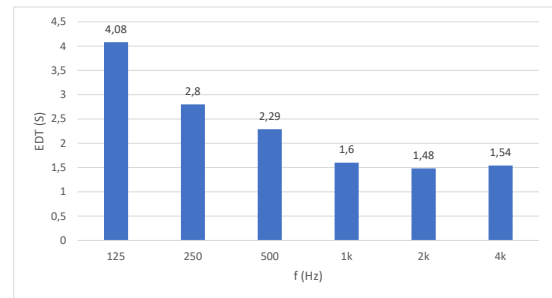
(a) Receptor 01



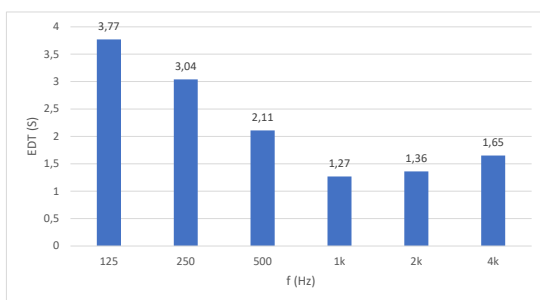
(b) Receptor 02



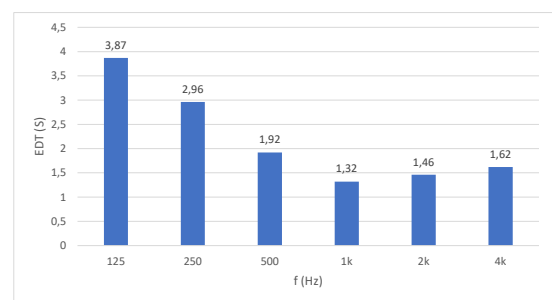
(c) Receptor 03



(d) Receptor 04



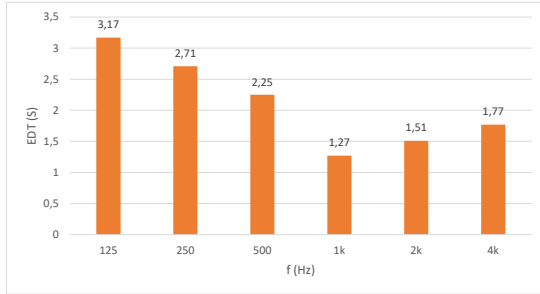
(e) Receptor 05



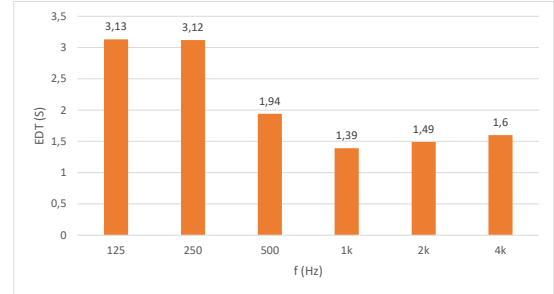
(f) Receptor 06

Fonte: Autor, 2023.

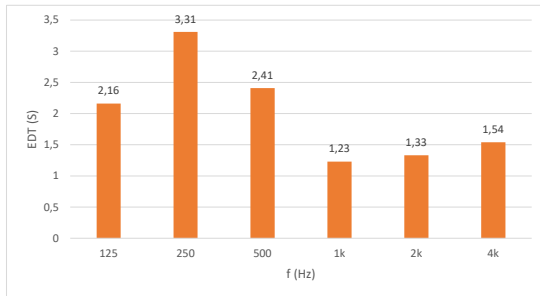
Figura 30 – Resultados medidos para EDT para a Fonte 02 e Receptores 01 a 06, em 1/1 oitava, de 125 Hz a 4 kHz



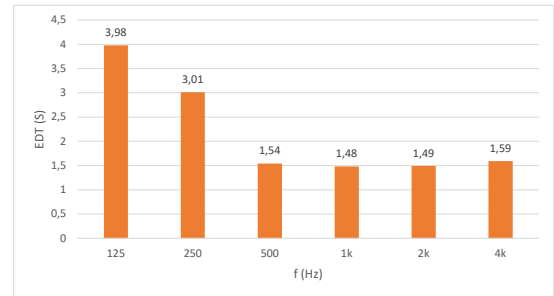
(a) Receptor 01



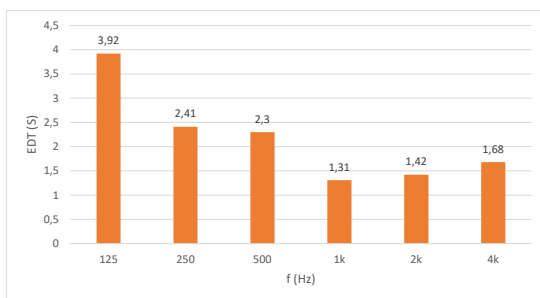
(b) Receptor 02



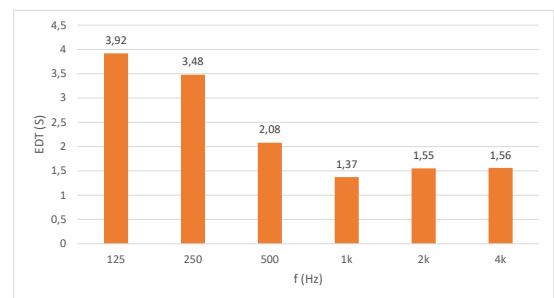
(c) Receptor 03



(d) Receptor 04



(e) Receptor 05



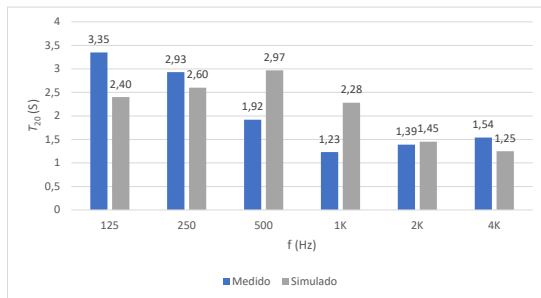
(f) Receptor 06

Fonte: Autor, 2023.

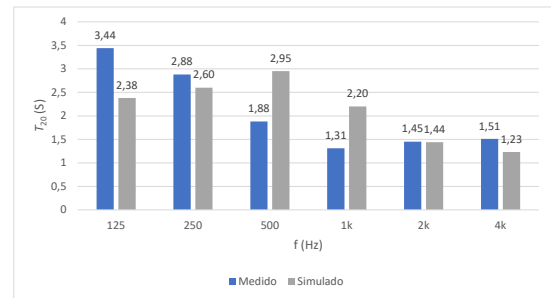
5.2 MEDIÇÕES VS. SIMULAÇÕES

Nesta seção, são apresentados os gráficos comparativos dos resultados das medições *versus* simulações acústicas. As Figuras 31 e 32 apresentam a comparação dos resultados para T_{20} medido \times simulado, para as duas fontes e os seis receptores.

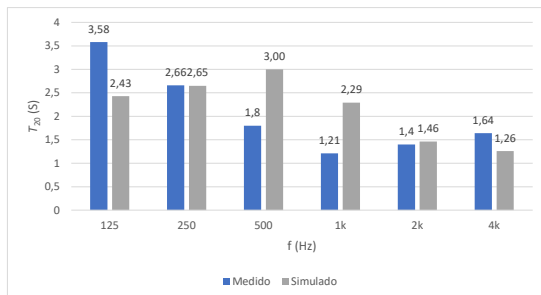
Figura 31 – T_{20} medido \times simulado para a Fonte 01 e Receptores 01 a 06, em 1/1 oitava, de 125 Hz a 4 kHz



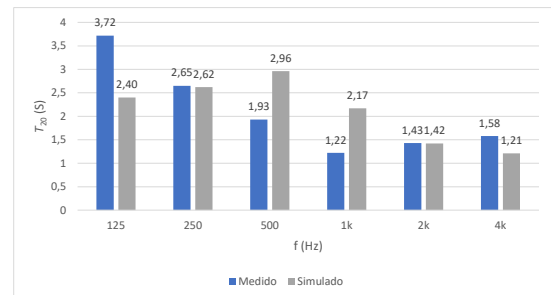
(a) Receptor 01



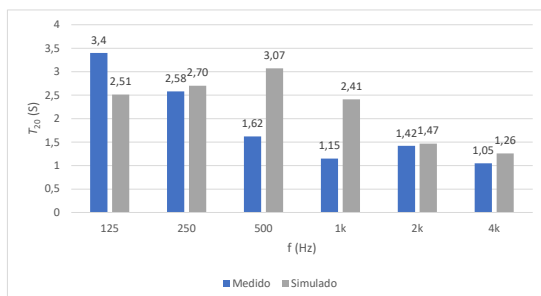
(b) Receptor 02



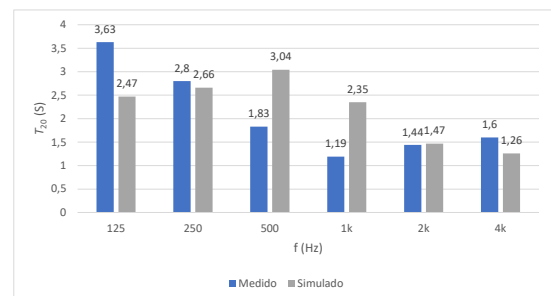
(c) Receptor 03



(d) Receptor 04

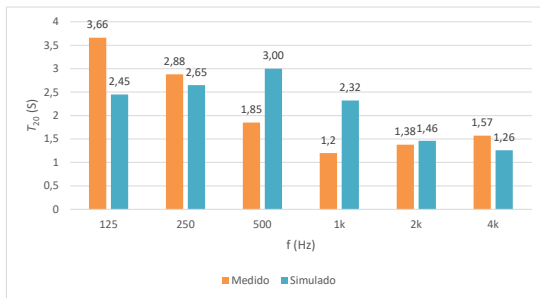


(e) Receptor 05

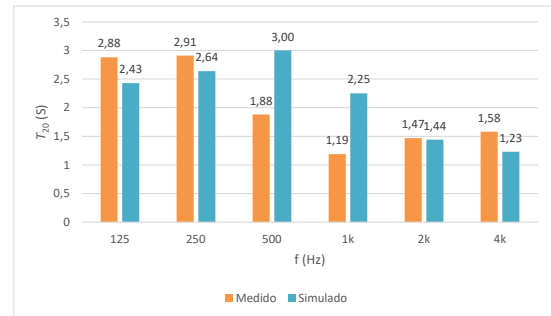


(f) Receptor 06

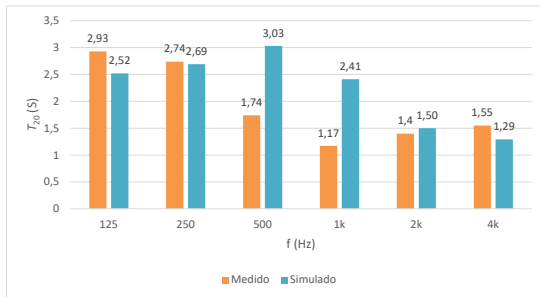
Figura 32 – T_{20} medido \times simulado para a Fonte 02 e Receptores 01 a 06, em 1/1 oitava, de 125 Hz a 4 kHz



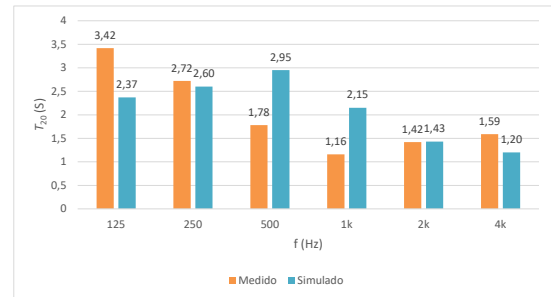
(a) Receptor 01



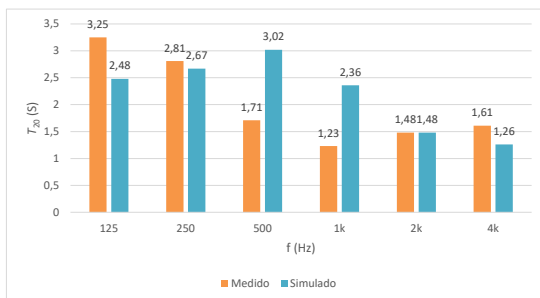
(b) Receptor 02



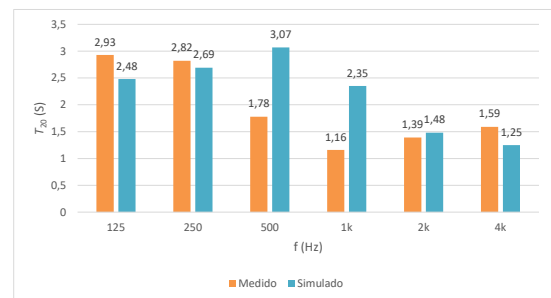
(c) Receptor 03



(d) Receptor 04



(e) Receptor 05

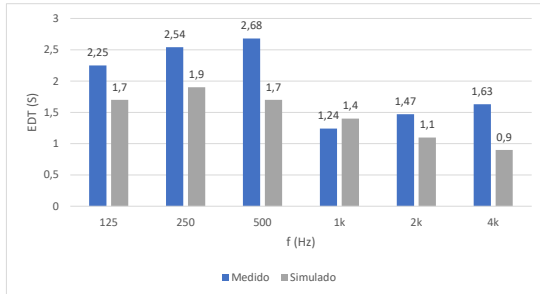


(f) Receptor 06

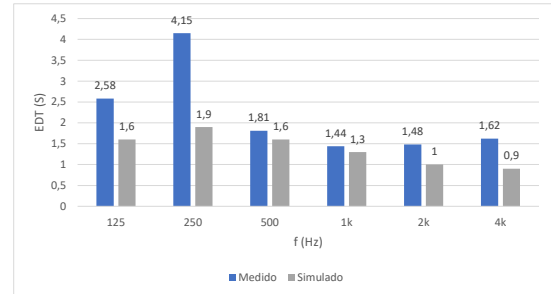
Fonte: Autor, 2023.

As Figuras 33 e 34 mostram os resultados comparativos do parâmetro EDT medido *versus* simulado, para a Fonte 01 e Fonte 02, respectivamente.

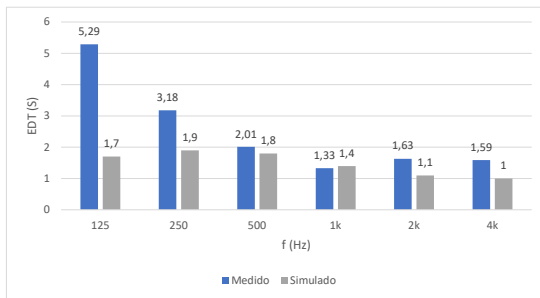
Figura 33 – EDT medido \times simulado para a Fonte 01 e Receptores 01 a 06, em 1/1 oitava, de 125 Hz a 4 kHz



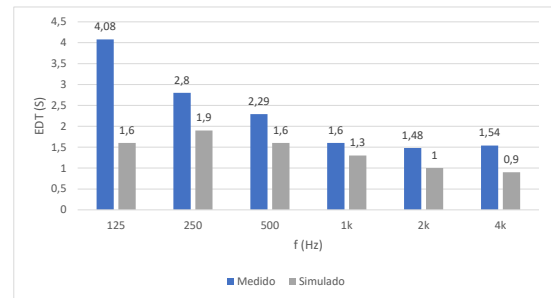
(a) Receptor 01



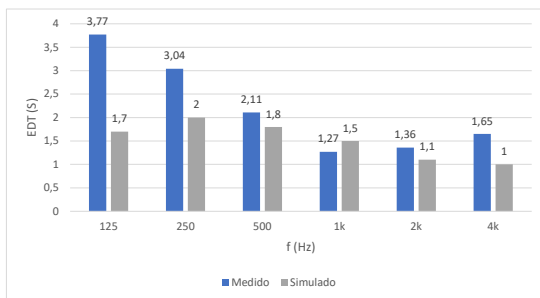
(b) Receptor 02



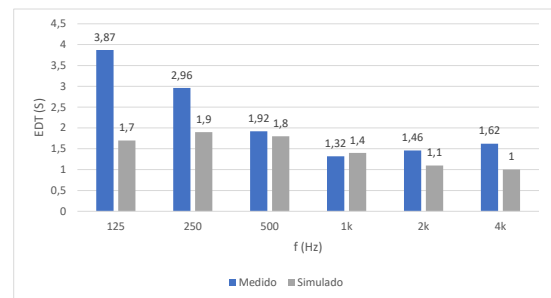
(c) Receptor 03



(d) Receptor 04



(e) Receptor 05

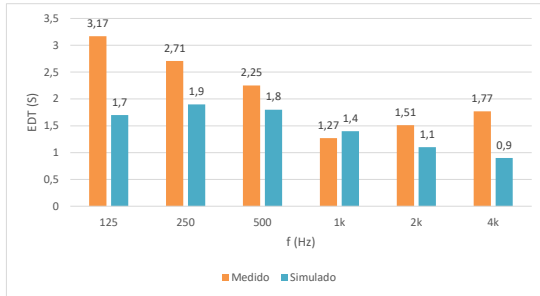


(f) Receptor 06

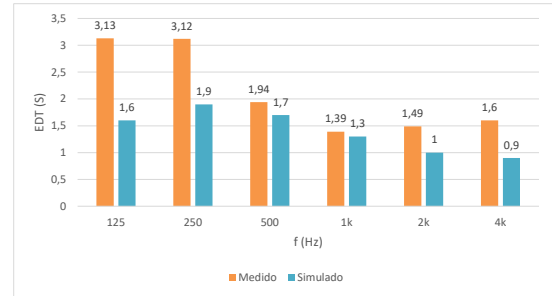
Fonte: Autor, 2023.

Nas Figuras 33 e 34 são apresentados os gráficos dos tempos de decaimento inicial (EDT) medido *versus* simulado dos seis receptores para as duas fontes sonoras.

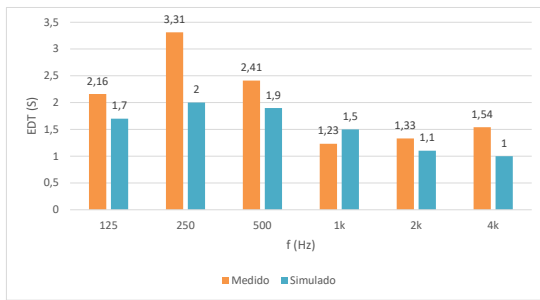
Figura 34 – EDT medido × simulado para a Fonte 02 e Receptores 01 a 06, em 1/1 oitava, de 125 Hz a 4 kHz



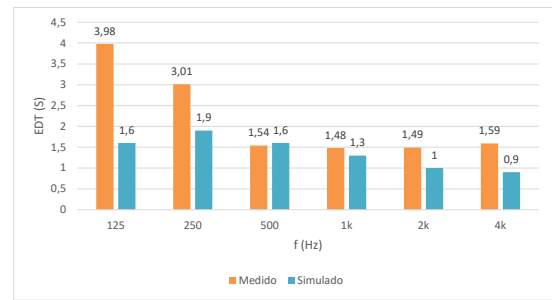
(a) Receptor 01



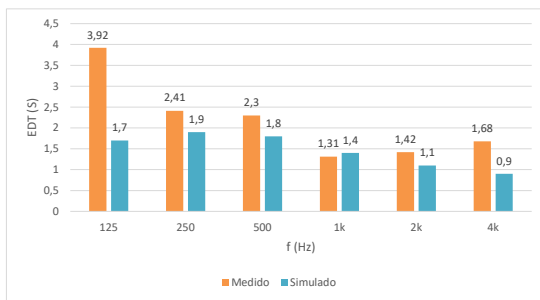
(b) Receptor 02



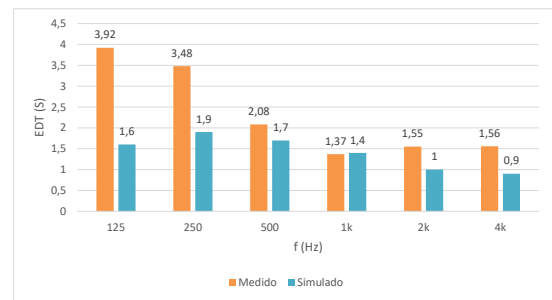
(c) Receptor 03



(d) Receptor 04



(e) Receptor 05



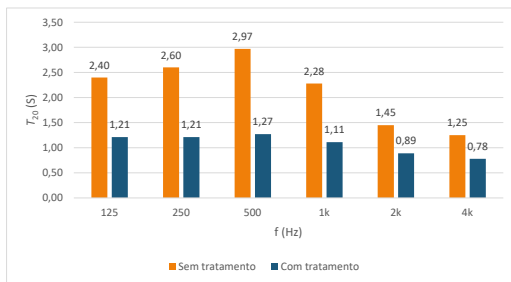
(f) Receptor 06

Fonte: Autor, 2023.

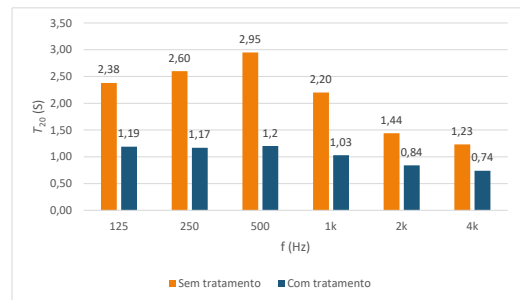
5.3 SIMULAÇÕES SEM TRATAMENTO VS. COM TRATAMENTO ACÚSTICO

Nesta seção são apresentados os gráficos de T_{20} , EDT e D_{50} das simulações acústicas sem tratamento *versus* a simulação com o tratamento acústico proposto. Esses resultados comparativos têm o objetivo de verificar o quão eficaz, do ponto de vista dos parâmetros em consideração, foi a intervenção projetada para a Sala 152.

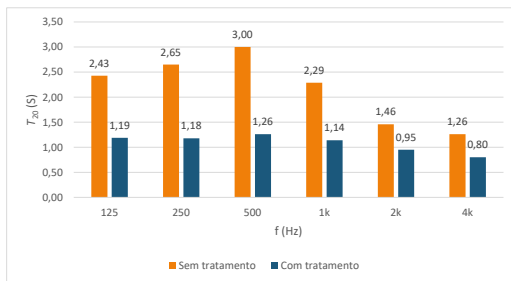
Figura 35 – T_{20} sem tratamento × com tratamento acústico para a Fonte 01 e Receptores 01 a 06, em 1/1 oitava, de 125 Hz a 4 kHz



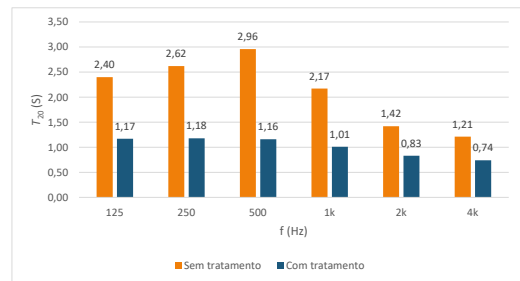
(a) Receptor 01



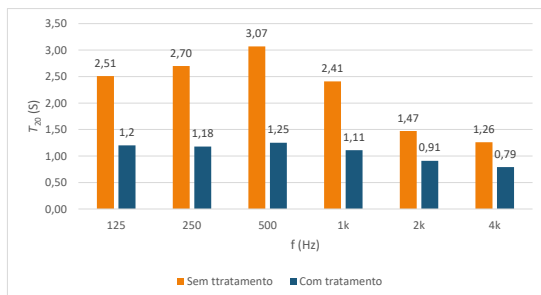
(b) Receptor 02



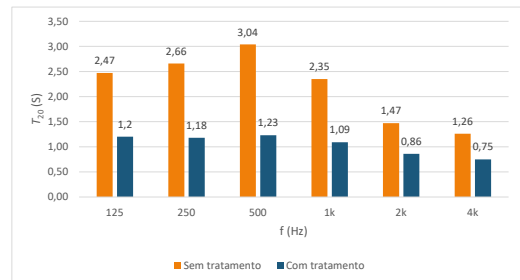
(c) Receptor 03



(d) Receptor 04



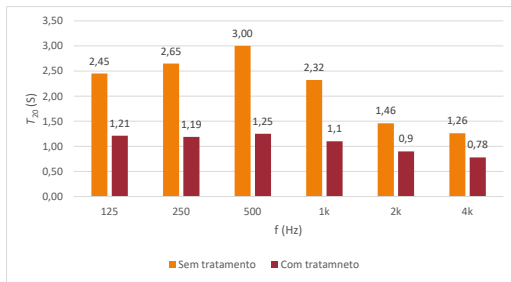
(e) Receptor 05



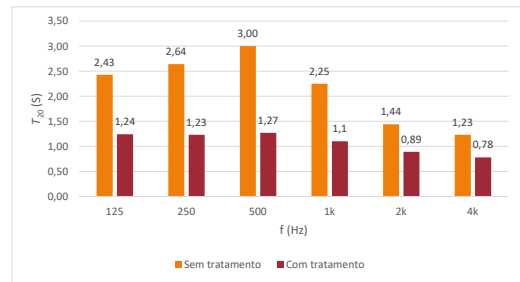
(f) Receptor 06

A Figura 35 apresenta os gráficos da simulação sem tratamento *versus* com tratamento acústico referentes à Fonte 01 e os seis receptores. A Figura 36 mostra os gráficos correspondentes à Fonte 02 e os seis receptores.

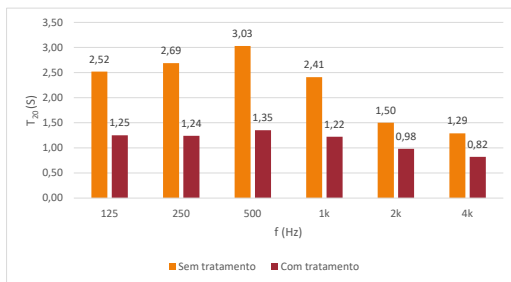
Figura 36 – T_{20} sem tratamento \times com tratamento acústico para a Fonte 02 e Receptores 01 a 06, em 1/1 oitava, de 125 Hz a 4 kHz



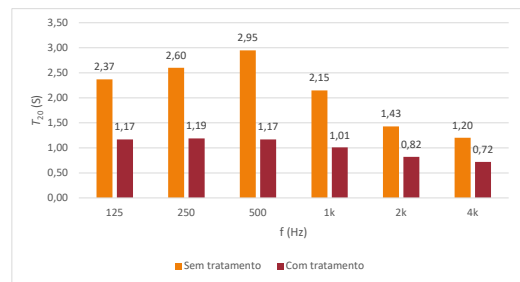
(a) Receptor 01



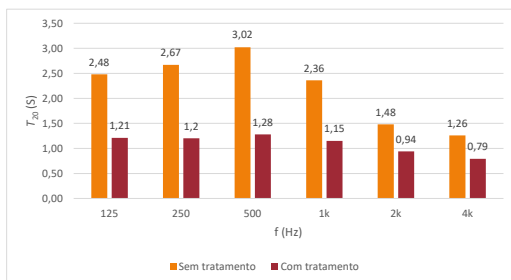
(b) Receptor 02



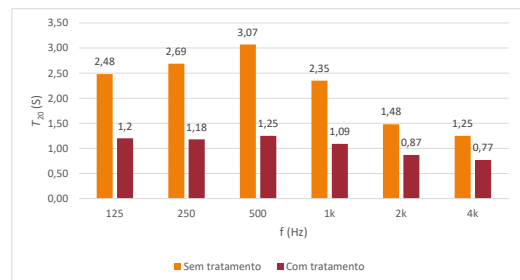
(c) Receptor 03



(d) Receptor 04

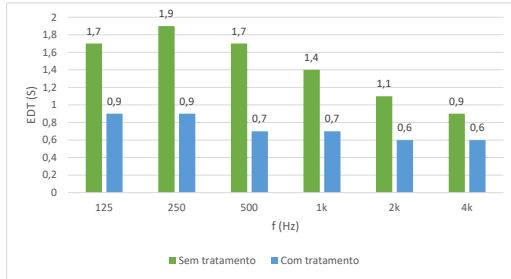


(e) Receptor 05

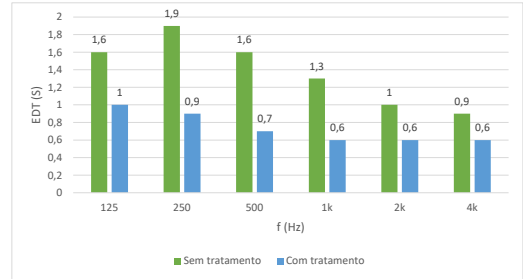


(f) Receptor 06

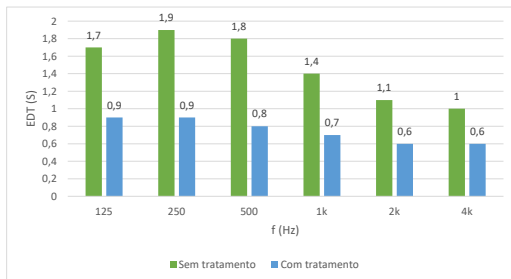
Figura 37 – EDT sem tratamento acústico × com tratamento acústico para a Fonte 01 e Receptores 01 a 06, em 1/1 oitava, de 125 Hz a 4 kHz



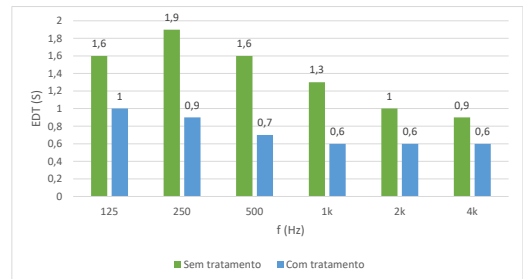
(a) Receptor 01



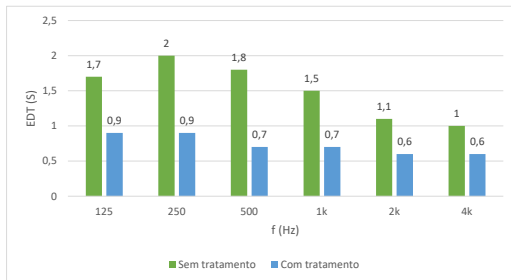
(b) Receptor 02



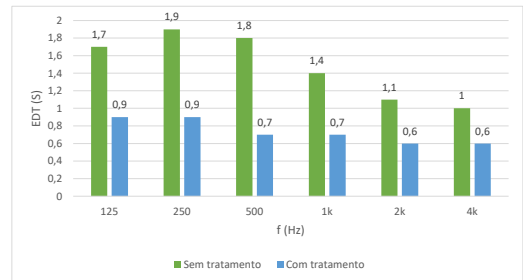
(c) Receptor 03



(d) Receptor 04



(e) Receptor 05

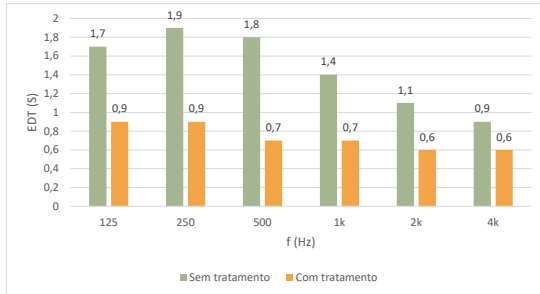


(f) Receptor 06

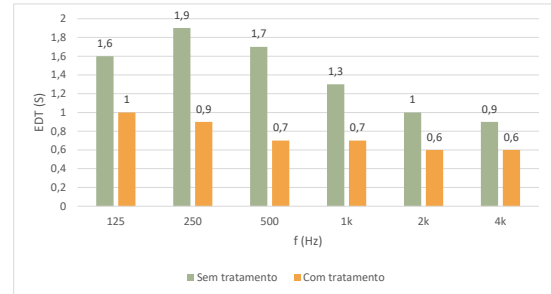
Fonte: Autor, 2023.

As Figuras 37 e 38 apresentam os valores para EDT, também comparativos da sala sem tratamento *versus* com tratamento acústico.

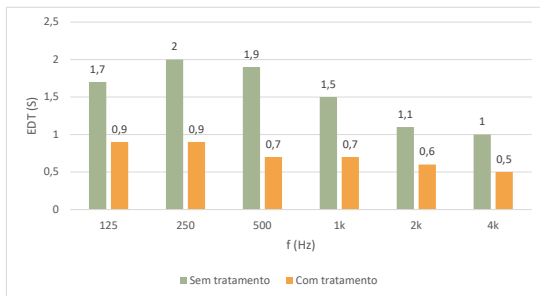
Figura 38 – EDT sem tratamento × com tratamento acústico para a Fonte 02 e Receptores 01 a 06, em 1/1 oitava, de 125 Hz a 4 kHz



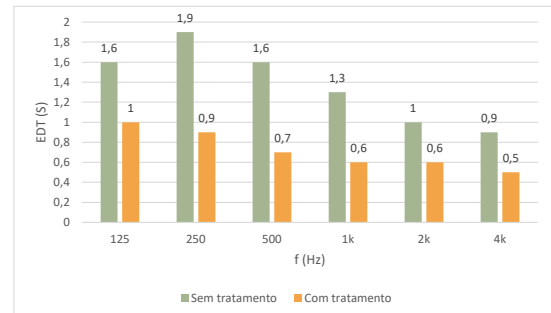
(a) Receptor 01



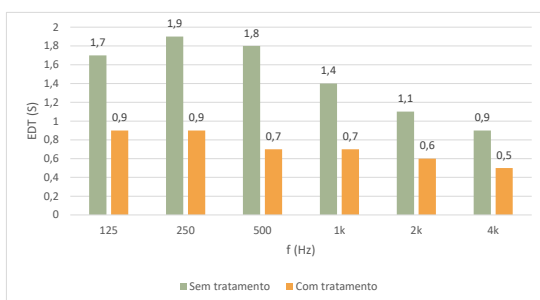
(b) Receptor 02



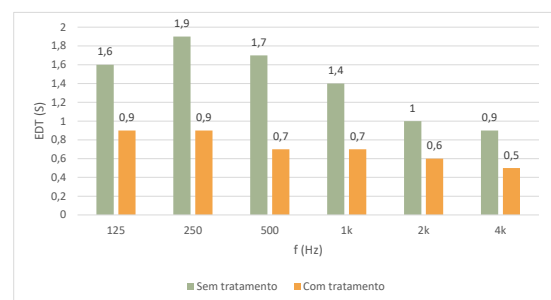
(c) Receptor 03



(d) Receptor 04



(e) Receptor 05

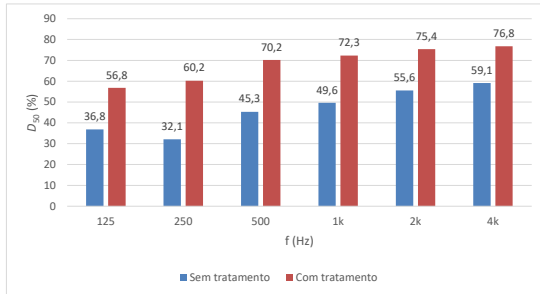


(f) Receptor 06

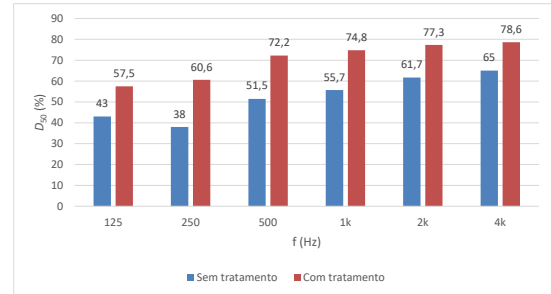
Fonte: Autor, 2023.

São apresentados nas Figuras 39 e 40 os resultados das simulações acústicas para o parâmetro D_{50} , dado em percentual.

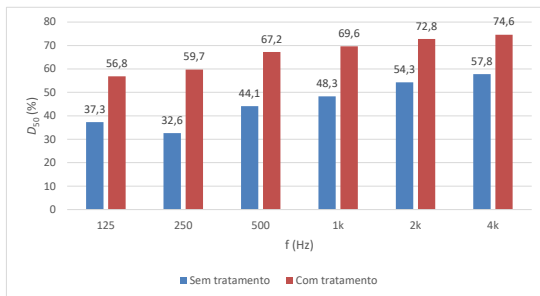
Figura 39 – D_{50} sem tratamento \times com tratamento acústico para a Fonte 01 e Receptores 01 a 06, em 1/1 oitava, de 125 Hz a 4 kHz



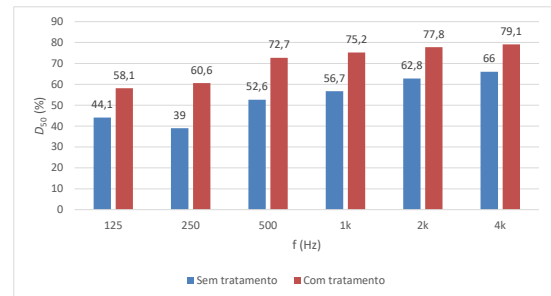
(a) Receptor 01



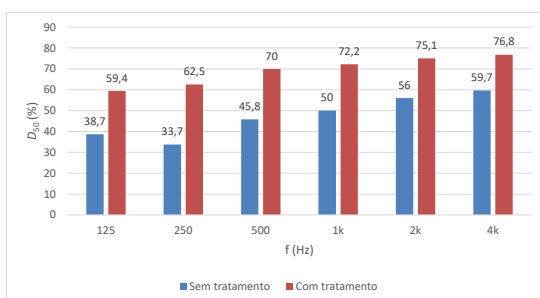
(b) Receptor 02



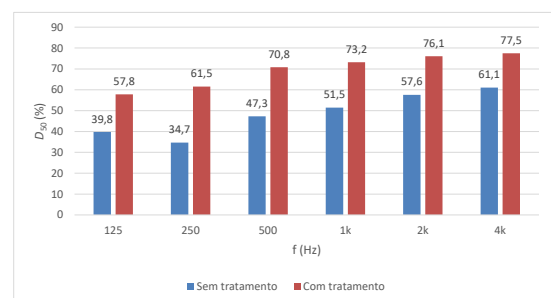
(c) Receptor 03



(d) Receptor 04



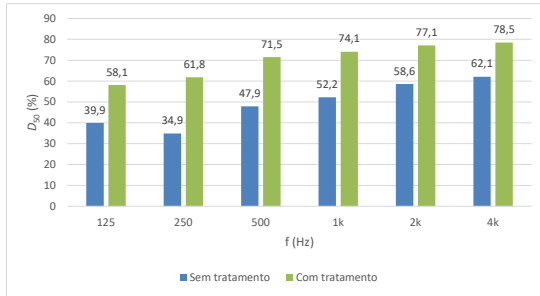
(e) Receptor 05



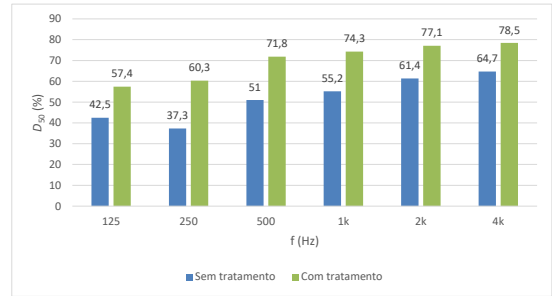
(f) Receptor 06

Fonte: Autor, 2023.

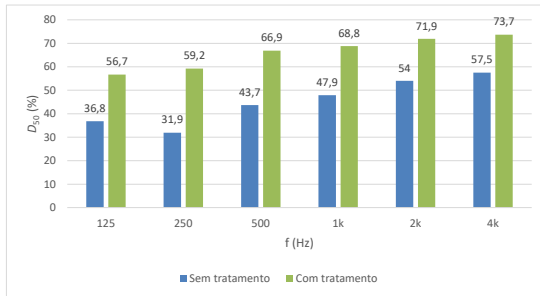
Figura 40 – D_{50} sem tratamento × com tratamento acústico para a Fonte 02 e Receptores 01 a 06, em 1/1 oitava, de 125 Hz a 4 kHz



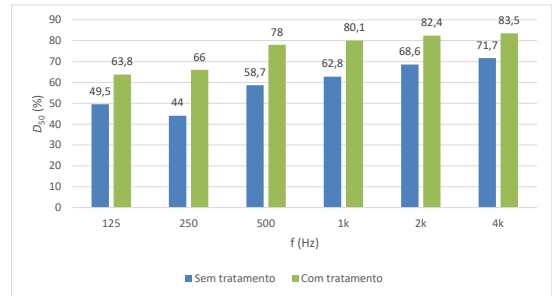
(a) Receptor 01



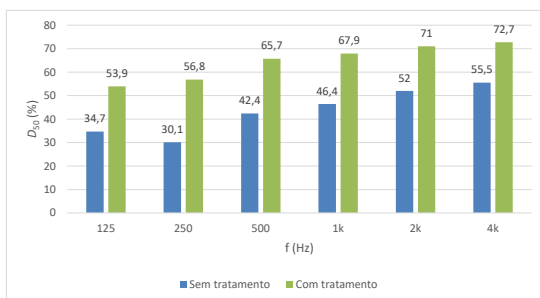
(b) Receptor 02



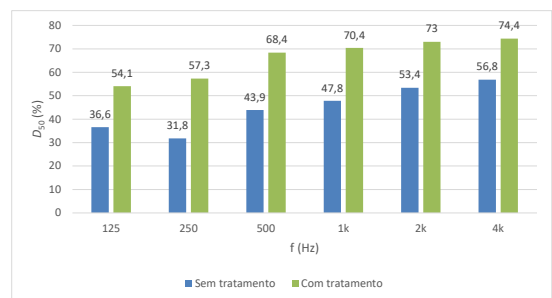
(c) Receptor 03



(d) Receptor 04



(e) Receptor 05



(f) Receptor 06

Fonte: Autor, 2023.

6 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo são discutidos aspectos que foram levados em consideração no decorrer deste trabalho. É apresentado primeiramente, uma discussão dos resultados das medições. Em seguida, é feita uma análise da comparação entre dados medidos e simulados. Na sequência, a comparação entre os resultados simulados, sem e com tratamento (condicionamento) acústico proposto, é discutida.

6.1 MEDIÇÕES ACÚSTICAS

A partir dos dados obtidos com os gráficos das Figuras 27 e 28 é possível observar um TR alto, bem acima de 0,8 s para todas as bandas de frequência, indicando assim uma necessidade de intervenção para a melhoria do conforto acústico do ambiente.

Com relação às medições, fica claro que tanto os valores de T_{20} quanto os de EDT são excessivamente altos na sala em consideração. Com relação a T_{20} , Figura 27 e 28, os valores mais altos ocorreram para Fonte 01 – Receptor 04 (3,72 s em 125 Hz) e Fonte 02–Receptor 01 (3,66 s em 125 Hz). Com relação ao EDT, Figuras 29 e 30, os valores mais altos ocorreram para F01–R03 (5,29 s em 125 Hz) e Fonte 02–Receptor 04 (3,98 s em 125 Hz). Todos esses valores são considerados inaceitáveis para uma sala de aula de 256 m³.

Por exemplo, na banda de oitava de 500 Hz a média para os seis receptores para a Fonte 01, foi de 1,83 s, o que corresponde a mais do que o dobro do valor ideal. Para a Fonte 02 essa média foi de 1,79 s, ou seja, igualmente alta. Por essa razão, o objetivo central do projeto de condicionamento acústico da sala consistirá na introdução de absorção suficiente para reduzir a cerca de metade os valores de TR.

6.2 MEDIÇÕES VS. SIMULAÇÕES ACÚSTICAS

É possível observar uma significativa diferença nos valores de T_{20} , principalmente nas bandas de 500 Hz e 1 kHz. Isso é devido ao fato de não sabermos com exatidão o desgaste que os materiais sofreram ao longo do tempo e quais valores seus coeficientes — principalmente de absorção — possuem atualmente, além de, possivelmente, alguma imprecisão dos algoritmos adotados no simulador.

Observou-se nas Figuras 31 a 34 que, dada a incerteza nos dados de entrada do simulador, particularmente no que toca aos coeficientes de absorção e espalhamento, resultou em uma razoável discrepância entre os dados medidos e os simulados, particular-

mente nas baixas frequências, mesmo após os ajustes feitos nesses coeficientes. A maior discrepância para T_{20} para Fonte 01 (F01) foi de 3,07 s para Receptor 05 (R05) em 500 Hz e para F02 foi de 3,07 s para R06 em 500 Hz. Para o EDT a maior discrepância em F01 foi de 1,7 s para R03 em 125 Hz e para F02 foi de 1,6 s para R04 em 125 Hz. Todavia os resultados da simulação da sala sem tratamento acústico servirão de referência para a simulação da sala com o tratamento acústico preconizado no Capítulo 4.

6.3 SIMULAÇÃO SEM E COM TRATAMENTO

Nas Figuras 35 e 36 observou-se uma redução significativa do T_{20} em todas as bandas e todos os receptores para as duas fontes. Por exemplo para a banda de 500 Hz, a redução média espacial (todos os seis receptores) foi de 1,77 s, ficando o TR em torno de 1,24 s. Na banda de 1 kHz, a redução média espacial foi de 1,20 s, ficando o TR em torno de 1,08 s. Observa-se que as médias obtidas ainda não chegaram aos valores considerados ideais para uma sala de aula (0,8 s). Todavia as simulações foram efetuadas considerando-se as salas não ocupadas.

Levando-se em consideração que o parâmetro EDT está mais correlacionado com a inteligibilidade da fala em uma sala do que o parâmetro T_{20} (BRANDÃO, 2016), avalia-se que os resultados simulados indicam um acerto do projeto de condicionamento acústico proposto para a sala de aula. Observando-se os resultados das Figuras 37 e 38 nota-se que foram obtidos valores espacialmente uniformes, para esse parâmetro. Além disso, obtiveram-se reduções significativas no tempo de decaimento inicial. Para a Fonte 01, a redução média espacial foi de 1,0 s na banda de 500 Hz, levando o EDT a valores de 0,7 s. Já para a banda de 2 kHz a redução média foi de 0,46 s, levando a um EDT de 0,6 s, uniforme para todos os receptores. Para a Fonte 02, obteve-se um decaimento do EDT na média espacial de 1,05 s na banda de 500 Hz, com valor de EDT igual a 0,7 s em todos os receptores. Já para a banda de 2 kHz, o decréscimo do EDT médio espacial foi de 0,45 s, obtendo-se um valor para todos os receptores de 0,6 s.

Observou-se na Figura 2 que uma definição em torno de 50% corresponde aproximadamente a uma inteligibilidade da fala de 90%. Portanto, é desejável, para uma sala de aula, que o parâmetro D_{50} , seja superior a 50% em todas as bandas envolvendo a fala humana, aprox. 250 Hz a 8 kHz. Nas simulações da sala sem condicionamento acústico, verificou-se nas Figuras 39 e 40, que o D_{50} foi inferior a 50%, principalmente para frequências abaixo de 1 kHz, para todos os pares fonte-receptor.

A simulação numérica da sala de aula com a implantação do projeto de condicionamento acústico proposto levou o parâmetro D_{50} a ficar superior a 50% em todos os pares fonte-receptor. Em verdade, para a grande maioria dos pares esse valor ficou acima de 55%, chegando a um valor máximo de 83,5% para o par F02–R04, o que pode ser

considerado excelente.

Após o projeto de tratamento acústico preconizado no Capítulo 4 e sua respectiva simulação, observou-se substancial diferença entre os parâmetros T_{20} , EDT e D_{50} . Com relação ao T_{20} obteve-se, para F01, uma redução média de 1,08 s (média de seis bandas de frequência e seis receptores) e para F02 uma redução média de 1,12 s. Com respeito ao parâmetro EDT a redução não foi tão significativa porém, obteve-se para F01 uma redução média de 0,72 s e para F02 uma redução média de 0,73 s. Finalmente, com relação ao parâmetro D_{50} obteve-se um aumento bastante significativo para todos os pares fonte–receptor, sendo que para F01 obteve-se um aumento médio de 22,2% e, para F02 obteve-se um aumento médio de 20,92%.

7 CONCLUSÕES

Estudou-se neste trabalho uma sala de aula padrão do Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Santa Maria. Trata-se de uma sala de aula típica (tradicional), utilizada para aulas teóricas com padrão geométrico e construtivo similar às demais salas de aula da universidade, como mostra a planta baixa apresentada no Apêndice C.

O primeiro objetivo do trabalho foi avaliar acusticamente a sala de aula em tela. Isso foi realizado a partir de medições acústicas na sala, atendendo às normas NBR 10151 (ABNT, 2019), NBR 10152 (ABNT, 2017a) e NBR ISO 3382-2 (ABNT, 2017b).

Identificou-se, com essas medições, que os parâmetros de qualidade acústica T_{20} e EDT estão bem acima dos valores considerados ideais para uma sala de 256 m^3 , em torno de $0,8 \text{ s}$ (para a sala vazia). Os valores obtidos portanto, caracterizam a necessidade de condicionamento acústico da sala, principalmente no que toca aos coeficientes de absorção sonora de suas superfícies internas.

Após as medições acústicas, a sala de aula foi simulada acusticamente utilizando-se o *software* RAIOS 7. O objetivo principal dessa simulação foi dispôr de uma referência para a posterior simulação da sala com a aplicação do projeto de condicionamento acústico. Diante da grande incerteza na caracterização dos coeficientes de absorção das superfícies existentes na sala foi executado um procedimento de otimização de modo a aproximar os valores dos parâmetros de qualidade acústica simulados aos medidos.

Em seguida, foi apresentado um projeto de condicionamento acústico para a sala em estudo, visando a redução dos parâmetros T_{20} e EDT, bem como o incremento do parâmetro D_{50} avaliado na simulação da sala original. Diante da perspectiva de apoio de uma empresa fabricante de material acústico, selecionaram-se materiais de absorção disponíveis na empresa no projeto de condicionamento.

Finalmente, foi executada uma simulação da sala de aula munida dos materiais considerados no projeto. Essa simulação mostrou que os parâmetros T_{20} e EDT reduziram-se significativamente e o parâmetro D_{50} aumentou consideravelmente, como requerido no projeto. Em particular, obteve-se, com o tratamento acústico, uma redução média no T_{20} de $1,7 \text{ s}$ e no EDT de $1,0 \text{ s}$, aproximadamente, sendo que o EDT ficou em torno $0,6 \text{ s}$ para todos os pares fonte-receptor, o que pode ser considerado um bom resultado. Por outro lado, o D_{50} , altamente correlacionado com a inteligibilidade da fala, assumiu valores acima de 55% com um máximo de $83,5\%$ para um dos pares fonte-receptor.

A principal contribuição deste trabalho é a apresentação de uma solução relativamente simples e barata de implementação para as salas de aula mais comuns no Centro de Tecnologia e demais centros da Universidade Federal de Santa Maria.

Todavia, para a verificação da efetiva eficácia do projeto proposto será necessário realizar-se uma nova medição acústica, mantidas as posições de fontes sonoras e de receptores, após a execução do projeto de condicionamento acústico proposto nesta dissertação.

REFERÊNCIAS

ALVARES, S.; KOWALTOWSKI, D. Programando a arquitetura da aprendizagem. **PARC – Pesquisa em Arquitetura e Construção**, v. 6(2), p. 72–84, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 3382-2 Acústica – Medição de parâmetros de acústica de salas – Parte 2: Tempo de reverberação em sala comuns**. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

_____. **NBR 10151 Acústica – Medição e avaliação de níveis de pressão sonora em áreas habitadas – Aplicação de uso geral**. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

BALLOU, G. **Handbook for Sound Engineers**. 4. ed. Elsevier: Taylor y Francis, 2008. 41–63 p.

BERNARDI, N.; KOWALTOWSKI, D. C. C. K. Environmental comfort in school buildings: A case study of awareness and participation of users. **Environment and Behavior**, v. 38, n. 2, p. 155–172, 2006.

BISTAFA, S. R. **Acústica aplicada ao controle de ruído**. São Paulo: Editora Blucher, 2018.

BRADLEY, J. S.; SATO, H. The intelligibility of speech in elementary school classrooms. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 123, n. 4, p. 2078–2086, 2008.

BRANDÃO, E. **Acústica de Salas, Projeto e modelagem**. São Paulo: Editora Blusher, 2016.

BRINK, H. et al. Classrooms indoor environmental conditions affecting the academic achievement of students and teachers in higher education: A systematic literature review. **Indoor Air**, p. 1–21, 2020.

BRINKMANN, F. et al. A benchmark for room acoustical simulation. concept and database. **Applied Acoustics**, v. 176, n. 107867, 2021.

CARNEIRO, E. B. et al. On the performance investigation of distinct algorithms for room acoustics simulation. **Applied Acoustics**, v. 187, p. 108484, 2022.

CORREIA, T.; OITICICA, L. Acústica em edifícios escolares: avaliação da qualidade acústica em escolas públicas de maceió. In: ENCONTRO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ACÚSTICA (SOBRAC), XXV., 2014, Campinas-SP. **Anais eletrônicos**. Campinas, 2014.

FONSECA, W. D. et al. Simulação de Acústica de Salas desenvolvidas nas universidades do Brasil. **Acústica e Vibrações**, v. 53, p. 217–240, 2021.

_____. Acoustical engineering: a complete academic undergraduate program in Brazil. **Journal of the Acoustical Society of America**, v. 152 n.2, p. 1180–1191, 2022.

GOMES, M. A.; BERTOLI, S. R. Auralization for classroom acoustics. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON SOUND AND VIBRATION, 12., 2005, Campinas-SP. **Anais eletrônicos**. Campinas, 2005. Acesso em: 10/05/2023.

HOUTGAST, T.; STEENEKEN, H. J. A review of the MTF concept in room acoustics and its use for estimating speech intelligibility and auditoria. **Journal of the Acoustical Society of America**, v. 77, n. 3, p. 1069–1077, 1985.

KOWALTOWSKI, D. C. C. K. **Arquitetura escolar: O projeto do ambiente de ensino**. São Paulo: Oficina de Textos, 2011. 272 p.

KRÜGER, E. L.; ZANNIN, P. H. T. Acoustic, thermal and luminous comfort in classrooms. **Building and Environment**, v. 39, n. 9, p. 1055–1063, 2004.

KUTTRUFF, H. **Room Acoustics**. New York: Taylor Francis, 2009.

LONG, M. **Architectural Acoustics**. 2. ed. Cambridge: Academic Press, 2014. 984 p.

MEDRADO, L. O. **Avaliação da inteligibilidade em Salas de Aula de Graduação na Universidade Federal do Rio de Janeiro**. 2004. 115 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

MELO, V. S. G.; TENENBAUM, R. A.; MUSAFIR, R. Avaliação da inteligibilidade em salas de aula do ensino fundamental a partir das respostas impulsivas biauriculares obtidas com cabeça artificial infantil. **Acústica e Vibrações**, v. 44, p. 51–56, 2012.

MELO, V. S. G. et al. Validação de programa de simulação de salas via intercomparação internacional e aferição de inteligibilidade. **Acústica e Vibrações**, v. 53, p. 109–123, 2021.

RIBEIRO, R. S. **Caracterização do condicionamento acústico de uma sala de aula com o uso de painéis de madeira**. 2020. 305 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2020.

SABINE, W. C. **Collected Papers on Acoustics**. Boston: Harvard University Press, 1922.

SOUZA, L. C. L.; ALMEIDA, M. G.; BRAGANÇA, L. **Be-á-bá da Acústica Arquitetônica: ouvindo a arquitetura**. São Carlos: EduFSCar, 2016.

SVENSSON, U. P.; SAVIOJA, L. Overview of the geometrical room acoustic modeling techniques. **Journal of the Acoustical Society of America**, v. 138, p. 708–730, 2015.

TENENBAUM, R. A. et al. Hybrid method for numerical simulation of room acoustics: Part 1 – theoretical and numerical aspects. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 29 n.2, p. 211–221, 2007.

TENENBAUM, R. A.; TAMINATO, F. O.; MELO, V. S. G. Resultados comparativos para a sala 10 do *round robin 4* obtidos pelo código computacional RAIOS 7. **Acústica e Vibrações**, v. 50, p. 39–52, 2018.

_____. Fast auralization using radial basis functions type of artificial neural network techniques. **Applied Acoustics**, v. 157, p. 106993, 2020.

TENENBAUM, R. A. R. A. et al. Hybrid method for numerical simulation of room acoustics: Part 2 – validation of de computacional code RAIOS 3. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 29 n.2, p. 222–231, 2007.

TRISOFT. **Catálogo Trisoft**. Barueri, 2023. Acesso em 20 maio 2023. Disponível em: <<https://trisoft.com.br/solucoes-acusticas/arquitetonico>>.

VÖRLANDER, M. Computer simulations in room acoustics: concepts and uncertainties. **Journal of the Acoustical Society of America**, v. 133, n. 3, 2013.

WEATHERSPARK. **Weatherspark**: Home. Boulder, 2023. Acesso em 13 maio 2023. Disponível em: <<https://weatherspark.com>>.

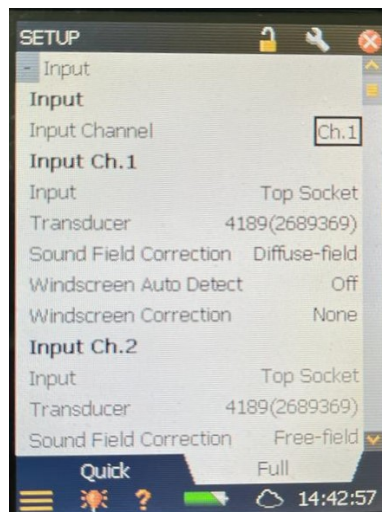
APÊNDICE A – TEMPLATE

Ao selecionar a opção *setup* no *display* do sonômetro, tem-se acesso a uma lista de configurações, sendo a primeira delas: INPUT (entrada) – *Input Ch 1*.

1. *Input* (entrada) = *Top Socket* (soquete superior);
2. *Transducer* (transdutor) = 4189 (este é o modelo do microfone utilizado e correspondente ao equipamento);
3. *Sound Field Correction* (correção de campo sonoro) = *Diffused-field* (campo difuso);
4. *Windscreen Auto Detect* (detecção automática de protetor de vento) = *Off* (desligado);
5. *Windscreen Correction* (correção do protetor de vento) = *None* (nenhum).

Obs.: Para alterar as configurações é necessário apenas tocar no *display* (tela) do sonômetro, sobre a opção desejada e novas opções serão apresentadas. Configurações apresentadas conforme Figura 41.

Figura 41 – Display do sonômetro – *input*

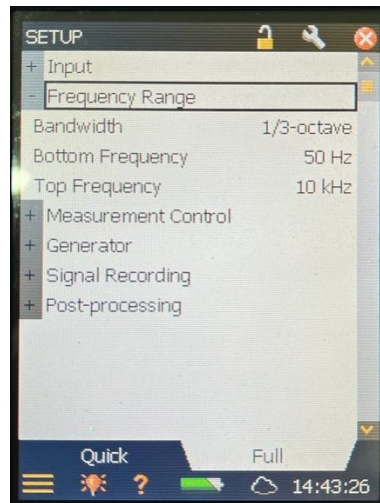


Fonte: Autor, 2023.

1. As medições serão em banda de terço de oitava;
2. Sendo a frequência mais baixa de 100 Hz (diferente do apresentado na imagem);
3. A mais alta de 5 kHz (diferente do apresentado na imagem).

Obs.: Para o método do ruído interrompido, é indicado que a faixa de frequência seja de 100 Hz a 5 kHz para banda de 1/3 oitava. Configurações visualizadas na Figura 42.

Figura 42 – Display do sonômetro – *frequency range*

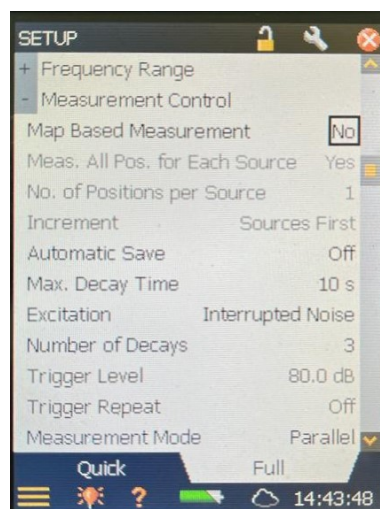


Fonte: Autor, 2023.

1. *No. of Positions per Source* (número de posições por fonte) = 1;
2. *Automatic Save* (salvamento automático) = *Off* (desligado);
3. *Max. Decay Time* (tempo máximo de decaimento) = 10 s;
4. *Excitation* (excitação) = *Interrupted noise* (ruído interrompido);
5. *Number of Decays* (número de decaimentos) = 3;
6. *Trigger Repeat* (repetição de disparo) = *Off* (desligado);
7. *Measurement Model* (modelo de medição) = *Parallel* (paralela).

Configurações apresentadas conforme Figura 43.

Figura 43 – Display do sonômetro – *measurement control*

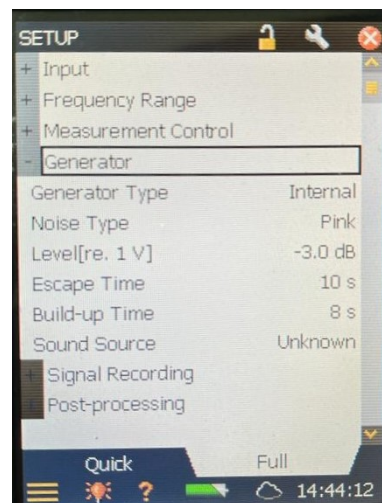


Fonte: Autor, 2023.

1. *Generator Type* (tipo de Gerador) = *Internal* (interno);
2. *Noise Type* (tipo de ruído) = *Pink* (rosa);
3. *Escape time* (tempo de fuga) = 10 s ou 5 s;
4. *Build-up time* (tempo de construção) = 8 s ou 5 s;
5. *Sound Source* (fonte de som) = *Unknown* (desconhecida).

Configurações apresentadas conforme Figura 44.

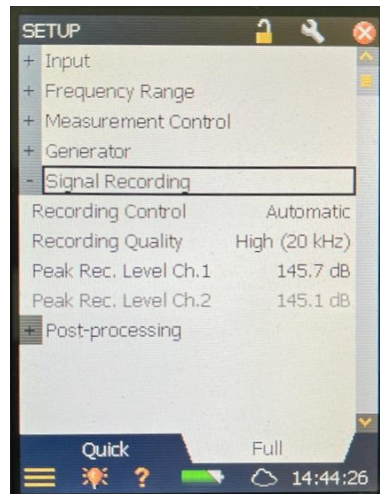
Figura 44 – Display do sonômetro – *generator*



Fonte: Autor, 2023.

1. *Recording Control* (controle de gravação) = *Automatic* (automático);
2. *Recording Quality* (qualidade de gravação) = *High* (Alta) (20 kHz);
3. *Peak Rec. Level Ch. 1* (nível máximo de gravação) = 145.8 dB;
4. *Peak Rec. Level Ch. 2* (nível máximo de gravação) = 145.1 dB;

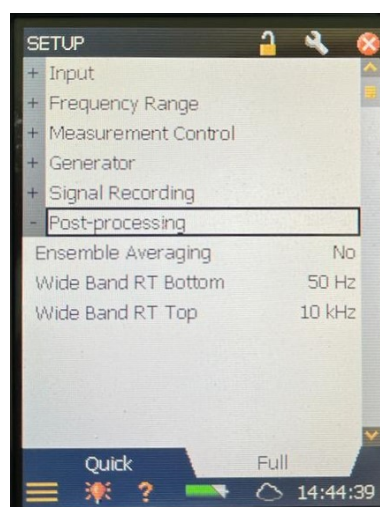
Configurações apresentadas conforme Figura 45.

Figura 45 – Display do sonômetro – *signal recording*

Fonte: Autor, 2023.

1. *Ensemble Averaging* (média de conjunto) = *No* (não);
2. *Wide Band R T Bottom* (parte inferior rt de banda larga) = 100 Hz (diferente da imagem, onde temos 50 Hz);
3. *Wide Band R T Top* (parte superior R T de banda larga) = 8 kHz (diferente da imagem, onde temos 10 kHz).

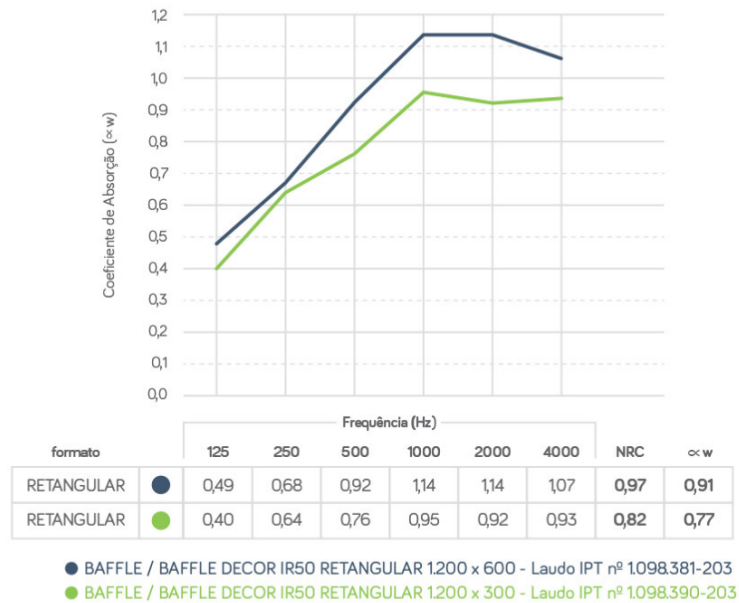
Obs.: Os valores apresentados nas descrições estão de acordo com o indicado em norma para medição do tempo de reverberação em 1/3 de oitava.

Figura 46 – Display do sonômetro – *post-processing*

Fonte: Autor, 2023.

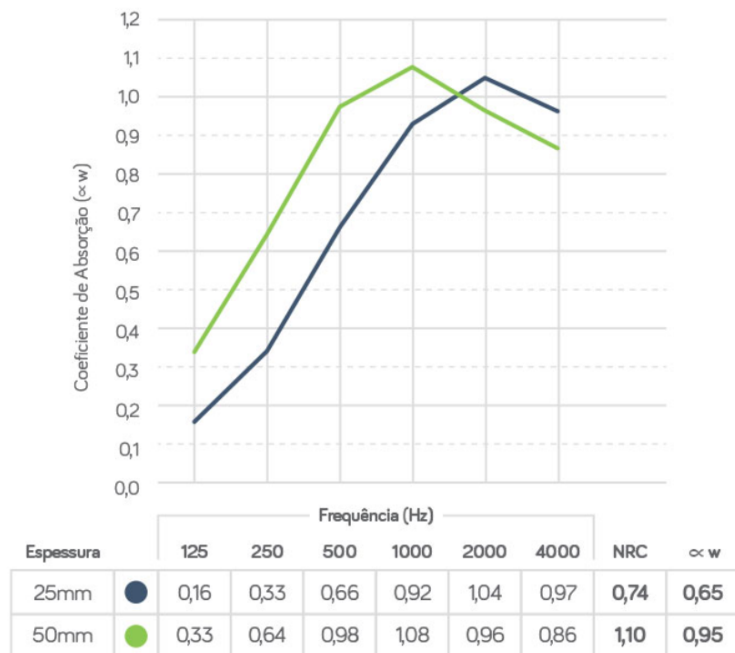
APÊNDICE B – LAUDOS DOS MATERIAIS UTILIZADOS NA PROPOSTA

Figura 47 – Imagem do gráfico de desempenho dos *Baffles* utilizados na proposta



Fonte: Catálogo Trisoft, 2023.

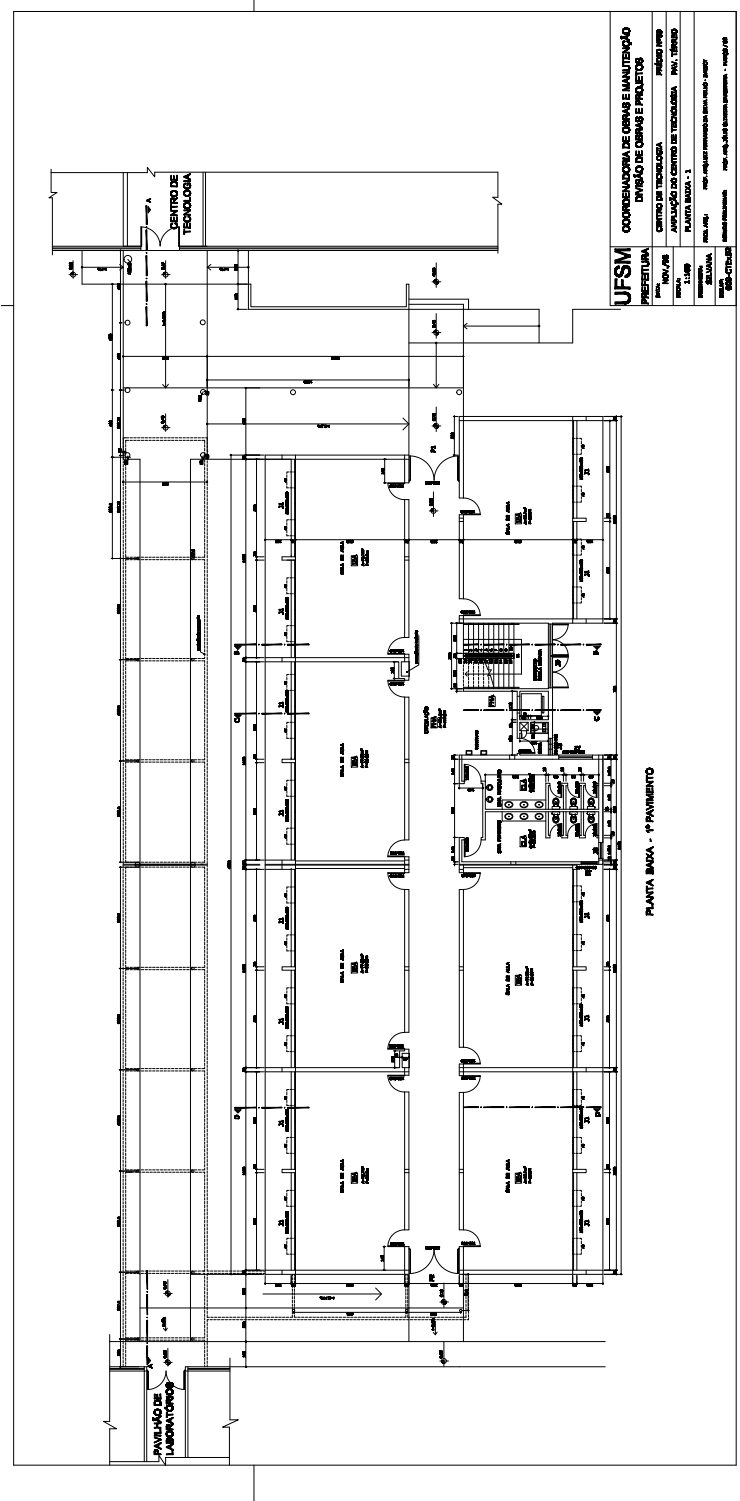
Figura 48 – Imagem do gráfico de desempenho acústico *Revest ness* utilizados na proposta



Fonte: Catálogo Trisoft, 2023.

APÊNDICE C – PLANTA BAIXA CT.

Figura 49 – Imagem da planta baixa do pavimento térreo do anexo A do CT



Fonte: Coordenadoria de obras e manutenção, 1998.