

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA CIVIL - GUARAPUAVA
ENGENHARIA CIVIL**

MATHEUS CHIQUETTO KAVA

**CARACTERIZAÇÃO ACÚSTICA DE AUDITÓRIOS - ESTUDO DE
CASO: TEATRO MUNICIPAL DE GUARAPUAVA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

GUARAPUAVA

2021

MATHEUS CHIQUETTO KAVA

**CARACTERIZAÇÃO ACÚSTICA DE AUDITÓRIOS - ESTUDO DE
CASO: TEATRO MUNICIPAL DE GUARAPUAVA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil, da Coordenação de Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Scoczynski Ribeiro.

GUARAPUAVA

2021

ATA DA DEFESA

Realizou-se no dia **25**, de **agosto** de 2021, às **16 h 30 min**, no Campus Guarapuava da UTFPR, a defesa Trabalho de Conclusão de Curso, como requisito parcial para aprovação do aluno **Matheus Chiquetto Kava**, na disciplina de TCC2 do Curso de Engenharia Civil intitulado: **Caracterização Acústica de Auditórios - Estudo de Caso: Teatro Municipal de Guarapuava.**

A Banca foi composta pelo Presidente:

Prof. Dr. Rodrigo Scoczynski Ribeiro (Orientador), e pelos seguintes membros:

Prof. Dr. Márcio Henrique de Avelar Gomes (UTFPR Campus Curitiba)

Prof^a Dr^a. Rosemara Santos Deniz Amarilla (Externo)

Guarapuava, 25 de agosto de 2021.

Dedico este trabalho à minha família e ao
meu avô Constantino.

AGRADECIMENTOS

Certamente estes parágrafos não irão atender a todas as pessoas que fizeram parte dessa importante fase de minha vida. Portanto, desde já peço desculpas àquelas que não estão presentes entre essas palavras, mas elas podem estar certas que fazem parte do meu pensamento e de minha gratidão.

Agradeço a Deus.

Agradeço especialmente à minha família, meus pais Luiz Vanderlei e Helena Rita, aos meus irmãos Letícia e Gabriel e aos meus avós, pois acredito que sem o apoio incondicional deles seria muito difícil vencer esse desafio. Obrigado por serem tão presentes em todos os momentos da minha vida.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Rodrigo Scoczynski Ribeiro, pelo apoio, tempo dedicado e compreensão durante esta etapa. Obrigado por todos os ensinamentos e experiência com que me guiou nesta trajetória.

A Secretaria de Educação e Cultura do município de Guarapuava - PR, pela autorização do Teatro Municipal de Guarapuava para realização do trabalho.

A toda equipe responsável pelo Teatro, pela receptividade e apoio durante o processo das medições.

Agradeço ao Prof. Ms. Dyorgge Alves Silva, pelo suporte e disponibilidade nas medições de resposta impulsiva e ruído interrompido.

Agradeço ao meu amigo Isidoro Pedroso Keche Neto, que sempre se mostrou disponível em colaborar na pesquisa e nas medições.

A todos os meus amigos e amigas que participaram desta trajetória, em especial aos meus amigos Alexandre, Bruno e Moises.

Aos meus colegas de sala.

A Secretaria do Curso, pela cooperação.

Enfim, a todos os que por algum motivo contribuíram para a realização desta pesquisa.

*“Take these broken wings and learn to fly
All your life
You were only waiting for this moment to
arise”.*

(Paul McCartney, 1968).

RESUMO

KAVA, Matheus Chiquetto. **Caracterização Acústica de Auditórios - Estudo de caso: Teatro Municipal de Guarapuava**. 2021. 98 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Guarapuava, 2021.

Em ambientes como os teatros, auditórios e salas acústicas, é essencial conhecer o comportamento do som em seu interior, procurando controlá-lo para que este torne acusticamente adequado à sua finalidade de uso. A verificação da propagação do som em relação aos aspectos construtivos de forma, geometria e dos materiais constituintes nas superfícies, é imprescindível para definição da qualidade acústica de espaços fechados. É com esse viés que o trabalho se desenvolve, tendo como objetivo principal a caracterização acústica do estudo de caso, o Teatro Municipal de Guarapuava, de finalidade múltipla, inaugurado em junho de 2018 com capacidade para 316 ouvintes. A análise dos principais parâmetros objetivos acústicos, Tempo de Reverberação (TR), Tempo de Decaimento Inicial (EDT), Inteligibilidade da palavra (STI), Clareza (C80) e Definição (D50), deu-se através de um conjunto de medições de resposta ao impulso e ruído interrompido realizadas in situ, seguindo os procedimentos descritos na NBR 3382-1:2017. Todas essas propriedades permitiram avaliar a qualidade sonora do Teatro, mediante análise comparativa com os valores recomendados em norma e na literatura. Em sequência, foi desenvolvido um modelo de simulação acústica do ambiente, no *software* gratuito *I-SIMPA*, sua calibração e validação foi baseada nos resultados obtidos nas medições realizadas. Em face aos valores coletados por meio das medições, pode-se concluir que o auditório apresenta um ótimo comportamento acústico a sua finalidade de uso, especialmente nas atividades direcionadas à percepção da palavra do que para apresentações musicais. O modelo computacional elaborado, exige um ajuste mais refinado dos coeficientes de absorção sonora e espalhamento, a fim de obter resultados mais próximos das medições, possibilitando assim simular soluções acústicas construtivas com intuito de melhorar a qualidade acústica do Teatro caso desejado.

Palavras-chave: Acústica de salas. Auditório. Medições acústicas. Simulação computacional.

ABSTRACT

KAVA, Matheus Chiquetto. **Acoustic Characterization of Auditoriums - Case Study: Guarapuava Municipal Theater**. 2021. 98 f. Work of Conclusion Course in Civil Engineering - Federal Technology University - Paraná. Guarapuava, 2021.

In environments such as theaters, auditoriums and acoustic rooms, it is essential to know the behavior of the sound inside, trying to control it so that it becomes acoustically suitable for its intended use. The verification of the sound propagation in relation to the constructive aspects of form, geometry and the constituent materials on the surfaces, is essential to define the acoustic quality of closed spaces. It is with this bias that the work is developed, having as its main objective the acoustic characterization of the case study, the Municipal Theater of Guarapuava, with multiple purposes, inaugurated in June 2018 with capacity for 316 listeners. The analysis of the main objective acoustic parameters, Reverberation Time (TR), Early Decay Time (EDT), Speech Transmission Index (STI), Clarity (C80) and Definition (D50), was carried out through a set of measurements of impulse response and interrupted noise performed in situ, following the procedures described in NBR 3382-1:2017. All these properties allowed us to assess the sound quality of the Theater, through a comparative analysis with the values recommended in the standard and in the literature. In sequence, an acoustic simulation model of the environment was developed in the free I-SIMPA software, its calibration and validation was based on the results obtained in the measurements performed. In view of the values collected through the measurements, it can be concluded that the auditorium presents a great acoustic behavior for its purpose of use, especially in activities aimed at the perception of the word than for musical performances. The computational model elaborated requires a more refined adjustment of the sound absorption and scattering coefficients, in order to obtain results closer to the measurements, thus enabling to simulate constructive acoustic solutions in order to improve the acoustic quality of the Theater if desired.

Keywords: Room acoustics. Auditorium. Acoustic measurements. Computational simulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Onda sonora em propagação.....	20
Figura 2: Faixa de frequência dos infrasons, sons audíveis e ultrasons.	21
Figura 3: Limiares auditivos para o ser humano.....	23
Figura 4: Absorção, reflexão especular e reflexão difusa.....	24
Figura 5: Reflexão de uma onda plana no ar em um sistema representado por uma impedância Z_s	25
Figura 6: Isolamento acústico.....	27
Figura 7: Curvas de avaliação de ruídos (NC).	29
Figura 8: Condicionamento acústico.	30
Figura 9: Tempo de reverberação (T60).	31
Figura 10: Gráfico dos valores adequados em 500 Hz para TR.....	32
Figura 11: Reflectograma típico de uma configuração sala-fonte-receptor, mostrando o som direto, primeiras reflexões, ITDG e cauda reverberante.	33
Figura 12: Cadeia de ligação dos equipamentos medição resposta impulsiva.	37
Figura 13: Propagação sonora dentro de ambientes fechados.	38
Figura 14: Tempo de reverberação ideal para diversos tipos de ambientes.	40
Figura 15: Variação do tempo de reverberação com a frequência para auditórios com prioridade a música.	41
Figura 16: Classificação da pesquisa.....	44
Figura 17: Sequência de atividades para delineamento do estudo de caso.	45
Figura 18: Vista fachada Teatro Municipal de Guarapuava.	46
Figura 19: Vista aérea da localização urbana do Teatro Municipal de Guarapuava.	46
Figura 20: Vista interna do Teatro Municipal de Guarapuava.	47
Figura 21: Fonte dodecaédrica omnidirecional fabricante Grom.	50
Figura 22: Sonômetro modelo BK 2250 Light marca Brüel & Kjær.	50
Figura 23: Posição fonte F1 centro do palco.	51
Figura 24: Posição microfone M1 fonte F1.....	52
Figura 25: Posicionamento fonte F1 e seus receptores.....	53
Figura 26: Sequência de ligação dos equipamentos para medição da resposta impulsiva.	54
Figura 27: Configuração das medições de respostas aos impulsos.....	55
Figura 28: Posição fonte F2.	56
Figura 29: Posicionamento fonte F2 e seus receptores.	56
Figura 30: Posição fonte F3.	57
Figura 31: Posicionamento fonte F3 e seus receptores.	58
Figura 32: Espectro de ruído rosa utilizado na medição do ruído interrompido.	59
Figura 33: Medição com analisador de frequência.....	59
Figura 34: Vista lateral da geometria tridimensional simplificada do modelo do Teatro Municipal de Guarapuava.....	60

Figura 35: Vista frontal palco para plateia da geometria tridimensional simplificada do modelo do Teatro Municipal de Guarapuava.....	61
Figura 36: Vista plateia para o palco da geometria tridimensional simplificada do modelo do Teatro Municipal de Guarapuava.....	61
Figura 37: Construção das superfícies da modelagem para simulação acústica dentro do software I-SIMPA.	62
Figura 38: Modelagem acústica Teatro Municipal de Guarapuava inserida no software I-SIMPA.	64
Figura 39: Posição da fonte F1 e dos seus receptores sonoros.....	65
Figura 40: Vista superior do posicionamento da fonte F1 e dos seus receptores sonoros.	65
Figura 41: Configuração adotada das propriedades de cálculo para simulação acústica.	66
Figura 42: Tempo de Reverberação ideal em 500 Hz pela NBR 12179:1992.....	72
Figura 43: Mapa acústico T30 - 500 e 1000 Hz.....	81
Figura 44: Mapa acústico C80 - 500 e 1000 Hz.	83
Figura 45: Mapa acústico D50 - 500 e 1000 Hz.	84

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Características construtivas Teatro Municipal de Guarapuava	48
-----------------------------------------------------------------------------	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Materiais adotados para simulação acústica.....	63
Tabela 2: Resumo por pontos para fonte F1 centro do palco - método resposta impulsiva.	70
Tabela 3: Incertezas de medições - método resposta impulsiva.....	70
Tabela 4: Valores médios para posição de fonte F1.	70
Tabela 5: Valores de TR adequados em função da finalidade da sala	71
Tabela 6: Valores sugeridos de C80.	73
Tabela 7: Valores de STI para qualificação.....	73
Tabela 8: Resumo por pontos fonte F2 - método resposta impulsiva.	74
Tabela 9: Valores médios para posição de fonte F2.	74
Tabela 10: Resumo por pontos fonte F3 - método resposta impulsiva.	75
Tabela 11: Valores médios para posição de fonte F3.	75
Tabela 12: Resumo por pontos fonte F2 - método ruído interrompido.....	76
Tabela 13: Incertezas de medições - método ruído interrompido.....	76
Tabela 14: Valores médios para posição de fonte F2 - método do ruído interrompido.	76
Tabela 15: Resumo por pontos fonte F3 - método ruído interrompido.	77
Tabela 16: Valores médios para posição de fonte F3 - método do ruído interrompido.	77
Tabela 17: Resumo por pontos fonte F1 - simulação acústica.....	78
Tabela 18: Resumo por pontos fonte F1 - simulação acústica.....	79
Tabela 19: Valores médios para posição de fonte F1 - simulação acústica.....	79
Tabela 20: Grandezas acústicas agrupadas de acordo com aspectos dos ouvintes pela NBR 3382-1:2017.....	79
Tabela 21: Comparação entre os resultados medidos e simulados.	80

LISTA DE SIGLAS/SÍMBOLOS

α	Coeficiente de absorção sonora.
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas.
C_{80}	Clareza.
D_{50}	Definição.
dB	Decibel.
EDT	<i>Early Decay Time.</i>
f	Frequência.
FFT	<i>Fast Fourier Transform.</i>
Hz	Hertz.
ITA	<i>Institute of Technical Acoustics.</i>
I-SIMPA	Software de simulação acústica.
ISO	<i>Internation Organization for Stardardization.</i>
m	Metro.
m ²	Metro quadrado.
m ³	Metro cúbico.
NBR	Norma Brasileira.
NC	<i>Noise Criterion.</i>
NPS	Nível de Pressão Sonora.
s	Coeficiente de espalhamento.
STI	<i>Speech Transmission Index.</i>
TR	Tempo de Reverberação.
T _s	Tempo Central.
T ₂₀	Tempo obtido a partir do tempo no qual a curva de decaimento primeiro alcança 5 dB e depois 25 dB abaixo do instante inicial.
T ₃₀	Tempo obtido a partir do tempo no qual a curva de decaimento primeiro alcança 5 dB e depois 35 dB abaixo do instante inicial.
T ₆₀	Tempo de Reverberação com decaimento de 60 dB.
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
2 OBJETIVOS	18
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
3.1 INTRODUÇÃO À ACÚSTICA	19
3.2 O SOM	19
3.3 PROPRIEDADES DO SOM	20
3.3.1 Frequência	20
3.3.2 Pressão sonora	22
3.3.3 Intensidade e potência sonora	23
3.4 REFLEXÃO SONORA	24
3.5 ABSORÇÃO SONORA	26
3.6 ISOLAMENTO ACÚSTICO	27
3.7 CONDICIONAMENTO ACÚSTICO	29
3.8 TEMPO DE REVERBERAÇÃO	30
3.9 INTELIGIBILIDADE DA FALA	33
3.10 CLAREZA	34
3.11 DEFINIÇÃO	35
3.12 TEMPO CENTRAL	36
3.13 MÉTODOS DE MEDIÇÃO	36
3.14 ACÚSTICA EM AUDITÓRIOS E TEATROS	37
3.14.1 Auditório com Fins Múltiplos	39
3.15 MODELAGEM ACÚSTICA	41
3.15.1 Modelagem Geométrica	41
3.16 SOFTWARE I-SIMPA	42
4 METODOLOGIA	44
4.1 ESTUDO DE CASO TEATRO MUNICIPAL DE GUARAPUAVA	45
4.2 CARACTERIZAÇÃO DO AMBIENTE DE ESTUDO	46
4.3 MEDIÇÕES	48
4.3.1 Parâmetros Acústicos Medidos	49
4.3.2 Equipamentos Utilizados	49
4.3.3 Condições de Medição	50
4.3.4 Procedimentos de Medição	51
4.4 ELABORAÇÃO DO MODELO GEOMÉTRICO ACÚSTICO	59
4.4.1 Modelagem e Simulação Acústica no <i>I-SIMPA</i>	61
4.5 TRATAMENTO E ANÁLISE DOS DADOS OBTIDOS	68
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	69
5.1 RESULTADOS MEDIÇÕES MÉTODO RESPOSTA IMPULSIVA	69
5.2 RESULTADOS MEDIÇÕES MÉTODO DO RUÍDO INTERROMPIDO	75

5.3 RESULTADOS SIMULAÇÕES ACÚSTICAS	78
5.3.1 Análise Comparativa dos Resultados	79
6 CONCLUSÕES	86
6.1 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS	88
REFERÊNCIAS.....	89
ANEXO A - CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO ANALISADOR	92

1 INTRODUÇÃO

O valor dos estudos acústicos em projetos do passado, para grandes audiências como os teatros gregos e romanos ao ar livre, tem grande expressividade, mesmo em decorrência da prioridade para imagem e efeito visual da época, e marca como a primeira contribuição referencial no campo da acústica. Posteriormente no século XX, com o avanço da tecnologia e a concretização da acústica como ciência, deu-se o surgimento de equipamentos de medição mais precisos, conseqüentemente um progresso explícito na área. Aumentando também assim a preocupação com a qualidade sonora dentro dos ambientes (SOUZA, et al., 2012).

Segundo Brandão (2016), a acústica de salas estuda a maneira de como o som se comporta e propaga no interior de um ambiente, em espaços fechados como auditórios, igrejas e salas de aula, procurando controlá-lo para que o som se torne acusticamente adequado ao seu uso principal. O conhecimento da propagação do som é de fundamental importância, pois permite a modelação deste dentro de uma sala, condicionando-a com características apropriadas para que apresente uma resposta acústica adequada ao seu volume e às funções à qual ela se destina.

Quando está se analisando acusticamente um espaço, é essencial conhecer as características das superfícies existentes no interior do local, bem como o tipo de geometria, a localização e revestimento dos materiais. Todas estas variáveis fazem parte do processo de condicionamento acústico em um ambiente (BRANDÃO, 2018).

Neste contexto, o presente trabalho busca avaliar as condições acústicas do local utilizado como estudo de caso, o Teatro Municipal de Guarapuava, inaugurado em junho de 2018, considerado dentre os teatros mais modernos do estado do Paraná. O espaço possui múltipla funcionalidade, recebendo atividades musicais e de percepção da palavra, empregado para palestras, conferências e apresentações teatrais. Assim, é de máxima importância analisar os principais parâmetros objetivos acústicos, a Inteligibilidade da palavra (STI) e o Tempo de Reverberação (TR), além de outros parâmetros complementares como Definição (D50), Clareza (C80) e Tempo de Decaimento Inicial (EDT), através de um conjunto de medições de resposta ao impulso e ruído interrompido realizada *in situ*. Todas estas propriedades permitirão caracterizar a qualidade sonora do Teatro Municipal de Guarapuava, realizando uma análise comparativa com os principais requisitos normativos e referenciais teóricos de qualidade.

Desenvolve-se também na pesquisa, um modelo geométrico computacional do auditório, utilizando a ferramenta de desenho tridimensional *FormIt*, para exportação no software de simulação acústica de código aberto e gratuito *I-SIMPA*. A calibração e validação do modelo se deu mediante as medições *in situ*, possibilitando assim o aprimoramento das condições acústicas do Teatro caso necessário, por meio do estudo de soluções das características das superfícies encontradas no interior.

Deste modo, o atual trabalho procura evidenciar a importância do conhecimento científico e técnico da acústica, na concepção de projetos de auditórios com finalidade múltipla, onde se privilegia a percepção da palavra falada.

2 OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é caracterizar acusticamente o Teatro Municipal de Guarapuava, utilizando métodos de medições acústicas em conformidade com especificações e parâmetros técnicos de qualidade padronizados em norma.

Constituem como objetivos específicos as etapas abaixo:

- Analisar as normas técnicas que especificam métodos e critérios de medição de parâmetros acústicos em salas de espetáculos;
- Caracterizar o condicionamento acústico do Teatro Municipal de Guarapuava por meio de medições padronizadas;
- Desenvolver um modelo tridimensional de simulação computacional, utilizando como base as plantas e medições do Teatro Municipal de Guarapuava;
- Validar o modelo geométrico computacional para simulações acústicas baseado em análises das medições realizadas em campo;
- Comparar os resultados obtidos nas medições de resposta impulsiva para os parâmetros acústicos com os da simulação computacional.
- Analisar diferentes soluções de condicionamento acústico caso necessário, mediante modelo de simulações computacionais.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo tem por objetivo apresentar a fundamentação teórica, conceitos e parâmetros da acústica, considerados relevantes para o desenvolvimento do trabalho.

3.1 INTRODUÇÃO À ACÚSTICA

A Acústica é o ramo da física responsável por estudar o fenômeno ondulatório som. Dedicando-se a sua produção, propagação em diversos tipos de meios, transmissão, controle, recepção e interação com o ser humano. Buscando em ambientes internos, preservar e enfatizar os sons desejados, eliminando os ruídos capazes de interferir no espaço em projeto (CHING; BINGGELI, 2013).

Para Souza et al. (2012) o som é um elemento com capacidade de qualificar um ambiente em relação ao conforto ambiental, e entender esse fenômeno físico é fundamental para promover a qualidade acústica.

3.2 O SOM

O som pode ser definido como vibrações das partículas do ar que se propagam a partir de estruturas vibrantes, ou seja, resultando em variações de pressão em um meio elástico devido às vibrações de um corpo, capaz de produzir sensações no sistema auditivo (BISTAFA, 2018). A onda sonora em propagação é ilustrada na Figura 1.

A formação das ondas sonoras está relacionada ao estímulo sonoro transmitido as partículas de ar a partir de uma fonte. Nesse meio, as partículas são submetidas a sucessivas compressões e rarefações, ao quais são propagadas em formas de ondas esféricas, através da movimentação de uma partícula que provoca a vibração das vizinhas (SOUZA, et al., 2012).

Figura 1: Onda sonora em propagação.



Fonte: PROACÚSTICA (2019).

Entende-se que a transmissão das ondas mecânicas sonoras sustentam-se em três elementos fundamentais: Uma fonte, um meio de propagação e um receptor.

3.3 PROPRIEDADES DO SOM

Nessa seção será abordada as principais propriedades físicas mensuráveis do som, essenciais para seu entendimento e controle.

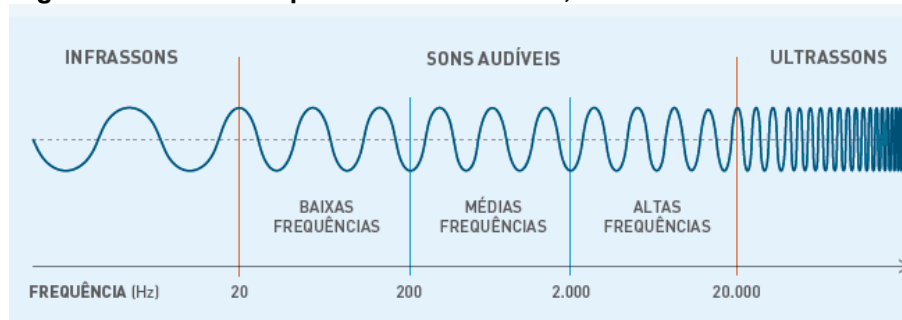
3.3.1 Frequência

O número de repetições em um determinado período de tempo, em que as ondas sonoras se propagam através de ciclos de compressão e rarefação das partículas em um meio, é definido como frequência (PROACÚSTICA, 2019).

A unidade no Sistema Internacional de Medidas (SI) utilizada para quantificar essa grandeza é o Hertz (Hz) e representa o número de ciclos por segundo.

O sistema auditivo humano não consegue ouvir todos os sons da natureza, em termos de frequências devem se situar entre 20 Hz e 20.000 Hz. Para facilitar, as frequências audíveis normalmente são classificadas em baixas frequências, entre 20 Hz e 200 Hz; médias frequências, de 200 Hz a 2.000 Hz; e altas frequências, de 2.000 Hz a 20.000 Hz, conforme a Figura 2 (PROACÚSTICA, 2019).

Figura 2: Faixa de frequência dos infrassons, sons audíveis e ultrassons.



Fonte: PROACÚSTICA (2019).

De acordo com Souza, et al. (2012) os sons situados na faixa de altas frequências correspondem aos sons agudos, já os sons chamados de graves, possuem energias situadas nas faixas de baixa frequência, com um número menor de oscilações temporais.

O comprimento de onda pode ser definido como a distância entre duas frentes de onda em uma determinada frequência. Tal característica influencia diretamente no comportamento das ondas sonoras frente a obstáculos e superfícies. Significa dizer que, os sons de baixa e alta frequência, podem respectivamente, ignorar/contornar e sofrer grande interferência na sua direção de propagação em função das dimensões de uma superfície (SOUZA, et al., 2012).

A frequência e o comprimento de onda (λ) estão relacionados de forma inversa, ou seja, quanto maior a frequência menor o comprimento de onda. Essa relação é evidente através da seguinte expressão mencionada por Souza, et al. (2012):

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

f - Frequência em Hz (1/s);

λ - Comprimento de onda (m);

c - Velocidade de propagação do som (m/s).

Os sons se propagam em diferentes velocidades de propagação em diversos meios elásticos. No ar essa velocidade é cerca de 344 m/s a uma temperatura média

de 20°C, e os valores do comprimento de onda variam de 17 mm a 17 m para o intervalo de frequências audíveis 20 Hz - 20.000 Hz (SOUZA, et al., 2012).

3.3.2 Pressão sonora

O som se propaga através das variações de pressão sonora nos meios, isto significa consecutivas colisões das partículas uma com as outras no ambiente. O sistema auditivo humano é capaz de detectar variações de pressão no ambiente da ordem de 0,00002 Pa, caracterizadas como limiar da audição, até 200 Pa, correspondente ao limiar da dor (BISTAFA, 2018).

O decibel (dB) é a unidade do nível de pressão sonora e corresponde a uma escala que relaciona de forma logarítmica a pressão sonora medida com uma outra de referência, possibilitando assim a obtenção e representação de valores mais facilmente (PROACÚSTICA, 2019).

O nível de pressão sonora (NPS) expresso em decibel, com uma pressão sonora de referência p_0 (Pa), de uma pressão p (Pa), é expresso pela Equação 2 segundo Souza, et al. (2012):

$$\text{NPS} = 20 * \log\left(\frac{p}{p_0}\right) \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

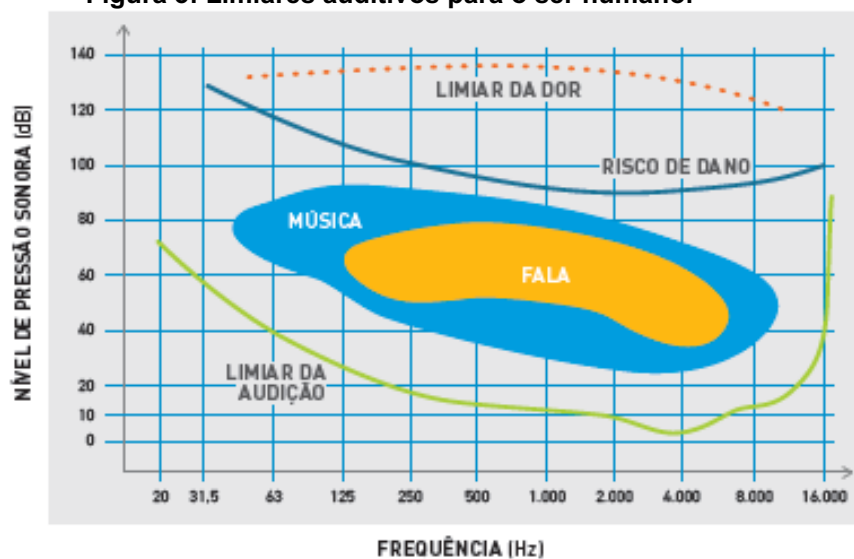
NPS - Nível de pressão sonora (dB);

p - Pressão sonora medida (Pa);

p_0 - Pressão sonora de referência (Pa).

A relação entre as duas propriedades do som apresentadas, frequência e nível de pressão sonora, podem ser sintetizadas na Figura 3. Observa-se na figura que a partir de 85 dB, frequências entre 500 e 4000 Hz podem causar danos à capacidade auditiva do ser humano. Sabendo que o sistema auditivo possui sensibilidade limitada para diversas faixas audíveis, esta característica subjetiva implica que cada frequência possui limiares auditivos diferentes (PROACÚSTICA, 2019).

Figura 3: Limiares auditivos para o ser humano.



Fonte: PROACÚSTICA (2019).

3.3.3 Intensidade e potência sonora

A intensidade sonora é a propriedade do som responsável por diferenciar sons altos e fracos. Fisicamente de acordo com Bistafa (2018, p. 25).

A intensidade sonora (I) é definida como a quantidade média de energia, na unidade de tempo, que atravessa uma área unitária perpendicular à direção de propagação da onda. Como energia na unidade de tempo é potência (watts), então a unidade de intensidade sonora é o watt por metro quadrado (W/m^2).

A potência sonora é uma característica da fonte quantificada em Watt (W). Fisicamente é a energia total que num segundo atravessa uma esfera fictícia pulsante de raio qualquer centrada na fonte sonora (BISTAFA, 2018).

A intensidade, potência e pressão sonora relacionam-se através da expressão (BISTAFA, 2018):

$$I_r = \frac{W}{4 * \pi * r^2} * \frac{p^2 \text{ eficaz}}{\rho * c} \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

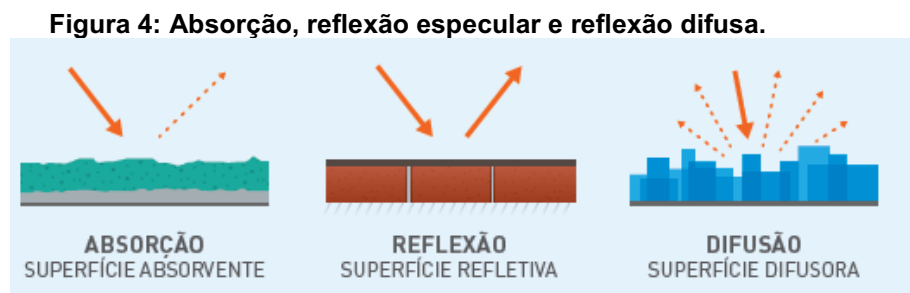
I_r - Intensidade sonora (W/m^2);

W - Potência sonora (W);

- r - Distância (m);
- p - Pressão sonora (Pa);
- ρ - Massa volumétrica (ar $\approx 1,2 \text{ kg/m}^3$);
- c - Velocidade de propagação (m/s).

3.4 REFLEXÃO SONORA

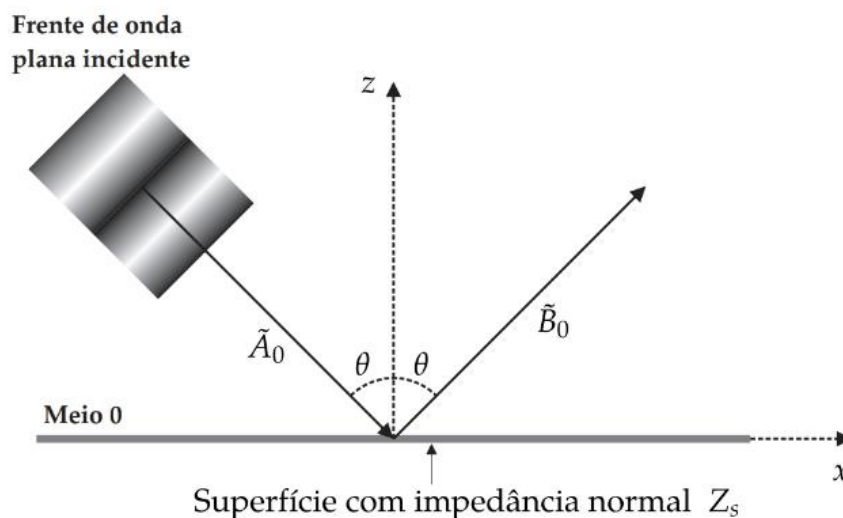
Ao se propagar em uma sala, uma onda sonora encontra inúmeras superfícies em seu caminho. Ao atingir uma superfície, essa frente de onda sofrerá três fenômenos: absorção, reflexão especular e reflexão difusa (BRANDÃO, 2016). A Figura 4 ilustra esses fenômenos.



Fonte: PROACÚSTICA (2019).

A reflexão especular representa a parte da energia sonora, incidente sobre um material, ao qual retorna praticamente inalterada ao ambiente. Isso acontece quando o raio sonoro refletido forma o mesmo ângulo com a linha normal à superfície da amostra (BRANDÃO, 2016). Esse fenômeno é visualizado com clareza na Figura 5.

Figura 5: Reflexão de uma onda plana no ar em um sistema representado por uma impedância Z_s .



Fonte: Brandão (2016).

A reflexão difusa ocorre quando parte da energia sonora é refletida em várias direções além da direção especular. Isso está relacionado ao fato da onda incidir sobre superfícies finitas com irregularidades em maior e menor grau. No projeto acústico de uma sala, é imprescindível conhecer os efeitos da difração: reflexão difusa em superfícies irregulares (comprimentos de onda iguais ou menores que a profundidade das irregularidades); transmissão em torno de superfícies finitas (comprimento de onda muito maior que as dimensões do aparato) e a reflexão difusa nas bordas de superfícies finitas (BRANDÃO, 2016).

De acordo com ProAcústica (2019), os elementos difusores podem ser projetados especificamente para o condicionamento do som dentro de um ambiente. A reflexão sonora quando explorada arquitetonicamente, através da utilização de superfícies refletoras com diversos formatos e direcionamento apropriados, é um notável instrumento que permite o aumento da intensidade do nível sonoro e homogeneidade na distribuição do som no espaço. Esse recurso é bastante utilizado em auditórios, com objetivo de intensificar o nível sonoro em lugares mais afastados da fonte, onde é comum haver uma diminuição na intensidade do som direto (SOUZA, et al., 2012).

3.5 ABSORÇÃO SONORA

Ao incidir sobre uma superfície, as ondas sonoras têm parte de sua energia refletida, parte transmitida, e outra parte é absorvida pelo material. A absorção sonora relaciona-se entre as energias absorvidas e transmitidas, por elementos com capacidade de dissipar a energia do som em uma outra modalidade de energia, normalmente a térmica. Possibilitando assim a criação de condições de conforto acústico no ambiente (PROACÚSTICA, 2019).

A absorção é medida através do coeficiente de absorção sonora, e é definido como a razão entre as energias absorvida e incidente em um material (BRANDÃO, 2016). Representado na Equação 4 abaixo de acordo com Souza, et al. (2012):

$$\alpha = \frac{E_{\text{abs}}}{E_{\text{inc}}} \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

α - Coeficiente de absorção sonora;

E_{abs} - Energia sonora absorvida;

E_{inc} - Energia sonora incidente.

Segundo Cox e D'Antonio (2017) o coeficiente de absorção sonora varia de 0 a 1, o valor nulo representa um material totalmente refletor com nenhuma absorção, e o valor unitário apresenta absorção completa da energia incidente. Existem dois métodos normatizados para medição do coeficiente de absorção sonora: método do tubo de impedância por incidência normal e o método da câmara reverberante por incidência difusa, além de existir vários métodos de medição em sítio (BRANDÃO, 2016)

Os dispositivos de absorção acústica podem ser divididos em duas categorias: absorvedores do tipo porosos e dispositivos ressonantes (COX; D'ANTONNIO, 2017). É relevante equilibrar a quantidade de absorção em função da frequência, ao realizar o tratamento acústico de um espaço. Os materiais porosos são mais eficientes nas altas frequências, os ressonadores de Helmholtz, placas perfuradas, painéis e membranas são mais eficientes nas médias e baixas frequências ou para absorver em uma única frequência (BRANDÃO, 2016).

Os materiais absorventes têm a capacidade de regular a quantidade de absorção do som dentro do ambiente. De modo igual aos materiais, o ser humano também age como elemento absorvedor de energia sonora. Em razão disso, grande parte da absorção sonora nos auditórios é resultado da presença da platéia (SOUZA, et al., 2012).

3.6 ISOLAMENTO ACÚSTICO

O isolamento acústico é fundamental para o controle do ruído nos ambientes, e pode ser definido como à capacidade dos materiais em minimizarem a transmissão do som de um recinto a outro (PROACÚSTICA, 2019). Essa propriedade é ilustrada através da Figura 6.



Fonte: PROACÚSTICA (2019).

Os sons indesejáveis podem ser transmitidos pelo ar e pelos materiais sólidos de uma edificação. Dado que os sons gerados pelas estruturas das edificações são trabalhosos de controlar, é recomendado isolá-los em suas fontes geradoras. Observa-se uma redução de ruído entre dois espaços fechados, quando os níveis de pressão sonora são diferentes entre eles (CHING; BINGGELI, 2013). Conforme Ching e Binggeli (2013) isso pode ser provocado por:

- Perda de transmissão entre parede, piso e teto;
- Absortância do espaço receptor;
- Nível de mascaramento ou do som ambiente, que pode diminuir a percepção dos sons que nos perturbam.

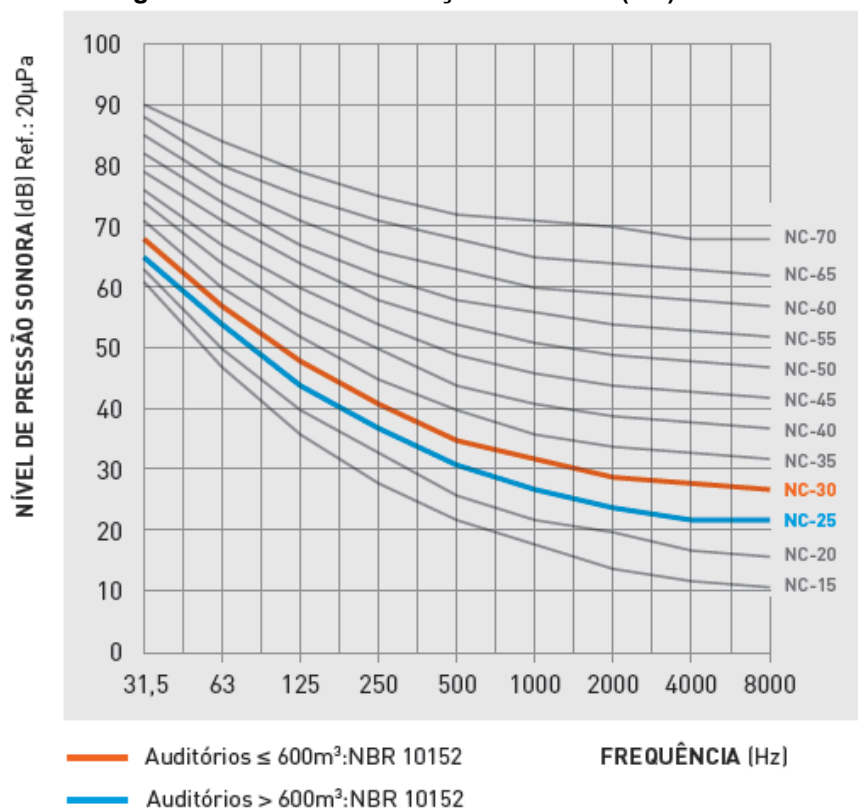
Os ruídos existentes em um espaço interno, podem ser provenientes de atividades desenvolvidas externamente à edificação ou dentro do próprio ambiente, e são denominados como ruído de fundo (SOUZA, et al., 2012). O som de fundo caracteriza-se por apresentar variação de intensidade sonora, e portanto pode auxiliar na anulação ou mascaração de ruídos indesejados, contribuindo assim para acústica dos ambientes (CHING; BINGGELI, 2013).

De acordo com Souza, et al. (2012), o modo de tratamento para a redução de sons discordantes varia com o tipo de ruído considerado. Os ruídos aéreos são tratados por meio de sistemas construtivos de isolamento. Enquanto os ruídos de impacto e vibração através da isolação de um único elemento construtivo avaliado em laboratório.

Os parâmetros que caracterizam o isolamento acústico entre recintos são: o índice de redução sonora (R_w), que é o parâmetro de valor único ao qual define o isolamento do som a ruídos aéreos, de um determinado material ou elemento construtivo; a diferença padronizada de nível ponderada ($D_{nt,w}$) é o índice que caracteriza em campo, o isolamento sonoro a ruídos aéreos entre divisórias verticais internas ou entre sistemas de pisos e o nível de pressão sonora de impacto padrão ponderado ($L'_{nt,w}$), que caracteriza em campo o isolamento a ruído de impacto de sistemas de pisos para determinadas bandas de frequências (PROACÚSTICA, 2019).

Relacionado ao ruído de fundo residual, existe outro critério de conforto acústico: as curvas de classificação de ruídos NC. Esse requisito identifica o ruído residual por meio de um valor único, baseado nos níveis de pressão sonora equivalente em bandas de oitava (PROACÚSTICA, 2019). Na Figura 7 encontram-se representadas as curvas NC, determinadas pela NBR 10152:2017.

Figura 7: Curvas de avaliação de ruídos (NC).



* Critérios estabelecidos pela ABNT NBR 10152: 2017

Fonte: PROACÚSTICA (2019).

A utilização do material adequado para as diferentes situações de ruído é de suma importância no projeto de isolamento acústico, devido que os materiais utilizados nos métodos de tratamento possuem características e finalidades divergentes entre si, como as funções de isolamento e absorção (SOUZA, et al., 2012). De acordo com ProAcústica (2019) é necessário a realização de ensaios laboratoriais normatizados, para realizar uma comparação do desempenho entre os materiais, possibilitando a escolha mais apropriada.

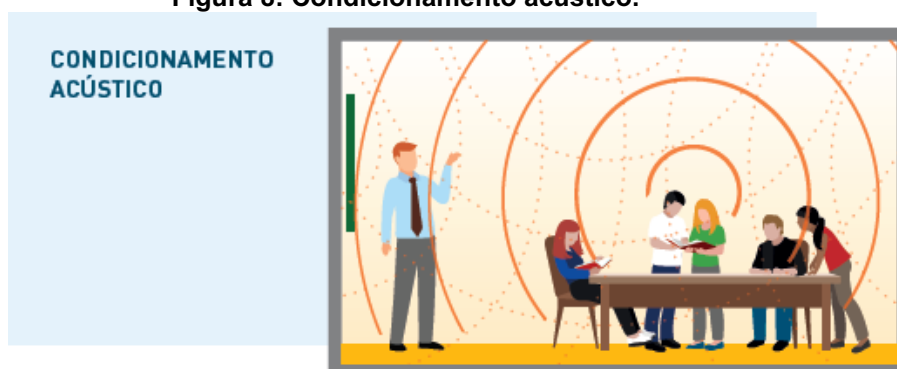
3.7 CONDICIONAMENTO ACÚSTICO

O condicionamento acústico está relacionado com a qualidade acústica interna dos ambientes, focando na modelagem das propriedades de absorção, reflexão e difusão dos materiais utilizados. A representação do condicionamento acústico pode ser visualizado na Figura 8. Com o avanço da tecnologia, os equipamentos de medição se tornaram muito mais precisos, possibilitando simulações

e medições adequadas à qualidade acústica de espaços, por meio do mapeamento dos padrões presentes nesses locais (PROACÚSTICA, 2019).

Muitos parâmetros acústicos foram desenvolvidos para quantificar objetivamente o comportamento do som no ambiente, relacionando-os com a capacidade auditiva do ser humano (PROACÚSTICA, 2019). Um projeto de condicionamento acústico visa o controle de alguns parâmetros conforme a finalidade de uso em questão, como o tempo de reverberação (TR), a inteligibilidade da palavra, clareza, entre outros.

Figura 8: Condicionamento acústico.

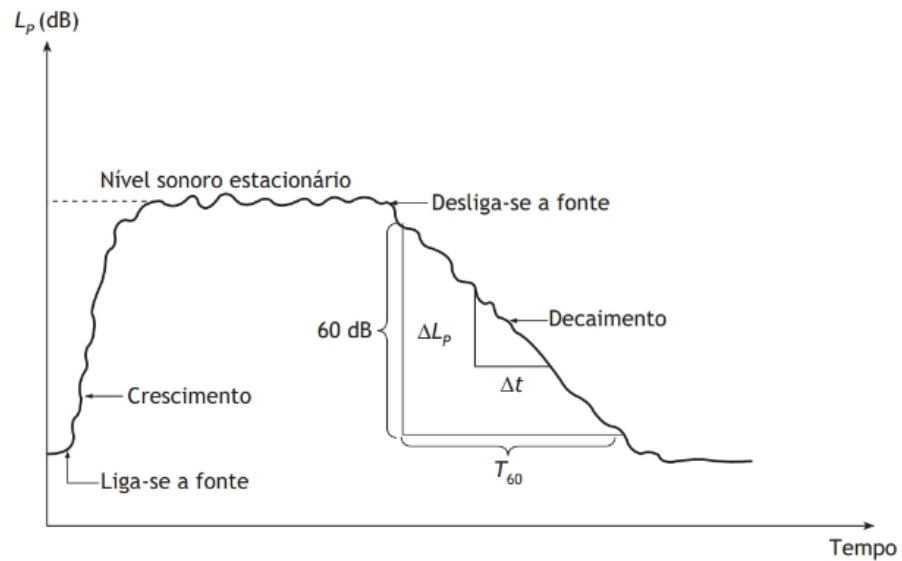


Fonte: PROACÚSTICA (2019).

3.8 TEMPO DE REVERBERAÇÃO

De acordo com Bistafa (2018) o tempo de reverberação (TR) é definido como o tempo necessário para que o nível de pressão sonora de um som em um ambiente caia 60 dB, depois da interrupção da emissão sonora da fonte. Na Figura 9, é expresso em segundos o tempo de reverberação, representado por T60.

Figura 9: Tempo de reverberação (T60).

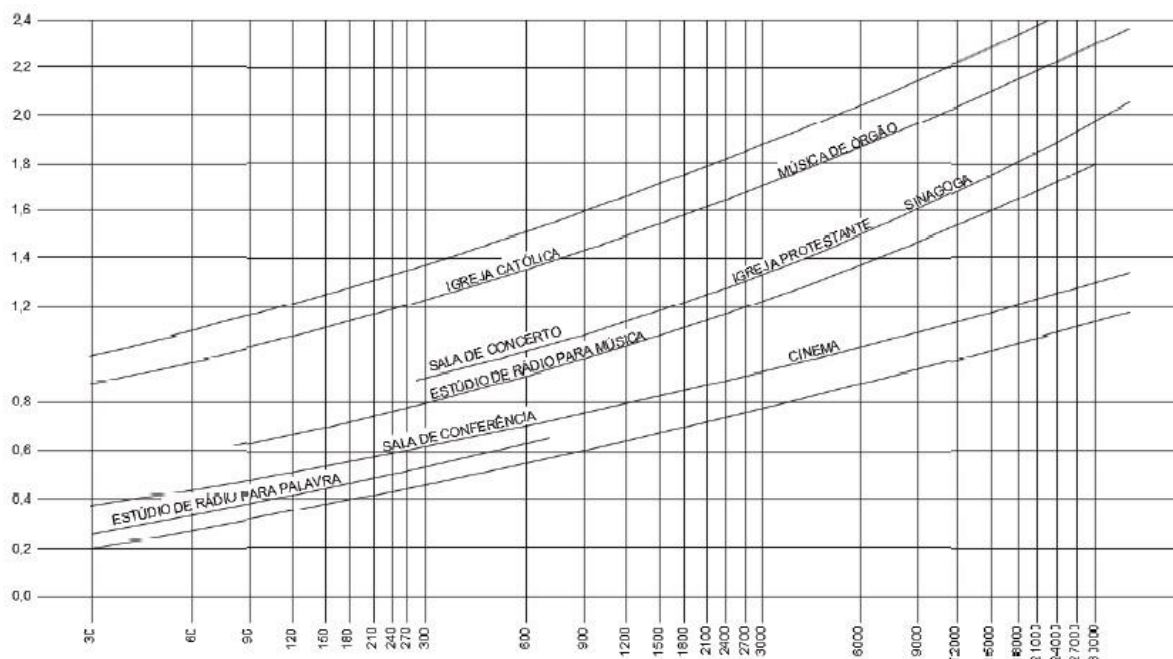


Fonte: BISTAFA (2018).

O tempo de reverberação tem grande influência no modo em que captamos os sons. ProAcústica (2019) descreve que em uma sala de aula é exigido um tempo de reverberação pequeno, para não comprometer o entendimento das palavras, ao contrário de uma igreja gótica ou uma sala de concertos, onde o som de um órgão tem um aumento expressivo do nível sonoro devido ao elevado tempo de reverberação presente no ambiente. Por isso é recomendado adequar os tempos de reverberação para recintos de diversas finalidades de uso, conforme a Figura 10 em uma frequência de 500 Hz.

De acordo com Bistafa (2018), o tempo de reverberação tem efeito negativo na redução da inteligibilidade da palavra, por meio do mascaramento dos sons diretos, caracterizados pela sobreposição do som refletido ao som direto. É efeito positivo no aumento do nível sonoro, devido o som refletido intensificar o som direto.

Figura 10: Gráfico dos valores adequados em 500 Hz para TR.



Fonte: NBR 12179 (1992).

Segundo Bistafa (2018), o tempo de reverberação pode ser estimado de acordo com o trabalho de Sabine, desenvolvido no ano de 1896 no campo da acústica estatística, considerando o tempo de reverberação, o volume do ambiente, a absorção dos materiais e suas dimensões. A relação ficou conhecida como fórmula de Sabine:

$$T_{60} = \frac{0,161 * V}{A} \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

T_{60} - Tempo de reverberação (s);

V - Volume da sala (m^3);

A - Absorção sonora equivalente (m^2), com a definição da expressão:

$$A = \sum_i^n \alpha_i * S_i \quad \text{Equação 6}$$

Onde:

A - Absorção sonora equivalente (m^2);

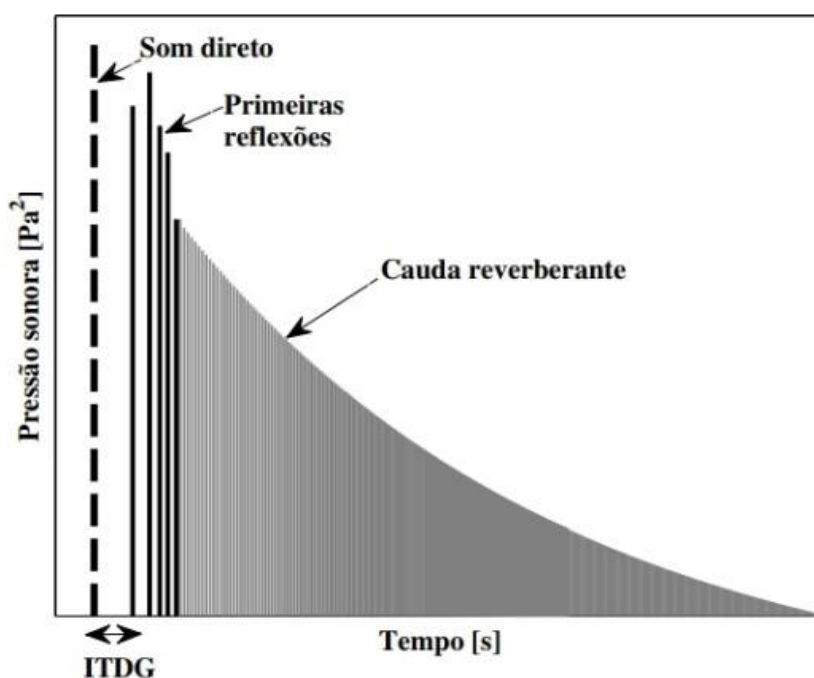
α_i - Coeficiente de absorção sonora do material i (adimensional);

S_i - Superfície real do material i (m^2).

Para medições do tempo de reverberação em campo, devem ser seguidas orientações das normas ABNT NBR ISO 3382-1:2017 e ABNT NBR ISO 3382-2:2017. As medições consistem na análise do decaimento da energia sonora em um recinto em função do tempo decorrido após a interrupção da fonte sonora (RIBEIRO, 2020).

Relacionado ao tempo de reverberação, o *Early Decay Time* (EDT) ou Tempo de Decaimento Inicial, é um parâmetro acústico objetivo definido como o intervalo de tempo em segundos, necessário para que o nível de pressão sonora após a interrupção da emissão da fonte em um ambiente caia 10 dB. O EDT é similar ao T20 e T30, porém ele mensura a inclinação da curva de decaimento em seus instantes iniciais conforme pode ser visualizado na Figura 11 (BRANDÃO, 2016).

Figura 11: Reflectograma típico de uma configuração sala-fonte-receptor, mostrando o som direto, primeiras reflexões, ITDG e cauda reverberante.



Fonte: Brandão (2016).

3.9 INTELIGIBILIDADE DA FALA

A inteligibilidade da fala é a propriedade acústica que caracteriza a capacidade de um som de ser entendido. Dentro de um ambiente como os auditórios,

é compreendida como uma medida da dificuldade do som em ser captado pelo aparelho auditivo humano. Dentre alguns fatores que influenciam esse parâmetro acústico, estão: o nível de pressão sonora do ruído residual na sala x nível de pressão sonora da voz ou do sistema de reforço eletroacústico; a distância entre fonte sonora e ouvintes e a quantidade de absorção sonora presente no local (PROACÚSTICA, 2019).

Bistafa (2018, p. 385) define inteligibilidade da fala como: “ a relação entre palavras faladas por um orador e entendidas por ouvintes, pode ser medida por meio de métodos subjetivos, um dos quais utiliza sílabas padronizadas ”.

Um dos métodos objetivos para determinar o grau da inteligibilidade da palavra é o *Speech Transmission Index* (STI) ou Índice de Transmissão da Fala. O cálculo do parâmetro é considerado complexo, e está amparado na atuação do nível de ruído de fundo e reverberação da sala no aspecto da distorção e recebimento sonoro. O STI com valor acima de 0,60 corresponde a uma boa qualidade da percepção da palavra (BRANDÃO, 2016).

3.10 CLAREZA

Clareza é o parâmetro acústico medida na escala decibel, utilizada para caracterizar a transparência da música em salas de concerto, relacionados à capacidade subjetiva de distinguir sons em sequência. Esses locais onde a inteligibilidade da palavra é o fator preponderante, planeja-se uma grande claridade (PINTO, 2012).

A inteligibilidade da música está relacionada à claridade, ao fato de que as primeiras reflexões, que chegam dentro de até 50 ou 80 ms, tendem a ser somadas ao som direto pelo sistema auditivo humano. Deste modo, se houver muita energia nas primeiras reflexões, o som direto devido a cauda reverberante, propende a ser experimentado como amplificado. Antagônico a isto, ou seja, se houver baixa energia e/ou se a cauda reverberante for longa, esta última terá mais expressividade, e irá mascarar o próximo som direto que alcança o ouvinte (BRANDÃO, 2016).

De acordo com Brandão (2016), é indicado que um ótimo valor limite para avaliações da qualidade acústica em ambientes destinados à música, seja de 80 ms.

E para avaliações da qualidade acústica em ambientes destinados à fala, seja de 50 ms. Os parâmetros são expostos através das equações abaixo.

$$C_{50} = 10 \log * \left(\frac{\int_0^{50\text{ms}} h^2(t) dt}{\int_0^{\infty} h^2(t) dt} \right) \quad \text{Equação 7}$$

Onde:

C_{50} - Clareza para voz (dB);

h - Energia sonora do som a resposta impulso.

$$C_{80} = 10 \log * \left(\frac{\int_0^{80\text{ms}} h^2(t) dt}{\int_0^{\infty} h^2(t) dt} \right) \quad \text{Equação 8}$$

Onde:

C_{80} - Clareza para música (dB);

h^2 - Energia sonora do som a resposta impulso.

3.11 DEFINIÇÃO

A definição é um parâmetro acústico objetivo, relacionado a situações da inteligibilidade da fala, tendo como um limite indicado para avaliações de salas de 50 ms. É medida em escala linear (dB) através da Equação 9 (BRANDÃO, 2016).

$$D_{50} = \frac{\int_0^{50\text{ms}} h^2(t) dt}{\int_0^{\infty} h^2(t) dt} \quad \text{Equação 9}$$

Onde:

D_{50} - Definição (dB);

h^2 - Energia sonora do som a resposta impulso.

3.12 TEMPO CENTRAL

O Tempo Central (T_s) é um parâmetro acústico objetivo, que também refere-se ao balanço entre as energias contidas nas primeiras reflexões e na cauda reverberante. Sendo o ponto no tempo onde a energia sonora recebida caracteriza-se como a metade da energia total obtida pelo ouvinte, ou seja, o centro de gravidade da energia de uma resposta ao impulso. Valores elevados e pequenos de T_s , representam respectivamente a uma resposta ao impulso, com muita reverberação na cauda e energia centralizada nas primeiras reflexões. Dessa maneira, o conceito de tempo central é definido através da Equação 10 abaixo (BRANDÃO, 2016).

$$T_s = \left(\frac{\int_0^{\infty} t h^2(t) dt}{\int_0^{\infty} h^2(t) dt} \right) \quad \text{Equação 10}$$

Onde:

T_s - Tempo Central (s);

h^2 - Energia sonora do som a resposta impulso.

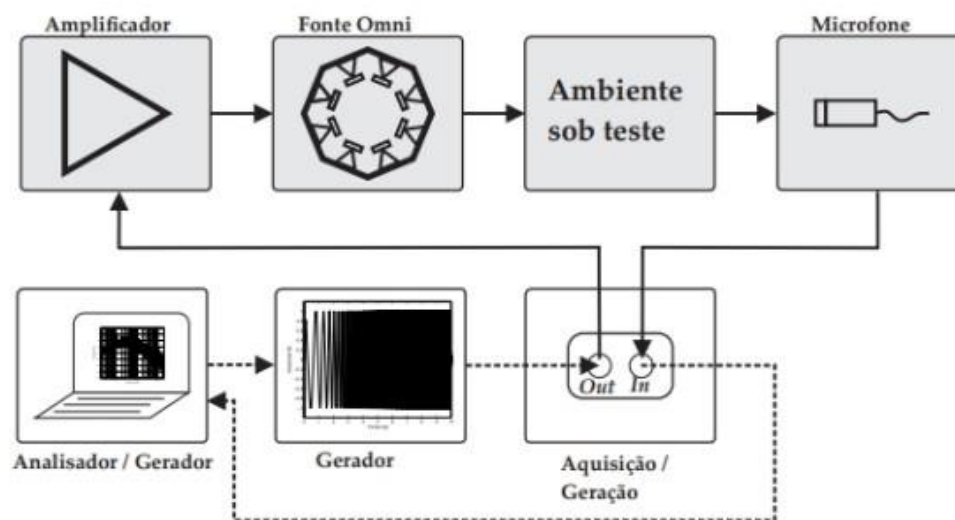
3.13 MÉTODOS DE MEDIÇÃO

A NBR 3382-1:2017 especifica os métodos para medição dos parâmetros acústicos de salas de espetáculos, bem como os equipamentos necessários, os procedimentos estatísticos e cálculo das incertezas de medições. O método da resposta impulsiva é utilizado para obter curvas de decaimento do nível de pressão sonora a partir da resposta ao impulso da configuração da sala, fonte e receptor. Os equipamentos necessários para medição consistem em um gerador de sinais, fonte sonora omnidirecional, microfones, um amplificador, placas de aquisição de sinais e um computador para processamento e análise dos dados. O esquema de ligação e o fluxo de sinais dos instrumentos, podem ser visualizados na Figura 12 (Brandão, 2016).

O método do ruído interrompido segundo Brandão (2016), consiste no levantamento do decaimento da pressão sonora, após a excitação da sala com um

ruído de banda larga ou limitado em banda de frequência (ruído branco, rosa), até que o ambiente se encontre no estado estacionário, e a fonte seja desligada.

Figura 12: Cadeia de ligação dos equipamentos medição resposta impulsiva.



Fonte: Brandão (2016).

3.14 ACÚSTICA EM AUDITÓRIOS E TEATROS

Os auditórios são definidos como espaços para comunicação da palavra falada, cantada ou musical. O termo é derivado do latim, *auditorium*, que significa espaço onde se ouve, e abrangem as pequenas salas de aula, incluindo também grandes salas para concertos e teatros (BISTAFA, 2018).

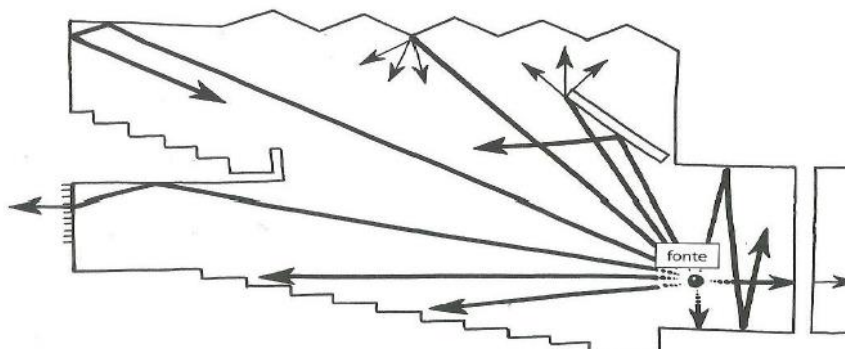
O objetivo em um projeto de acústica de auditórios em ambientes fechados, é caracterizar o recinto de maneira apropriada acusticamente, concernente a todas as atividades desenvolvidas no espaço (BRANDÃO, 2016). Segundo Bistafa (2018), na acústica de salas, existem particularidades subjetivas para cada finalidade de uso do projeto. Por exemplo, em uma sala com fim musical, um atributo subjetivo importante, é perceber o envolvimento sonoro provocado pela música. Essas sensações têm fundamental importância, para o estabelecimento de uma correlação com as propriedades sonoras aplicáveis nos ambientes, através de parâmetros e índices específicos.

As características construtivas de um auditório, como aspectos gerais referente às dimensões e formas arquitetônicas, são o ponto inicial de um projeto.

Posteriormente um estudo do ruído ambiental presente no ambiente, para estabelecer um bom isolamento acústico aos sons externos indesejáveis. O isolamento acústico necessário, também passa por um estudo das fontes sonoras atuantes no recinto interno, a fim de não provocar ruídos para as áreas externas da construção. Na adequação acústica interna de uma sala, é preciso definir por pressuposição os parâmetros objetivos essenciais, juntamente com seus valores recomendados normativamente. Essa definição das métricas acústicas, refere-se às necessidades características executadas em uma sala, destinadas por exemplo para falas, cinema, espetáculos, multiuso, ou tanto para música quanto para a palavra falada (BRANDÃO, 2018).

Brandão (2016) esclarece a importância em compreender a interação das ondas sonoras com a geometria e dimensões dos materiais, utilizados nos projetos de isolamento e absorção do som, como as superfícies de tetos, pisos, paredes, poltronas, pessoas, etc. Como resultado dessa interação (resposta acústica da sala), a energia sonora se distribui pelo espaço, sendo necessário o conhecimento dos métodos de controle sonoro, para obtenção do equilíbrio adequado dos valores dos parâmetros objetivos, em função da frequência e da posição dos receptores. Contemplando também a eliminação dos defeitos acústicos, como ecos, reflexões tardias e zonas de sombra. Na Figura 13, apresenta-se a propagação das ondas sonoras dentro de um ambiente fechado, sendo possível visualizar as múltiplas reflexões nas superfícies dentro do recinto.

Figura 13: Propagação sonora dentro de ambientes fechados.



Fonte: Moore (1988) apud Souza et al. (2012).

3.14.1 Auditório com Fins Múltiplos

Os auditórios multiusos, são classificados como espaços de uso flexível, onde é necessário incorporar ótimas características para palavra falada e também para música. Normalmente leva-se em consideração a aplicação de um sistema de sonorização (BRANDÃO, 2016).

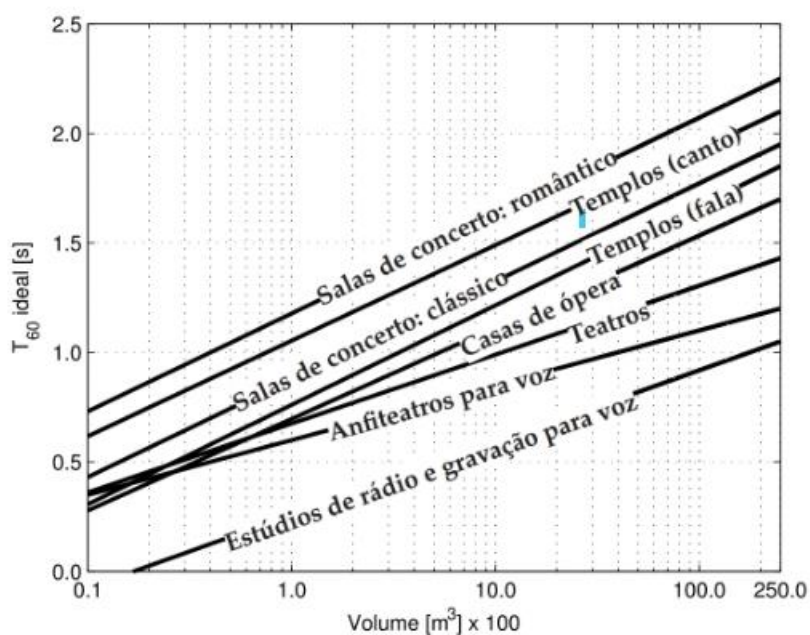
É de competência dos profissionais envolvidos em um projeto de sala com fins múltiplos, o estabelecimento da forma mais adequada de abordagem para o problema. Dado que as variedades das fontes sonoras, exigem características divergentes entre si. Uma alternativa é elencar as principais atividades desenvolvidas no ambiente, classificando-as em ordem de prioridade. Isso é uma forma de estabelecer prevalência de uma atividade em detrimento da outra, resultando em uma direção para o plano de projeto. Outra alternativa, é a compatibilização das atividades através de uma solução intermediária, satisfazendo assim os critérios comuns, no entanto deixando alguns aspectos acústicos que não irão ser atendidos (SOUZA, et al., 2012).

De acordo com Souza, et al. (2012), os requisitos necessários para um bom desempenho acústico em geral, correspondem a uma boa inteligibilidade do som, tempo de reverberação adequado, distribuição sonora uniforme e um bom isolamento acústico. Nos casos de salas com grandes plateias, onde a fonte sonora de interesse tem potência limitada em relação ao volume do ambiente, é fundamental o reforço sonoro através de sistemas de sonorização, como equipamentos de amplificação. Todos esses requerimentos técnicos, exigem análises com relação às superfícies, formas, volumes, posicionamento e materiais, das soluções de sistemas propostos para obtenção do controle acústico no recinto.

As características acústicas de um auditório multiuso, dependem de diversos fatores, como a geometria do ambiente, determinação da dimensão, arranjo e inclinação da plateia, determinação do piso da plateia, orientação de paredes e forros, definição do modelo das poltronas e altura do palco. Nas áreas de circulação uma opção é a utilização de carpetes, para diminuir o ruído gerado pela movimentação das pessoas. A partir da definição básica do número de assentos, arranjo da plateia e palco, é possível estabelecer o volume da sala por meio da relação volume por assento e verificar se está de acordo com os valores recomendados (BRANDÃO, 2016).

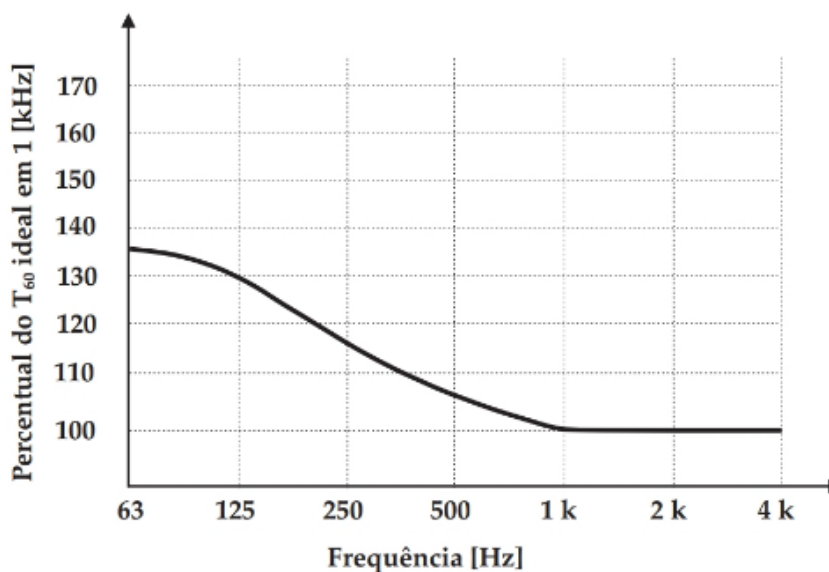
Brandão (2016) descreve que o tempo de reverberação ideal pode ser definido com base na Figura 14 em função do volume de diversos tipos de ambiente. Em auditórios onde a prioridade é a fala, a variação do tempo de reverberação com a frequência pode ser mantido constante, já para os auditórios onde a prioridade é a música, a variação do tempo de reverberação com a frequência pode ser tomado como base na Figura 15.

Figura 14: Tempo de reverberação ideal para diversos tipos de ambientes.



Fonte: Brandão (2016).

Figura 15: Variação do tempo de reverberação com a frequência para auditórios com prioridade a música.



Fonte: Brandão (2016).

3.15 MODELAGEM ACÚSTICA

A acústica de salas é a área da acústica responsável por estudar a modelagem da propagação sonora dentro de um ambiente, como salas de aula, teatros, igrejas, cinemas etc. Possibilitando assim, uma análise do ambiente a ser construído através de simulações acústicas dos elementos construtivos, resultando em soluções de condicionamento e isolamento acústico mais adequados para a finalidade do projeto. Existem diferentes ferramentas para modelar acusticamente uma sala, são duas as principais técnicas: utilização de métodos da acústica geométrica e métodos numéricos da equação da onda (BRANDÃO, 2016).

3.15.1 Modelagem Geométrica

A acústica geométrica é baseada na propagação retilínea da energia sonora entre fonte e receptor, levando em consideração a geometria da sala, como paredes e superfícies. Sua elaboração prática demanda um *software* dedicado, como por exemplo os *softwares* comerciais, *ODEON*, *CATT*, *RAIOS* etc., e *softwares* gratuitos, como o *I-SIMPA*. (BRANDÃO, 2016).

Brandão (2016) esclarece que para modelar o campo sonoro em um recinto, primeiramente é necessário ter o conhecimento da geometria tridimensional interna do ambiente, contendo todas as suas paredes, móveis e aparatos interiores, desenhados tridimensionalmente com o auxílio de *softwares* como *AutoCAD*, *SketchUp*, *Revit*, *FormIt*, etc. Para posteriormente toda essa geometria ser importada por *softwares* de acústica. Também é preciso definir a natureza das fontes sonoras e suas características, além da posição dos receptores. Por último, conceder os parâmetros acústicos coeficientes de absorção e espalhamento sonoro, dos materiais que constituem o espaço. Assim, a partir desses dados o programa computacional poderá simular o comportamento sonoro no ambiente, obtendo resultados dos parâmetros objetivos, curvas de decaimento e respostas ao impulso.

3.16 SOFTWARE I-SIMPA

O *software I-SIMPA* é um programa computacional gratuito e de código aberto, desenvolvido no Instituto Francês de Ciência e Tecnologia para Transporte, com intuito de simular o comportamento do som em ambientes fechados, caracterizando a acústica de uma sala. A simulação é separada em 3 abas, a primeira destinada a editar e simular (*Scene*), a segunda em editar as propriedades dos cálculos (*Calculation*) e por último o fornecimento dos resultados (*Results*). O *software* é capaz de calcular diversos parâmetros, como o tempo de reverberação (TR), clareza (C), tempo central (T_s), definição (D), tempo de decaimento inicial (EDT), nível de pressão sonora (NPS) etc (GAUDEOSO; BARBO; BRANDÃO, 2018).

De acordo com o estudo de Gaudeoso, Barbo e Brandão (2018) os dois métodos utilizados para os cálculos do programa, estão disponíveis nos códigos numéricos TCR (sigla francesa para *Theorie Classique de la Réverbération*) baseado na teoria clássica de reverberação e SPPS (sigla francesa para *Simulation de la Propagation de Particules Sonores*) baseado no método de traçado de partícula. O *software* permite a criação e importação de geometrias e superfícies diversas. Onde os cálculos podem ser realizados para receptores pontuais, com a finalidade de obtenção dos parâmetros acústicos e para as superfícies receptoras, responsáveis pelos mapas de distribuição sonora no ambiente simulado. O *I-SIMPA* é uma ótima ferramenta de estudo e simulação de projetos, que necessita ser complementada com

uma análise comparativa dos resultados provenientes de medições realizadas *in loco*, para a validação dos cálculos computacionais.

4 METODOLOGIA

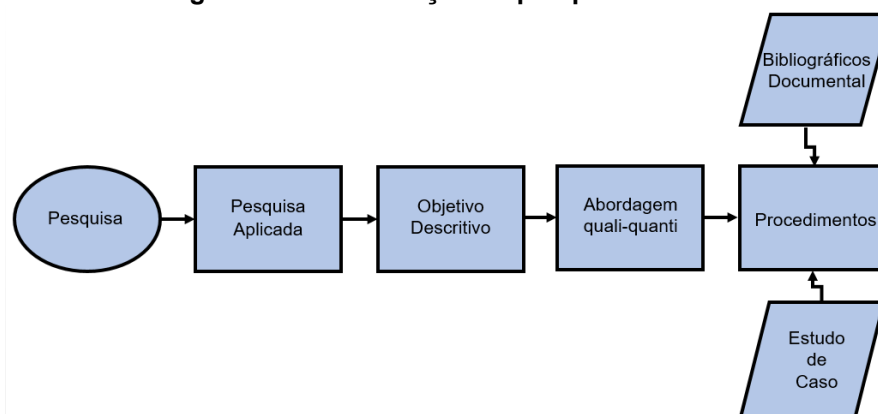
Essa pesquisa classifica-se como de natureza aplicada. Devido ao objetivo da pesquisa aplicada em adquirir conhecimento para aplicação prática, a fim de obter solução de um problema específico, que neste trabalho é a caracterização e condicionamento acústico do Teatro Municipal de Guarapuava. Os tipos de problemas encontrados para esta pesquisa são enquadrados como problemas complexos, em função do alto grau de dificuldade dos fatores que envolvem as medições e simulações acústicas do ambiente em estudo (LAKATOS, 2017).

Em relação aos tipos de pesquisa, foram utilizados neste trabalho os tipos descritivo e exploratório. Quanto aos estilos da pesquisa, este trabalho é um estudo de caso juntamente com o estilo experimental (LAKATOS, 2017). Como estudo de caso será utilizado o Teatro Municipal de Guarapuava. O objetivo é caracterizar acusticamente o objeto de estudo, por meio de medições de parâmetros acústicos de forma padronizada normativamente. A análise experimental dar-se-á através de simulações computacionais do comportamento sonoro dentro do recinto em estudo, por meio do *software I-SIMPA*.

A pesquisa é classificada quanto a sua abordagem, como quali-quantitativa, com realização de coleta de dados a partir de medições acústicas padronizadas no ambiente de estudo, com conseqüente análise. Com objetivo de compreender detalhadamente os significados e características dos resultados adquiridos.

A Figura 16 apresenta a classificação da pesquisa por meio de um fluxograma:

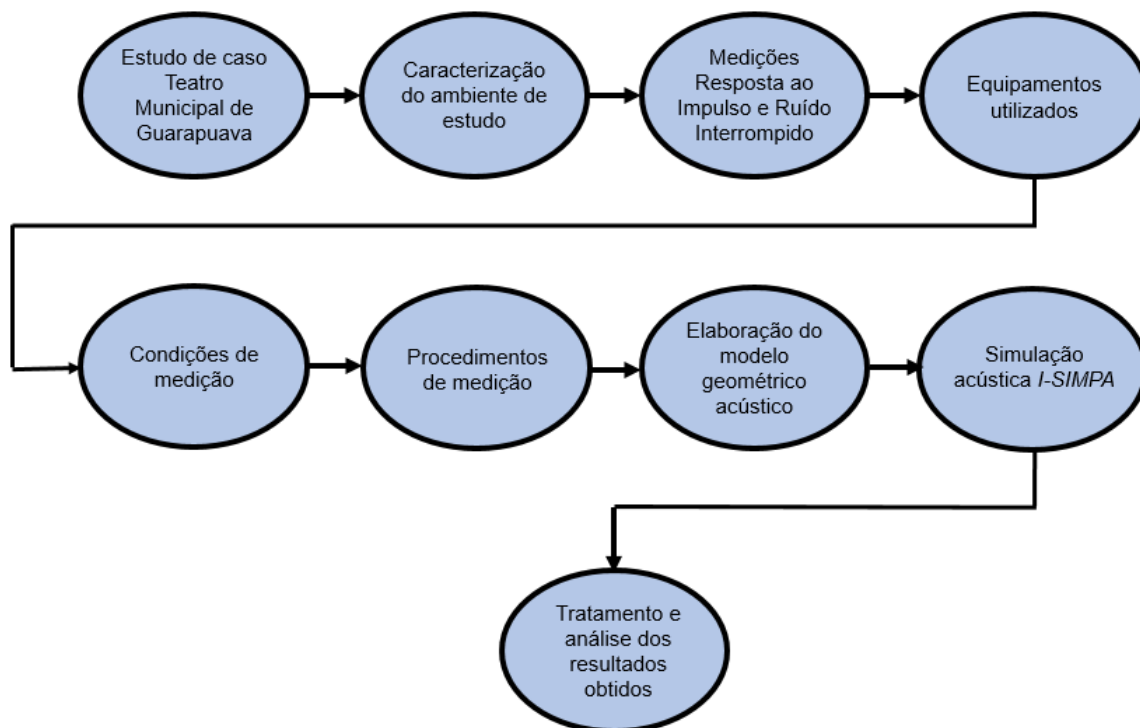
Figura 16: Classificação da pesquisa.



Fonte: Autor (2020).

Foi estabelecida uma sequência de atividades para o desenvolvimento da pesquisa e deliencamento do estudo de caso, que consiste nas etapas organizadas conforme a Figura 17.

Figura 17: Sequência de atividades para delineamento do estudo de caso.



Fonte: Autor (2021).

4.1 ESTUDO DE CASO TEATRO MUNICIPAL DE GUARAPUAVA

O espaço em estudo é o Teatro Municipal de Guarapuava, localizado na Rua Padre Chagas, nº3151, na área central da cidade, ao lado da Escola Municipal Antônio Lustosa de Oliveira. O espaço é considerado como um dos teatros mais modernos do estado do Paraná, servindo como polo cultural para os municípios da região, recebendo apresentações teatrais, musicais e principalmente atividades que priorizam a palavra falada. Caracterizando o auditório como uma sala de uso múltiplo, privilegiando a percepção da fala. Nas Figuras 18 e 19 é possível visualizar a localização do Teatro em Guarapuava.

Figura 18: Vista fachada Teatro Municipal de Guarapuava.



Fonte: Zacalusni (2018).

Figura 19: Vista aérea da localização urbana do Teatro Municipal de Guarapuava.



Fonte: Adaptada de Google Earth (2021).

4.2 CARACTERIZAÇÃO DO AMBIENTE DE ESTUDO

Moderno e amplo, o Teatro Municipal de Guarapuava foi inaugurado no dia 8 de junho de 2018, e possui estrutura com capacidade para 316 lugares, com uma área

total construída de 1.140 m² e palco profissional com dimensões de 10.20 m de boca de cena, 18.40 m de fundo de palco e 9.45 m de profundidade. O espaço conta com 1 camarim feminino, 1 camarim masculino, 1 sala de ensaios, 1 cabine de luz e som e 1 chapelaria. Além do hall de entrada com vista para cidade, bilheteria, iluminação e sonorização, cortina cênica, cenários móveis, fundo branco para projeções, central de operação, banheiros masculinos, femininos e PNE.

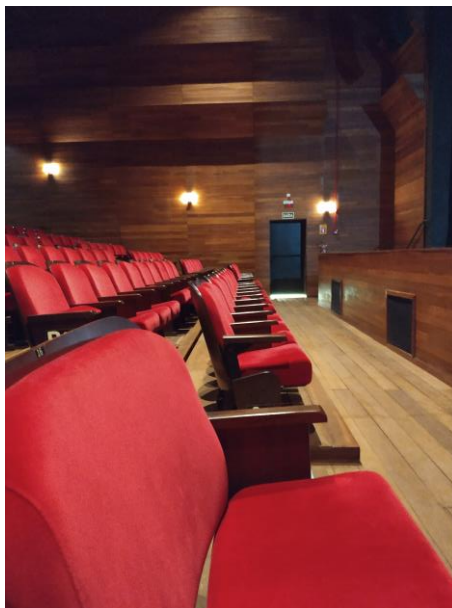
O palco tem uma elevação de 1.15 m em relação ao piso do ambiente principal do Teatro, sendo executado em concreto armado com acabamento fixo no piso utilizando pranchas de madeira nobre Itaúba, *Mezilaurus itauba*. Os assentos são do tipo poltrona, também em madeira nobre com estofamento de tecido.

O condicionamento acústico do Teatro é todo trabalhado com madeiras nobres, conforme Figura 20, o piso é de Itaúba, *Mezilaurus itauba*, e os lambris nas paredes, difusores e nos painéis angulados no forro em Cumaru, *Dipteryx odorat*.

A inclinação da plateia é de 6%, com escalonamento em degraus. O espaço é totalmente acessível com rampas e atende todas as especificações técnicas de circulação e movimentação dos usuários conforme NBR 9050.

Figura 20: Vista interna do Teatro Municipal de Guarapuava.





Fonte: Autor (2021).

A síntese das características dimensionais construtivas do espaço, são apresentadas através do Quadro 1.

Quadro 1: Características construtivas Teatro Municipal de Guarapuava.

Características arquitetônicas	Valores
Nº de assentos (N)	316
Altura média (H)	6,50 m
Largura média (L)	14,80 m
Profundidade média (P)	18,45 m
Volume (V)	1775,00 m ³

Fonte: Autor (2021).

4.3 MEDIÇÕES

Essa seção tem como objetivo avaliar o condicionamento acústico do Teatro Municipal de Guarapuava, através de um levantamento de medições utilizando os métodos da resposta impulsiva integrada e do ruído interrompido, padronizados pela NBR ISO 3382-1:2017, de parâmetros acústicos objetivos pré determinados, que possibilitam a caracterização da qualidade sonora do local.

4.3.1 Parâmetros Acústicos Medidos

Com objetivo de caracterizar acusticamente o Teatro Municipal de Guarapuava, os parâmetros acústicos objetivos medidos foram:

- Tempo de Reverberação (T20 e T30);
- Nível de Pressão Sonora do Ruído de Fundo (SPL);
- Clareza (C80);
- Definição (D50);
- Tempo Central (Ts)
- Tempo de Decaimento Inicial (EDT);
- Índice de Transmissão da Palavra (STI).

4.3.2 Equipamentos Utilizados

Para a realização das medições acústicas, foram utilizados os equipamentos a seguir, disponibilizados pela UTFPR Câmpus Guarapuava - Laboratório de instalações prediais do curso de Engenharia Civil e pelo Projeto 4Print - Laboratório de Prototipagem, do curso de Engenharia Mecânica.

- Fonte sonora omnidirecional dodecaédrica do fabricante GROM, conforme Figura 21;
- Analisador de frequência classe I, modelo BK 2250 *Light* marca *Brüel & Kjær*, conforme Figura 22, calibrado pelo INMETRO, de acordo com documento disponibilizado no Anexo A;
- Calibrador acústico modelo 4231, do fabricante *Brüel & Kjær*, conforme Figura 22;
- Microfone capacitivo pré polarizado tipo campo aberto marca GRAS modelo 40AE;
- Condicionador de sinais marca GRAS modelo 12AL;
- Interface *USB PreSonus audiobox USB 96*;
- *Notebook* marca *Lenovo*, modelo *Ideapad 310*;
- Cabo BNC para BNC com 10 metros;

- Cabo BNC para P10 com 3 metros;
- Tripé simples;
- Suporte para microfone 4Print - UTFPR - GP;
- Trena Eletrônica a Laser DLE40 Professional - Bosch.
- *Software Matlab* com utilização da ferramenta *ITA ToolBox*, para medições de respostas ao impulso;
- *Software Microsoft Excel* para o tratamento e análise dos dados obtidos.

Figura 21: Fonte dodecaédrica omnidirecional fabricante Grom.



Fonte: Grom (2021).

Figura 22: Sonômetro modelo BK 2250 Light marca Brüel & Kjær.



Fonte: BKSJ (2021).

4.3.3 Condições de Medição

A condição de medição avaliada foi do ambiente ocupado de mobília e com ocupação mínima do Teatro Municipal de Guarapuava, ou seja, desocupado, com apenas funcionários e colaboradores da pesquisa. O sistema de climatização do local foi desligado e não houve uso do sistema de amplificação.

Foi utilizado os dias de semana 7 e 8 de abril de 2021, em consideração as atividades do teatro e escola estarem suspensas devido a Pandemia da COVID-19, sem ocorrências de precipitações de chuva no local.

4.3.4 Procedimentos de Medição

A respeito do posicionamento das fontes e receptores para a realização das medições, foram adotadas 3 posições para fonte sonora respeitado as recomendações da NBR 3382-1:2017, ao qual para posições das fontes, compete que estejam localizadas nos mesmos pontos de origem sonora natural do ambiente em estudo, situadas a uma altura do piso de 1,50 metros do centro acústico da fonte. Tendo em consideração que o Teatro Municipal de Guarapuava tem como principal finalidade a palavra falada, ainda que seja utilizado para uso musical, foi determinada a posição chamada de F1 no centro do palco, à uma distância de 2,45 metros da plateia e 1,50 metros acima do piso, conforme Figura 23.

Figura 23: Posição fonte F1 centro do palco.



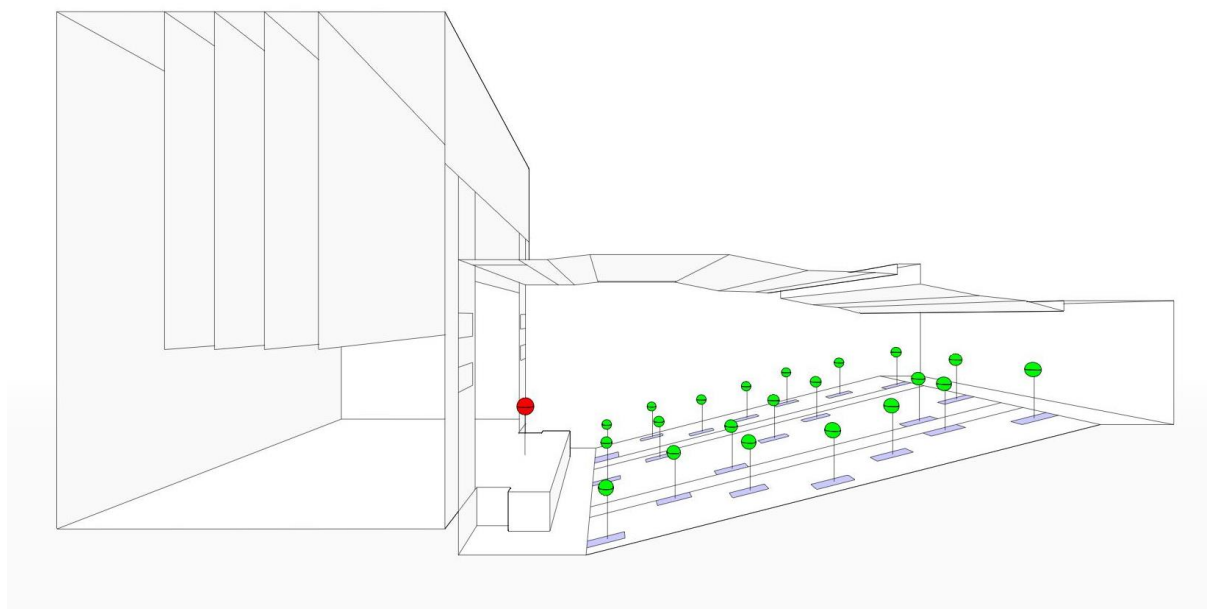
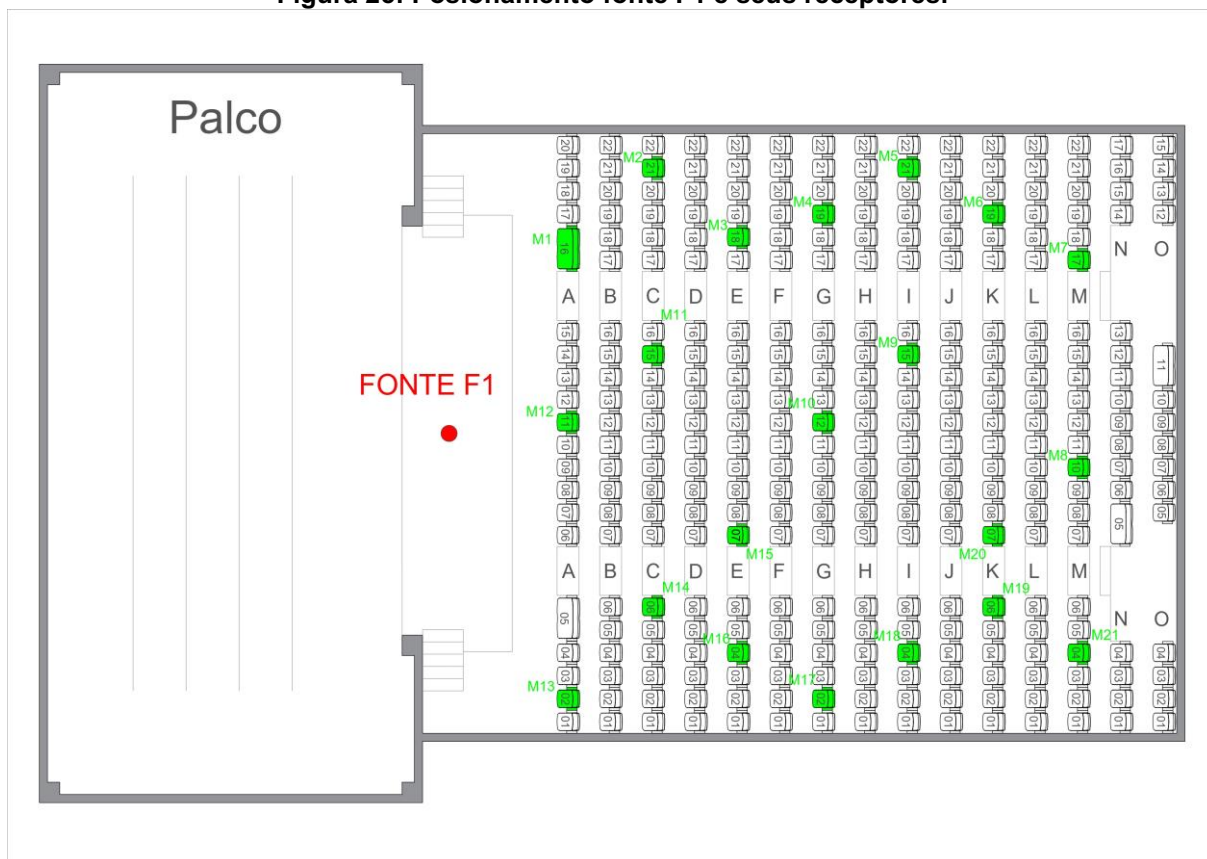
Fonte: Autor (2021).

Figura 24: Posição microfone M1 fonte F1.

Fonte: Autor (2021).

Para localização dos receptores pontuais, seguiu-se também as diretrizes e critérios de distanciamento entre emissor e receptor da NBR 3382-1:2017, considerando uma altura de 1,20 metros para o posicionamento dos microfones acima do piso, ao qual corresponde à altura média das orelhas dos usuários sentados em cadeiras comuns, conforme a Figura 24. A distribuição dos receptores foi realizada visando a uniformidade do arranjo acústico pelas diversas áreas da audiência do Teatro, procurando diminuir possíveis influências que podem afetar principalmente o tempo de reverberação da sala. O número de receptores adotados para fonte F1 foi de 21, sendo 7 em cada setor da plateia, nomeados de M1, M2, M3,..., M21. A visualização do posicionamento da fonte F1 e de seus respectivos receptores pode ser observada na Figura 25.

Figura 25: Posicionamento fonte F1 e seus receptores.



Fonte: Autor (2021).

Com a fonte F1 omnidirecional posicionada na área central do palco, foram realizadas as medições das respostas aos impulsos nos pontos definidos, utilizando um ruído do tipo *sweep* exponencial (varredura completa de senos em frequência de 20 Hz a 20 kHz) com uma deconvolução linear gerado através da ferramenta ITA

Toolbox no software MatLab. O ruído passa pela interface de áudio USB, conectada a fonte e a ao condicionador de sinais, este último ligado ao microfone receptor do tipo campo aberto. A cadeia de ligação dos equipamentos utilizados para realização das medições acústicas através do método resposta impulsiva, pode ser visualizada na Figura 26 de acordo com Ribeiro (2020). Assim, foram efetuadas 3 leituras de varreduras por ponto M1, M2, M3,..., M21, conforme a Figura 27, utilizando um valor de FFT (*Fast Fourier Transform*) igual à 18.

Figura 26: Sequência de ligação dos equipamentos para medição da resposta impulsiva.



Fonte: Ribeiro (2020).

Figura 27: Configuração das medições de respostas aos impulsos.

ita_mstf_gui - Modify an itaMSTF

Basic settings

Preferences Preferences

ROBO ROBO

ModulITA ModulITA

Aurelio Aurelio

Input Channels 1 Input Channels

Output Channels 1 Output Channels

Signal Specifications

FFT Degree 18

Frequency Limits [Hz] 20 22050

Signal Type exp

Stop Margin [s] 0.1

Output Amplification

Comment

Advanced settings

Pause before 0

Number of Averages 3

Linear Deconvolution

Output Equalization

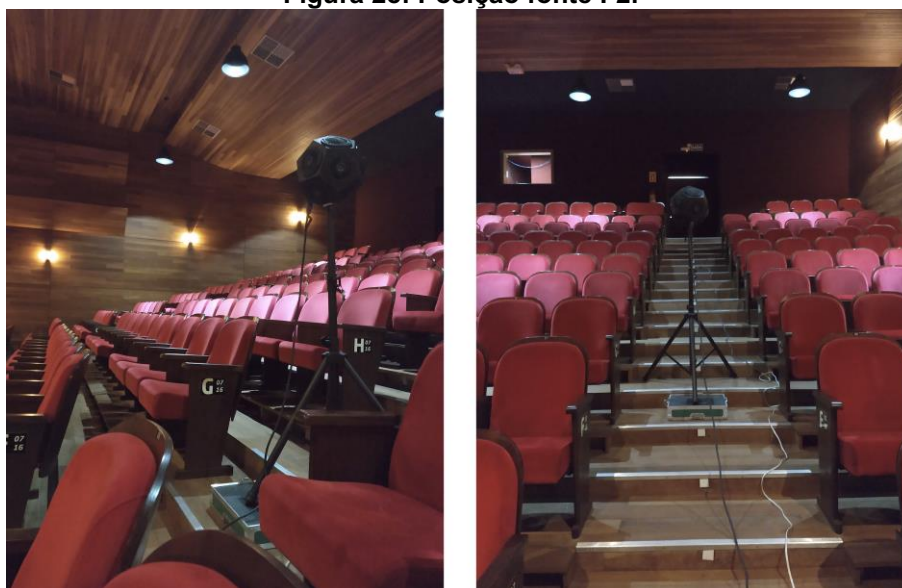
Measurement Chain

ITA TOOLBOX Cancel Okay

Fonte: Autor (2021).

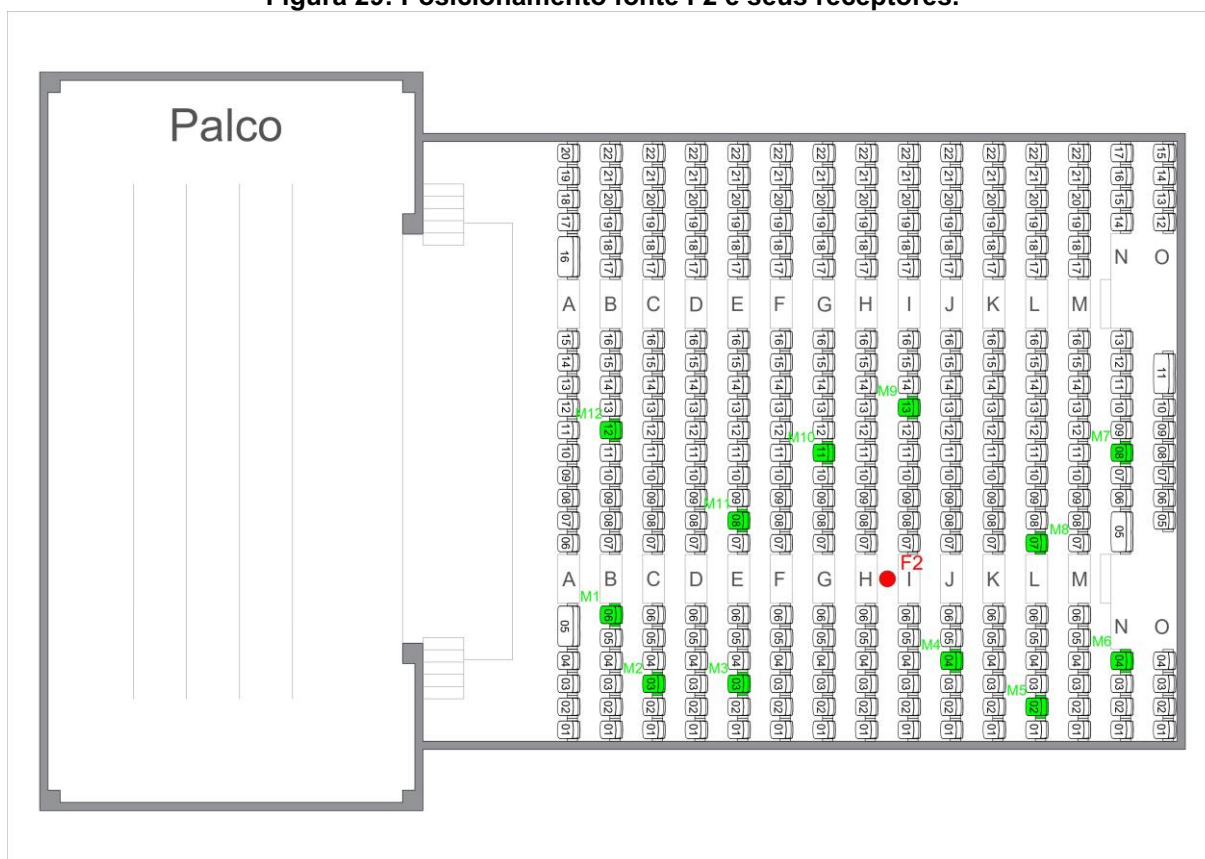
O procedimento de medição foi repetido para as outras duas posições de fonte sonora. A segunda posição F2 definida para o dodecaedro, se encontra no setor esquerdo da plateia, de acordo com a Figura 28, no corredor de circulação entre as fileiras H e I, respeitando os critérios de distanciamento da NBR 3382-1:2017, à uma altura de 1,50 m acima do piso, com um total de 12 posições de receptores sonoros, situados 1,20 m do chão, nomeados de M1, M2, M3,..., M12, conforme apresentado na Figura 29.

Figura 28: Posição fonte F2.



Fonte: Autor (2021).

Figura 29: Posicionamento fonte F2 e seus receptores.

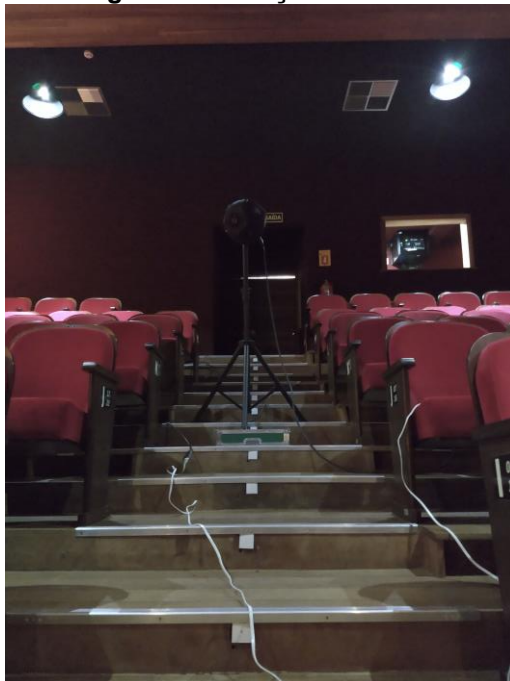


Fonte: Autor (2021).

A localização da fonte omnidirecional F3 está no setor direito da plateia, entre as fileiras L e K, conforme a Figura 30, com definição de 12 pontos de receptores. A

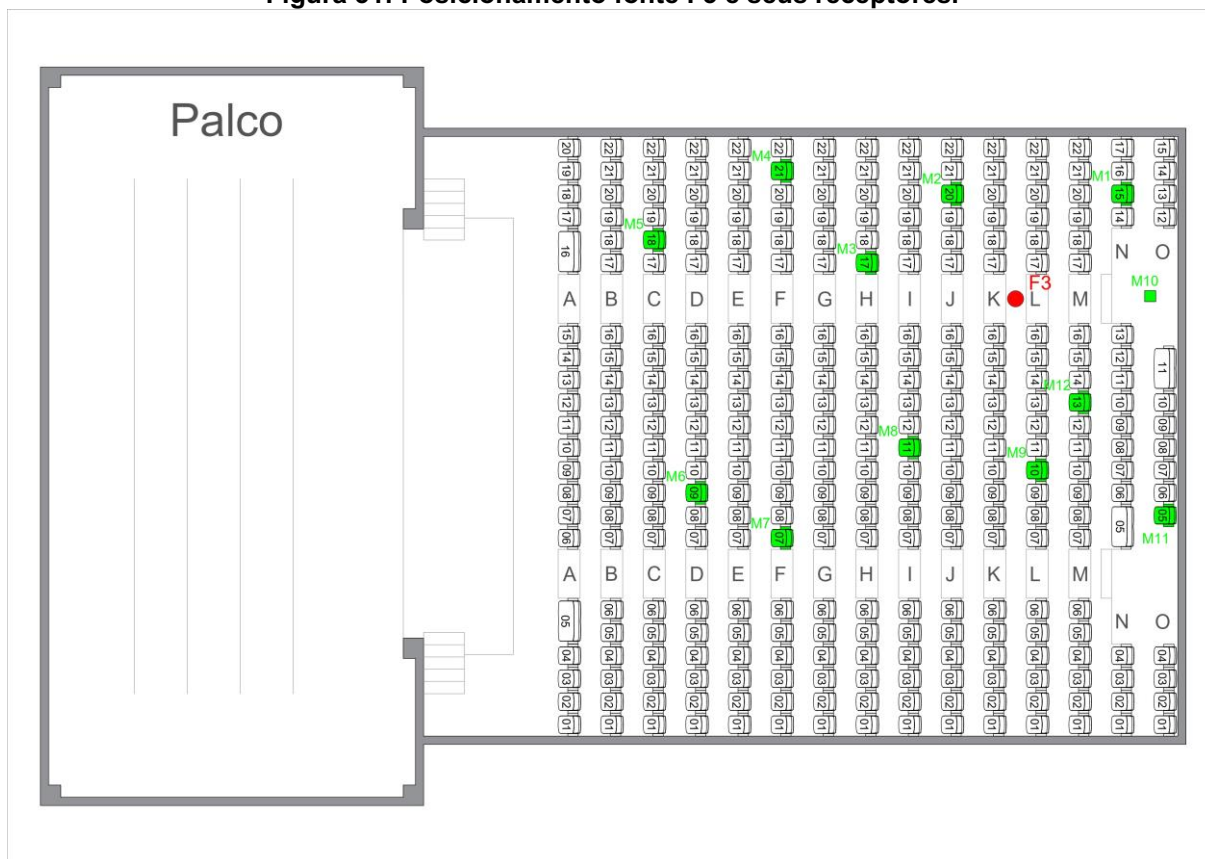
distribuição da posição F3 para o emissor sonoro, bem como a posição dos seus pontos de microfones, podem ser verificados na Figura 31.

Figura 30: Posição fonte F3.



Fonte: Autor (2021).

Figura 31: Posicionamento fonte F3 e seus receptores.

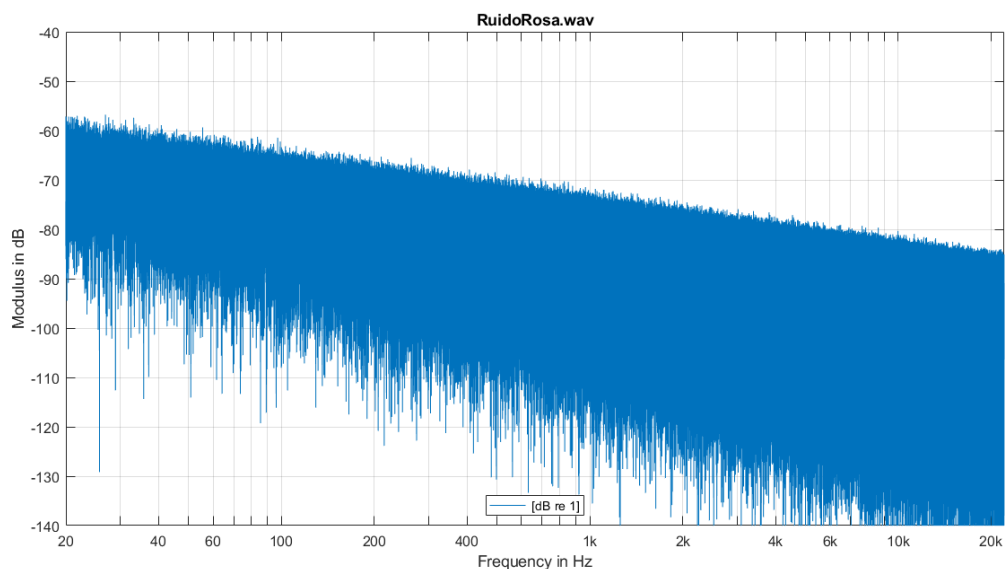


Fonte: Autor (2021).

Em sequência foi utilizada a técnica de medição do ruído interrompido com o analisador de frequência modelo 2250 *Light* da marca *Brüel & Kjær*, calibrado no local (Anexo A), para as situações de fontes sonoras F2 e F3, com seus respectivos receptores definidos anteriormente, à uma altura de 1,20 m do piso, respeitando a norma NBR 3382-1:2017, como pode ser visualizado na Figura 33. O espectro do ruído rosa gerado/analísado é mostrado na Figura 32.

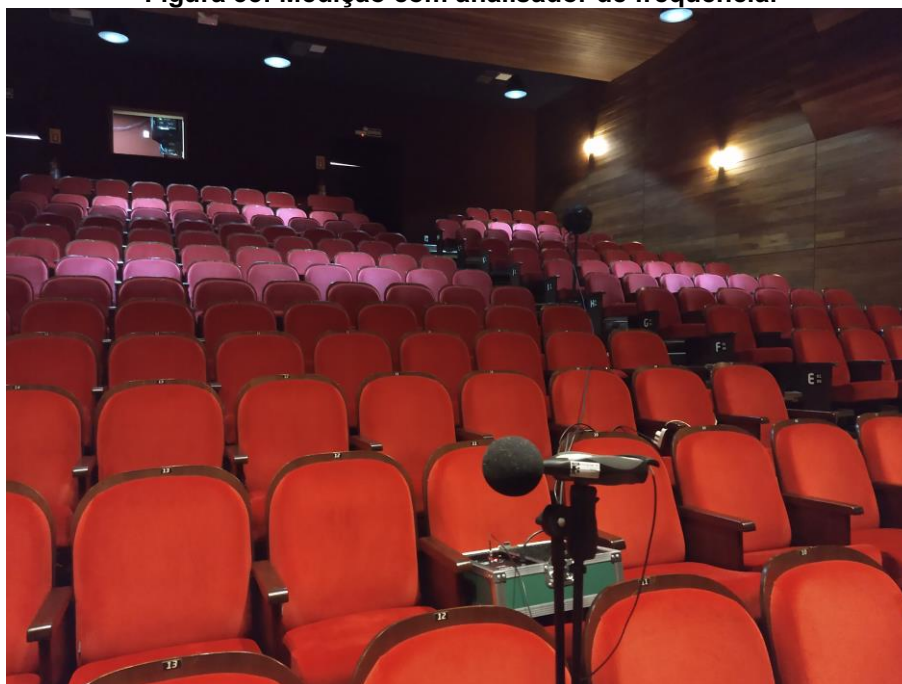
O objetivo é realizar uma análise comparativa dos resultados obtidos nas duas técnicas, resposta impulsiva com o analisador e ruído interrompido, para o parâmetro Tempo de Reverberação (T20), permitindo avaliar a qualidade acústica no interior do Teatro Municipal de Guarapuava. Além dos parâmetros acústicos T20, T30, EDT, foi realizada a medição do ruído de fundo no ambiente, pensando em trabalhos futuros sobre o estudo de caso.

Figura 32: Espectro de ruído rosa utilizado na medição do ruído interrompido.



Fonte: Autor (2021).

Figura 33: Medição com analisador de frequência.



Fonte: Autor (2021).

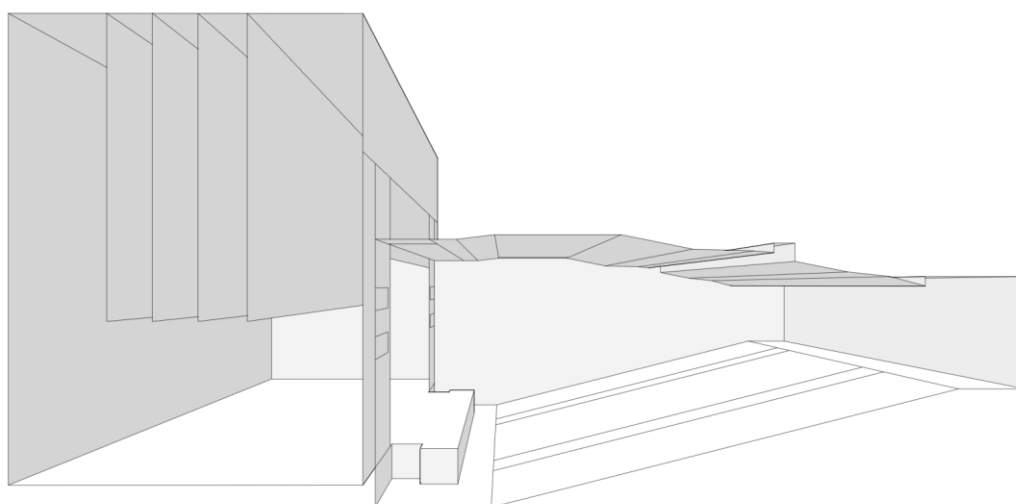
4.4 ELABORAÇÃO DO MODELO GEOMÉTRICO ACÚSTICO

Inicialmente para a simulação acústica do ambiente, foi necessário construir um modelo geométrico tridimensional do Teatro Municipal de Guarapuava, por meio das plantas disponibilizadas para visualização pela equipe do Teatro e também com

base nas informações métricas reais do espaço coletadas durante o processo das medições. Teve-se como auxílio o *software FormIt* da *AutoDesk*, possibilitando a modelagem das geometrias, superfícies e paredes do local.

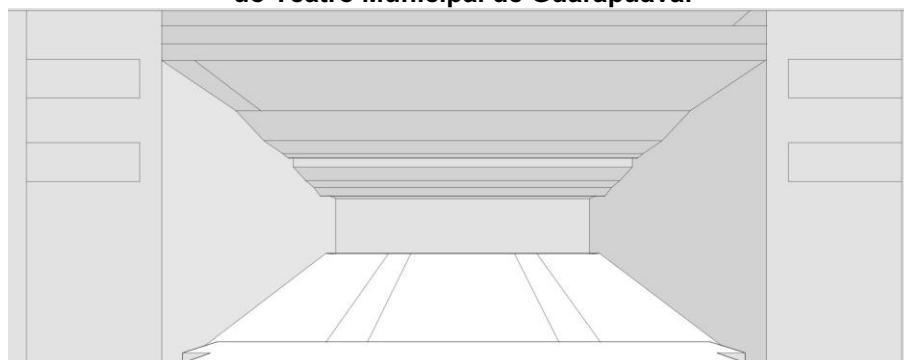
Ao longo do desenvolvimento da geometria tridimensional, foram considerados apenas as superfícies e planos com capacidade de interferir na simulação acústica e posterior análise. Assim os elementos mais complexos, elementos como mobília, poltronas e que não possuem dimensões suficientes em relação ao comprimento de onda analisado, foram simplificados e considerados planos retangulares, como se pode observar nas Figuras 34, 35 e 36.

Figura 34: Vista lateral da geometria tridimensional simplificada do modelo do Teatro Municipal de Guarapuava.



Fonte: Autor (2021).

Figura 35: Vista frontal palco para plateia da geometria tridimensional simplificada do modelo do Teatro Municipal de Guarapuava.



Fonte: Autor (2021).

Figura 36: Vista plateia para o palco da geometria tridimensional simplificada do modelo do Teatro Municipal de Guarapuava.



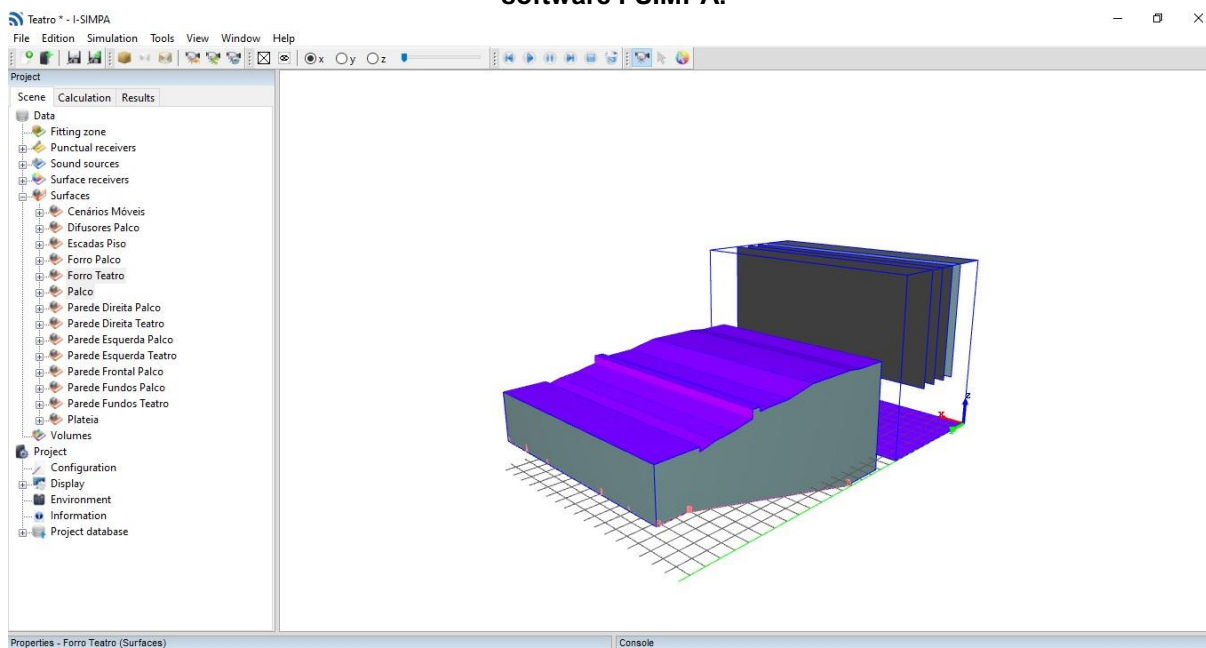
Fonte: Autor (2021).

4.4.1 Modelagem e Simulação Acústica no *I-SIMPA*

Após a finalização do modelo tridimensional no *software FormIt*, a geometria foi exportada em um arquivo de extensão STL de formato CAD, utilizado frequentemente para impressão 3D, para o *software* de simulação acústica *I-SIMPA*. Buscando verificar a existência de possíveis erros na geometria, para a correção adequada do modelo e a geração da malha de superfícies detalhadas dos elementos inseridos na simulação.

Com essa etapa concluída, passou-se para a construção das superfícies/planos da modelagem do Teatro, nomeando-os de acordo com a priorização dos planos estabelecida anteriormente, conforme apresentado na Figura 37, facilitando assim a organização e localização dentro do *software*.

Figura 37: Construção das superfícies da modelagem para simulação acústica dentro do software I-SIMPA.



Fonte: Autor (2021).

A caracterização dos materiais utilizados no interior do Teatro Municipal de Guarapuava, a serem aplicados nas superfícies do modelo, foi baseada no manual recomendado do *software ODEON*. Além do manual, também foi utilizado os valores sugeridos pelos autores Cox e D'Antonio (2017), para definição dos coeficientes de absorção sonora (α) em função do tipo de superfície. Para determinação do coeficiente de espalhamento (s), foi empregue a metodologia de Christensen e Rindel (2005), utilizada no *software ODEON*, ao qual extrapola-se um valor em função do tipo da superfície na frequência de 707Hz. Os materiais e seus respectivos coeficientes de absorção e espalhamento sonoro adotados, para frequências médias analisadas de 500 e 1000 Hz, estão apresentados na Tabela 1 abaixo, conforme os planos definidos na modelagem. Reiterando que na escolha dos materiais, buscou-se a maior aproximação adequada com os elementos originais utilizados internamente no edifício.

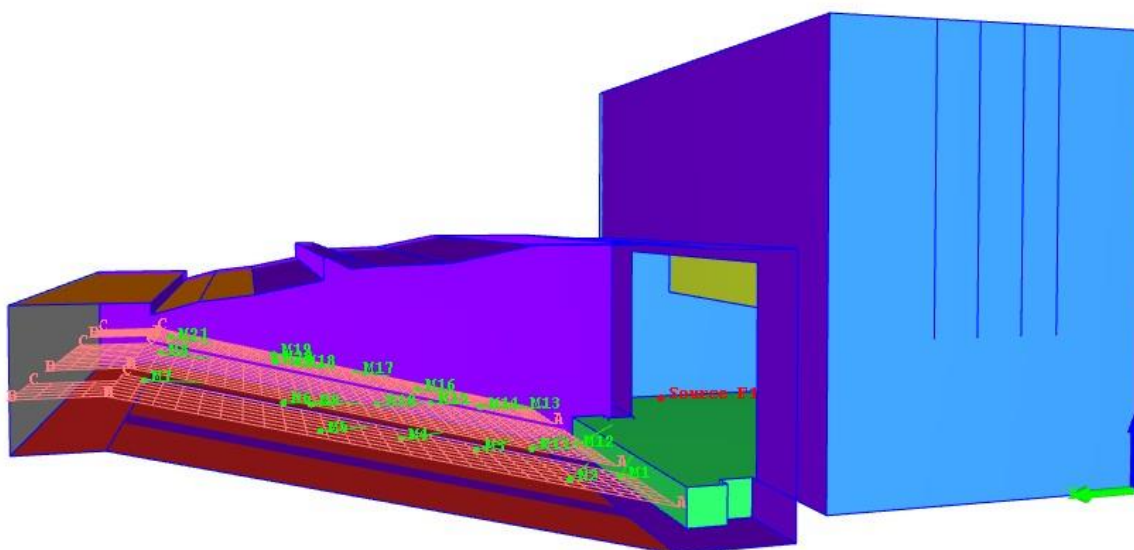
Tabela 1: Materiais adotados para simulação acústica.

Superfície	Material	Coefficiente	Frequência 500 e 1000 Hz	Fonte
Audiência desocupada	Cadeiras vazias, estofadas com capa de tecido	Absorção (α)	0,77 – 0,89	ODEON - Room Acoustics (2018)
		Espalhamento (s)	0,80 – 0,50	ODEON - Room Acoustics (2018)
Cortinas/Cenários móveis	Cortinas de algodão, drapeadas com $\frac{3}{4}$ de área	Absorção (α)	0,40 – 0,57	Cox e D'Antonio (2017)
		Espalhamento (s)	0,05 – 0,10	ODEON - Room Acoustics (2018)
Forro e Difusores	Madeira de lei com espaço de ar	Absorção (α)	0,12 – 0,07	Cox e D'Antonio (2017)
		Espalhamento (s)	0,05 – 0,10	ODEON - Room Acoustics (2018)
Forro Fundos Plateia	Carpete pesado almofado	Absorção (α)	0,57 – 0,69	Cox e D'Antonio (2017)
		Espalhamento (s)	0,05 – 0,10	ODEON - Room Acoustics (2018)
Palco	Piso de madeira sobre vigas	Absorção (α)	0,10 – 0,07	ODEON - Room Acoustics (2018)
		Espalhamento (s)	0,05 – 0,10	ODEON - Room Acoustics (2018)
Paredes Teatro e Piso	Madeira de lei com espaço de ar	Absorção (α)	0,12 – 0,07	Cox e D'Antonio (2017)
		Espalhamento (s)	0,05 – 0,10	ODEON - Room Acoustics (2018)
Paredes Palco	Reboco liso	Absorção (α)	0,03 – 0,04	ODEON - Room Acoustics (2018)
		Espalhamento (s)	0,05 – 0,10	ODEON - Room Acoustics (2018)
Parede Fundos Teatro	Carpete pesado sobre concreto	Absorção (α)	0,14 – 0,37	Cox e D'Antonio (2017)
		Espalhamento (s)	0,05 – 0,10	ODEON - Room Acoustics (2018)

Fonte: Autor (2021).

Conforme indicado na Tabela 1, para todas as superfícies do modelo, exceto a audiência desocupada, foram atribuídos coeficientes de espalhamento (s) com valor de 0,05 e 0,10 para as frequências analisadas de 500 e 1000 Hz respectivamente. Para a audiência, foi adotado 0,80 em 500 Hz e 0,50 em 1000 Hz. O modelo desenvolvido através do *software* de simulação acústica *I-SIMPA*, com os planos definidos de acordo com os materiais adotados, pode ser verificado na Figura 38.

Figura 38: Modelagem acústica Teatro Municipal de Guarapuava inserida no software I-SIMPA.



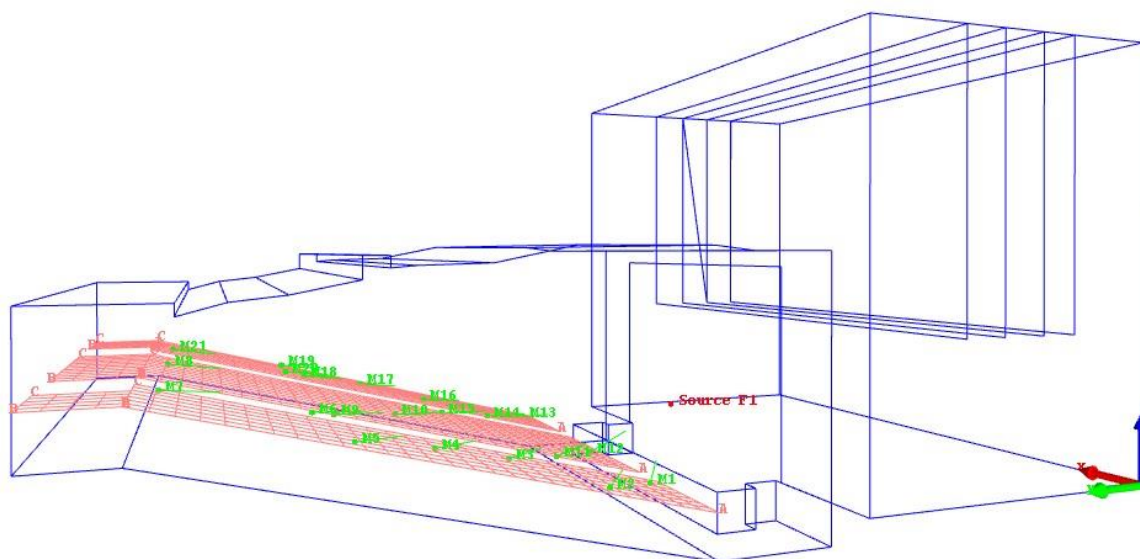
Fonte: Autor (2021).

Definido e aplicado os coeficientes de absorção e espalhamento sonoro dos materiais para cada superfície do Teatro, seguiu-se para a etapa do posicionamento da fonte e dos receptores sonoros. Foi adotado visando posteriormente uma análise comparativa dos resultados encontrados na simulação e nas medições, a mesma distribuição de receptores pontuais para a fonte F1 situada no centro do palco, utilizadas nas medições realizadas *in situ*.

Portanto, foram respeitadas as recomendações da NBR 3382-1 (2017), que estabelece que as fontes estejam localizadas nos mesmos pontos de origem sonora natural do ambiente em estudo, situadas a uma altura do piso de 1,50 m do centro acústico da fonte e para localização dos receptores pontuais à altura de 1,20 m acima do piso. A nomenclatura dos receptores adotados, foi também de M1, M2, M3,..., M21 e cada microfone em sua seção, foi orientado em direção a Fonte F1 no centro do palco.

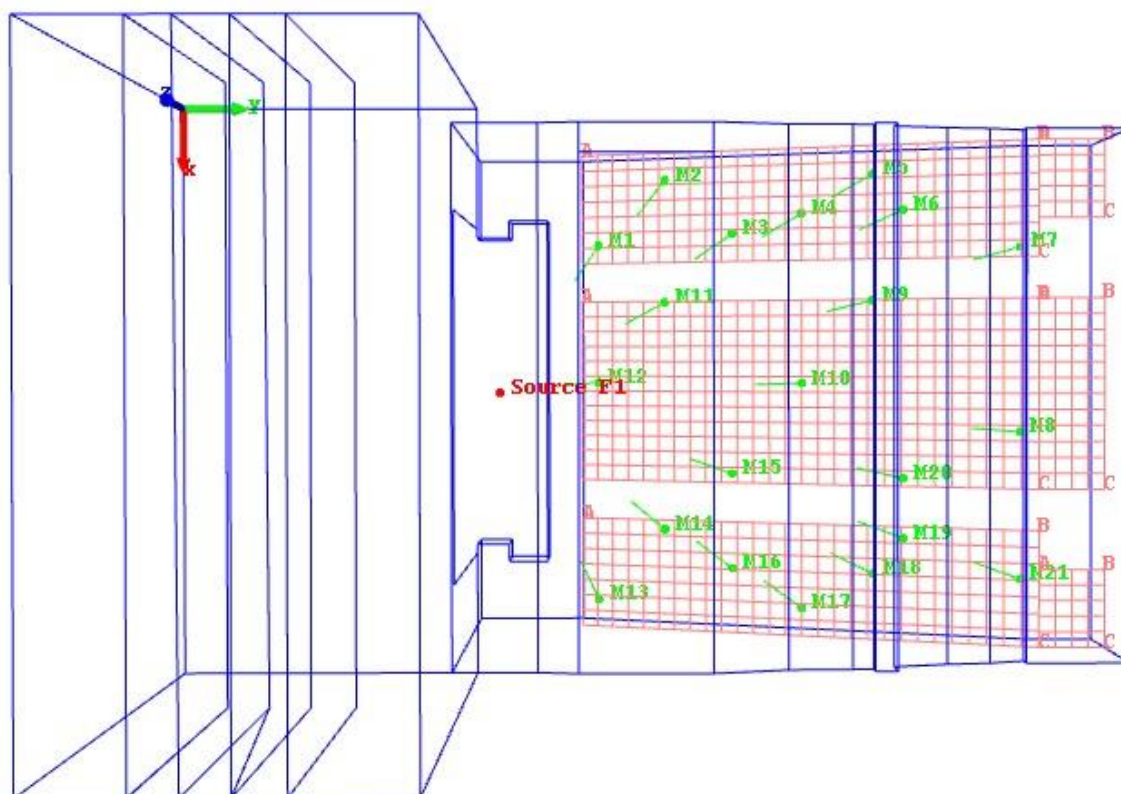
Foram criadas superfícies receptoras à 1,20 m de altura, correspondentes aos setores da audiência, para análise das distribuições espaciais dos parâmetros acústicos, Tempo de Reverberação (T30), Definição (D50), Clareza (C80), Tempo de Decaimento Inicial (EDT) e Inteligibilidade da Palavras (STI). O posicionamento da fonte F1, das superfícies receptoras e dos microfones pontuais dentro da simulação acústica inserida no *software I-SIMPA*, está apresentado nas Figuras 39 e 40.

Figura 39: Posição da fonte F1 e dos seus receptores sonoros.



Fonte: Autor (2021).

Figura 40: Vista superior do posicionamento da fonte F1 e dos seus receptores sonoros.



Fonte: Autor (2021).

O início das simulações acústicas, deu-se em sequência da avaliação da qualidade do modelo geométrico, dos materiais escolhidos e da definição de algumas

propriedades para o cálculo, conforme a Figura 41. No que se refere à configuração da fonte sonora, foi estabelecido uma quantidade de 500000 partículas sonoras por fonte omnidirecional, a um nível de pressão sonora de 100dB com espectro de ruído rosa, definida em frequências médias de 500 e 1000 Hz. Foi adotado o método energético para o cálculo. Os demais valores das propriedades de cálculo restantes, continuaram na configuração padrão do software, com nenhuma alteração.

Figura 41: Configuração adotada das propriedades de cálculo para simulação acústica.

Properties - Meshing (SPPS)	
	Value
Additional parameters	-Y
Radius/Edge ratio	5.00
Scene correction before meshing	<input type="checkbox"/>
Surface receivers constraint	<input checked="" type="checkbox"/>
Surface receivers constraint (m ²)	0.100
Test mesh topology	<input type="checkbox"/>
User-defined parameters	
Volume constraint	<input type="checkbox"/>
Volume constraint (m3)	100.0000

Properties - Properties (SPPS)	
	Value
Active calculation of atmospheric absorption	<input checked="" type="checkbox"/>
Active calculation of diffusion by fitting objects	<input checked="" type="checkbox"/>
Active calculation of direct field only	<input type="checkbox"/>
Active calculation of transmission	<input checked="" type="checkbox"/>
Calculation method	Energetic
Echogram per source	<input type="checkbox"/>
Export surface receivers for each frequency band	<input checked="" type="checkbox"/>
Limit value of the particle extinction (Energetic method) : ratio 10 ⁿ	5.0
Number of sound particles per source	500000
Number of sound particles per source (display)	0
Random initialization number	0
Receiver radius (m)	0.31000
Simulation length (s)	2.00000000
Surface receiver export	Soundmap: SPL
Time step (s)	0.01000000

Properties - Frequency bands (SPPS)	
	Value
50 Hz	<input type="checkbox"/>
63 Hz	<input type="checkbox"/>
80 Hz	<input type="checkbox"/>
100 Hz	<input type="checkbox"/>
125 Hz	<input type="checkbox"/>
160 Hz	<input type="checkbox"/>
200 Hz	<input type="checkbox"/>
250 Hz	<input type="checkbox"/>
315 Hz	<input type="checkbox"/>
400 Hz	<input type="checkbox"/>
500 Hz	<input checked="" type="checkbox"/>
630 Hz	<input type="checkbox"/>
800 Hz	<input type="checkbox"/>
1000 Hz	<input checked="" type="checkbox"/>
1250 Hz	<input type="checkbox"/>
1600 Hz	<input type="checkbox"/>
2000 Hz	<input type="checkbox"/>
2500 Hz	<input type="checkbox"/>
3150 Hz	<input type="checkbox"/>
4000 Hz	<input type="checkbox"/>
5000 Hz	<input type="checkbox"/>
6300 Hz	<input type="checkbox"/>
8000 Hz	<input type="checkbox"/>
10000 Hz	<input type="checkbox"/>
12500 Hz	<input type="checkbox"/>
16000 Hz	<input type="checkbox"/>
20000 Hz	<input type="checkbox"/>

Fonte: Autor (2021).

Para análise dos resultados finais da simulação acústica, é desejado que os valores dos parâmetros TR, C80, D50, Ts e EDT, estejam aproximados dos valores encontrados nas medições no local. Visto que na simulação, tentou-se a máxima aproximação dos materiais constituintes das superfícies do Teatro e de seus coeficientes de absorção e espalhamento. Porém também é esperado resultados divergentes na calibração, levando em consideração a dificuldade de definição dos coeficientes de absorção e espalhamento, além das limitações do modelo.

Dessa forma, com base na análise comparativa entre os resultados simulados e medidos, busca-se a validação do modelo computacional desenvolvido.

4.5 TRATAMENTO E ANÁLISE DOS DADOS OBTIDOS

O processamento dos resultados obtidos nas medições de resposta aos impulsos nos parâmetros acústicos TR, C80, D50, Ts, EDT e STI, foi realizado com a ferramenta ITA *Toolbox*, no intervalo de frequência de 20 Hz a 20 kHz. Em sequência foram exportados em arquivo .txt para tratamento e análise dos dados levantados, através do *software Excel*, utilizando tabelas para apresentação. Para a técnica do ruído interrompido, os dados foram exportados em .txt do analisador para a ferramenta *Excel*, a fim de tratamento dos valores coletados relacionados aos parâmetros T20, T30 e EDT. Foi considerado para análise acústica do trabalho apenas as bandas de frequências de 500 Hz a 1000 Hz.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados das medições de resposta ao impulso e ruído interrompido realizadas no Teatro Municipal de Guarapuava, utilizando as técnicas da ferramenta ITA Toolbox e do Analisador de frequência modelo 2250 *Light* da marca *Brüel & Kjær* respectivamente. Também estão apresentados os resultados obtidos através da simulação acústica computacional do modelo em estudo no software *I-SIMPA*. Os valores dos parâmetros medidos foram apresentados por meio de tabelas, originadas da média aritmética das bandas de oitava de frequência média 500 Hz e 1000 Hz, definidas para análise da pesquisa. Todos os valores médios de cada parâmetro objetivo medido por ponto receptor na situação F1 para fonte sonora, foram comparados com os resultados encontrados na simulação para o mesmo posicionamento. Que por fim, foram comparados com os valores recomendados ideais encontrados nos autores consultados, tal como na NBR 12.179:1992 e NBR 3382-1:2017, para espaços semelhantes em volume e finalidade do estudo de caso.

5.1 RESULTADOS MEDIÇÕES MÉTODO RESPOSTA IMPULSIVA

Os resultados obtidos nas medições *in situ* utilizando o método da resposta impulsiva, para os parâmetros Tempo de Reverberação (T20 e T30), Tempo de Decaimento Inicial (EDT), Clareza (C80), Definição (D50), Tempo Central (Ts) e do Índice de Transmissão de Fala (STI), de cada ponto receptor com a fonte na posição F1, para banda de oitava de frequência média (500 Hz e 1000 Hz), estão apresentados no resumo por pontos na Tabela 2. O receptor M1 - A16 reporta-se ao ponto 1 de medição no assento de número 16 na fileira A, respeitando a mesma simbologia adotada para os outros pontos receptores.

Os valores das incertezas do Tempo de Reverberação T20 e T30, para o método da resposta impulsiva integrada, conforme NBR 3382-1:2017 pela banda de frequência analisada, podem ser verificados na Tabela 3.

Tabela 2: Resumo por pontos para fonte F1 centro do palco - método resposta impulsiva.

Resumo por pontos - fonte F1 centro do palco							
Receptor	T20 (s)	T30 (s)	EDT (s)	C80 (dB)	D50 (%)	TS (ms)	STI
Setor direito plateia							
M1 - A16	0,91	0,97	0,90	3,52	57,80	59,00	0,6871
M2 - C21	0,95	1,04	0,98	4,95	54,37	59,79	0,6474
M3 - E18	1,10	1,14	0,67	7,14	68,48	49,03	0,6337
M4 - G19	1,00	1,14	0,93	4,58	61,29	59,70	0,6307
M5 - I21	1,02	1,02	0,75	6,73	60,58	51,46	0,6149
M6 - K19	1,04	1,12	0,77	6,88	72,16	43,51	0,6336
M7 - M17	0,85	0,95	0,80	4,05	52,66	56,75	0,6383
Setor central plateia							
M8 - M10	0,91	1,01	0,96	3,33	52,17	62,20	0,6194
M9 - I15	0,97	1,02	0,80	5,48	53,15	58,25	0,6407
M10 - G12	1,02	1,10	0,83	4,39	52,39	67,53	0,6534
M11 - C15	0,96	1,09	0,67	8,02	69,75	43,06	0,6779
M12 - A11	0,96	1,08	0,85	3,50	52,91	64,09	0,7388
M15 - E07	1,04	1,05	0,69	6,43	68,04	48,88	0,6571
M20 - K07	0,85	1,04	0,81	5,20	58,41	54,33	0,6382
Setor esquerdo plateia							
M13 - A02	0,97	1,02	0,81	4,93	68,29	52,62	0,6680
M14 - C06	1,07	1,09	0,72	4,54	56,03	58,30	0,6544
M16 - E04	1,00	0,99	0,97	5,39	64,31	57,72	0,6500
M17 - G02	1,00	1,12	0,87	4,12	59,94	56,82	0,6489
M18 - I04	0,98	1,09	0,72	5,00	57,09	59,60	0,6215
M19 - K06	0,90	1,06	0,82	4,51	57,80	57,04	0,6333
M21 - M04	0,98	1,09	0,80	4,57	55,51	62,32	0,6549

Fonte: Autor (2021).

Tabela 3: Incertezas de medições - método resposta impulsiva.

Incertezas de medição - método resposta impulsiva		
Frequência	500 Hz	1000 Hz
σ (T20)	0,0061	0,0045
σ (T30)	0,0063	0,0048

Fonte: Autor (2021).

Na Tabela 4 estão apresentados os valores médios dos resultados por pontos para posição da fonte F1, entre as bandas de oitava de 500 e 1000 Hz sugeridas para análise na NBR 3382-1:2017. A partir destes resultados, é possível compará-los com os valores referenciais adequados.

Tabela 4: Valores médios para posição de fonte F1.

Médias dos valores por banda de frequência 500 e 1000 Hz - fonte F1 centro do palco						
T20 (s)	T30 (s)	EDT (s)	C80 (dB)	D50 (%)	TS (ms)	STI
0,98	1,06	0,81	5,11	59,67	56,29	0,6496

Fonte: Autor (2021).

Desta maneira, pode-se dizer que o Teatro Municipal de Guarapuava é considerado adequado acusticamente em relação à sua finalidade de uso, visto que se enquadra entre os autores Beranek (2004) e Brandão (2016) para o parâmetro Tempo de Reverberação (T20 e T30), conforme a Tabela 5. O valor levantado médio de T20 nas medições é de 0,98 segundos, dentro dos limites recomendados de audibilidade para função da palavra falada.

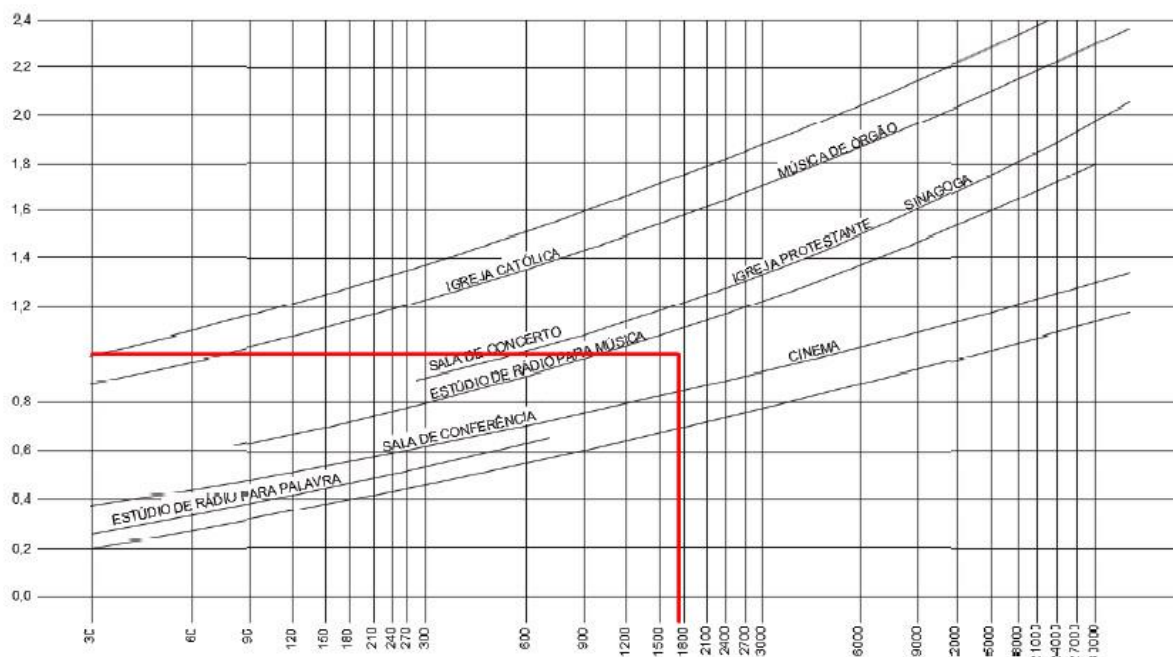
Tabela 5: Valores de TR adequados em função da finalidade da sala.

TR recomendado em segundos (s)		
Finalidade sala	Referência	Frequência 500 - 1000 Hz
Conferência/fala	Beranek (2004)	< 1,20
	Brandão (2016)	1,00
Concerto	Beranek (2004)	1,60 – 2,10
	Brandão (2016)	1,50 – 2,20

Fonte: Beranek (2004) e Brandão (2016).

Levando em conta que o Teatro destina-se principalmente a percepção da palavra falada, pode-se enquadrá-lo como sala de conferência e/ou cinema se considerarmos ao uso múltiplo, no gráfico da ABNT NBR 12179:1992. Deste modo, nota-se que com o volume da sala em estudo de 1775 m³, o valor do TR ideal na banda de 500 Hz indicado na norma, é de aproximadamente 1,0 segundo por interpolação linear, conforme mostra a Figura 42. Assim com o valor do T20 médio obtido nas medições de 0,98 segundos, podemos dizer que o ambiente cumpre as recomendações normativas de audibilidade para as funções de teatro e música, já que o valor se encaixa na margem de tolerância de 10% para mais ou para menos do TR na frequência de 500 Hz.

Figura 42: Tempo de Reverberação ideal em 500 Hz pela NBR 12179:1992.



Fonte: NBR 12179 (1992).

No entanto, para fins de alguns gêneros musicais e concertos, que implicam em uma maior demanda de reverberação no espaço, o Teatro Municipal não se enquadra perfeitamente nos valores ideais recomendados pela NBR 12179:1992. Visto que esse tipo de atividade exige um tratamento específico no ambiente.

Em relação ao Tempo de Decaimento Inicial (EDT), o valor coletado médio para as médias frequências foi de 0,81 segundos, inferior se comparado diretamente aos valores médios dos parâmetros T20 (0,98 segundos) e T30 (1,06 segundos). Sendo que majoritariamente em todos os pontos receptores analisados, os resultados médios de EDT foram menores que os de T20 e T30 na faixa de frequência medida, configurando uma impressão subjetiva levemente menor da reverberação no ambiente.

A respeito da propriedade objetiva Clareza (C80), que está relacionada à inteligibilidade da música na capacidade subjetiva em distinguir sons em sequência, o valor médio coletado de 5,11 dB se enquadra aproximadamente na prioridade da captação dos detalhes musicais, de acordo com os valores referenciais citados por Beranek (2004) na Tabela 6. Mesmo que a prioridade do Teatro não seja a reprodução musical, pode-se declarar que a sala apresenta um equilíbrio entre a reverberação e a clareza com que o som é recebido no ambiente.

Tabela 6: Valores sugeridos de C80.

Prioridade da sala	Valores (dB)
Captação detalhes da música	+ 1 a + 5
Reverberação	- 1 a - 4
Melhor qualidade acústica	- 1 a - 5

Fonte: Beranek (2004).

Quanto à análise dos parâmetros relacionados à inteligibilidade da palavra, os valores adequados recomendados por Brandão (2016), para o parâmetro da Definição (D50), devem ser superiores à 50 %. A sala em estudo cumpre este valor ideal em toda sua audiência, com resultado médio de 59,67 % nas bandas de frequência em 500 Hz e 1000 Hz. Em referência ao Índice de Transmissão de Fala (STI), é possível afirmar que o valor médio obtido de 0,6496 nas medições, enquadra-se como “bom” conforme sugerido por Brandão (2016) na Tabela 7. Podemos afirmar que o ambiente possui um ótimo comportamento acústico em seu interior para as atividades direcionadas à palavra.

Tabela 7: Valores de STI para qualificação.

STI	Ruim	Regular	Aceitável	Bom	Excelente
<i>IF/100</i>	< 0,30	0,30 – 0,45	0,45 – 0,60	0,60 – 0,75	≥ 0,75

Fonte: Brandão (2016).

Os resultados obtidos nas medições *in situ* utilizando o método da resposta impulsiva, para os parâmetros Tempo de Reverberação (T20 e T30), Tempo de Decaimento Inicial (EDT), de cada ponto receptor com a fonte na posição F2, para banda de oitava de frequência média (500 Hz e 1000 Hz), estão apresentados no resumo por pontos na Tabela 8. Foi respeitada a mesma simbologia adotada para os pontos receptores da situação F1.

Os valores das incertezas do Tempo de Reverberação T20 e T30, para o método da resposta impulsiva integrada pela banda de frequência analisada, podem ser verificados na Tabela 3 apresentada anteriormente.

Tabela 8: Resumo por pontos fonte F2 - método resposta impulsiva.

Resumo por pontos - fonte F2			
Receptor	T20 (s)	T30 (s)	EDT (s)
Setor esquerdo plateia			
M1 - B06	0,81	0,94	0,80
M2 - C03	0,82	0,82	0,94
M3 - E03	0,83	0,83	0,95
M4 - J04	0,93	0,91	0,75
M5 - L02	0,85	0,90	1,00
M6 - N04	0,84	0,90	1,05
Setor central plateia			
M7 - M08	0,96	1,01	0,70
M8 - L07	0,89	0,95	0,61
M9 - I13	0,82	0,93	0,88
M10 - G11	0,70	0,82	0,53
M11 - E08	0,77	0,89	0,87
M12 - B12	0,83	0,96	0,75

Fonte: Autor (2021).

Na Tabela 9 estão apresentados os valores médios dos resultados por pontos para posição da fonte F2, entre as bandas de oitava de 500 e 1000 Hz sugeridas para análise na NBR 3382-1:2017.

Tabela 9: Valores médios para posição de fonte F2.

Médias dos valores por banda de frequência 500 e 1000 Hz - fonte F2

T20 (s)	T30 (s)	EDT (s)
0,84	0,91	0,82

Fonte: Autor (2021).

No posicionamento de fonte F3, os resultados coletados nas medições *in situ* utilizando o método da resposta impulsiva, para os parâmetros Tempo de Reverberação (T20 e T30), Tempo de Decaimento Inicial (EDT), de cada ponto receptor, em banda de oitava de frequência 500 Hz e 1000 Hz, podem ser visualizados na síntese por pontos conforme a Tabela 10.

Tabela 10: Resumo por pontos fonte F3 - método resposta impulsiva.

Resumo por pontos - fonte F3			
Receptor	T20 (s)	T30 (s)	EDT (s)
Setor direito plateia			
M1 - N15	0,78	0,85	0,57
M2 - J20	0,78	0,94	0,48
M3 - H17	0,76	0,96	0,57
M4 - F21	0,94	0,96	0,71
M5 - C18	0,93	0,97	0,61
Setor central plateia			
M6 - D09	0,95	1,01	0,73
M7 - F07	0,86	0,94	0,56
M8 - I11	0,80	0,85	0,79
M9 - L10	0,76	0,93	0,83
M10	0,81	0,85	0,42
M11 - O05	0,84	0,83	0,62
M12 - M13	0,83	0,86	0,33

Fonte: Autor (2021).

Os valores médios dos resultados por pontos para posição da fonte F3, entre as bandas de oitava de 500 e 1000 Hz, estão apresentadas na Tabela 11.

**Tabela 11: Valores médios para posição de fonte F3.
Médias dos valores por banda de frequência 500 e
1000 Hz - fonte F3**

T20 (s)	T30 (s)	EDT (s)
0,84	0,91	0,60

Fonte: Autor (2021).

Desta forma, com os resultados apresentados para as propriedades acústicas nas posições de fonte F1, F2 e F3, mediante comparação com os valores de referência estabelecidos na NBR 12179:1992 e conforme os autores Beranek (2004) e Brandão (2016), é possível declarar que a qualidade acústica no interior do Teatro para a finalidade multiuso, da palavra e música, é apropriada.

5.2 RESULTADOS MEDIÇÕES MÉTODO DO RUÍDO INTERROMPIDO

O levantamento dos resultados utilizando o método do ruído interrompido com o Analisador de frequência modelo 2250 *Light* da marca *Brüel & Kjær*, para os parâmetros Tempo de Reverberação (T20 e T30) e Tempo de Decaimento Inicial (EDT), de cada ponto receptor com a fonte omnidirecional na posição F2, para banda de oitava de frequência média (500 Hz e 1000 Hz), estão apresentados no resumo

por pontos na Tabela 12. O receptor M1 - B06 reporta-se ao ponto 1 de medição no assento de número 06 na fileira B, respeitando a mesma simbologia adotada para os outros pontos receptores.

Os valores das incertezas do T20 e T30, para o método do ruído interrompido pela banda de frequência analisada, segundo a NBR 3382-1:2017, podem ser verificados através da Tabela 13.

Tabela 12: Resumo por pontos fonte F2 - método ruído interrompido.

Resumo por pontos - fonte F2 - analisador de frequência			
Receptor	T20 (s)	T30 (s)	EDT (s)
Setor esquerdo plateia			
M1 - B06	0,96	1,00	0,61
M2 - C03	0,89	0,93	0,62
M3 - E03	0,72	0,82	0,71
M4 - J04	0,84	0,90	0,54
M5 - L02	0,77	0,89	0,72
M6 - N04	0,88	0,83	1,25
Setor central plateia			
M7 - M08	0,87	0,88	0,90
M8 - L07	0,90	0,93	0,65
M9 - I13	0,88	0,96	0,78
M10 - G11	0,68	0,85	0,49
M11 - E08	0,80	0,87	0,54
M12 - B12	0,93	0,97	0,89

Fonte: Autor (2021).

Tabela 13: Incertezas de medições - método ruído interrompido.

Incertezas de medição - método ruído interrompido		
Frequência	500 Hz	1000 Hz
σ (T20)	0,0145	0,0111
σ (T30)	0,0149	0,0116

Fonte: Autor (2021).

Os valores médios dos resultados por pontos para posição da fonte F2 utilizando o método do ruído interrompido, entre as bandas de oitava de 500 e 1000 Hz, estão apresentadas na Tabela 14.

Tabela 14: Valores médios para posição de fonte F2 - método do ruído interrompido.

Médias dos valores por banda de frequência 500 e 1000 Hz - fonte F2 - analisador de frequência		
T20 (s)	T30 (s)	EDT (s)
0,84	0,90	0,72

Fonte: Autor (2021).

O resultado das medições efetuadas na situação de fonte sonora F3, de cada microfone receptor, para os parâmetros Tempo de Reverberação (T20 e T30) e Tempo de Decaimento Inicial (EDT), em banda de oitava de frequência 500 Hz e 1000 Hz, estão apresentados na Tabela 15.

Tabela 15: Resumo por pontos fonte F3 - método ruído interrompido.

Resumo por pontos - fonte F3 - analisador de frequência			
Receptor	T20 (s)	T30 (s)	EDT (s)
Setor direito plateia			
M1 - N15	0,79	0,88	0,72
M2 - J20	0,72	0,87	0,54
M3 - H17	0,75	0,91	0,79
M4 - F21	0,99	0,98	0,75
M5 - C18	0,98	0,99	0,61
Setor central plateia			
M6 - D09	0,95	0,96	0,77
M7 - F07	0,87	0,91	0,77
M8 - I11	0,87	0,86	0,95
M9 - L10	0,76	0,94	0,63
M10	0,88	0,88	0,57
M11 - O05	0,83	0,87	0,76
M12 - M13	0,91	0,92	0,29

Fonte: Autor (2021).

Os valores médios dos resultados por pontos para posição da fonte F3 utilizando o método do ruído interrompido, entre as bandas de oitava de 500 e 1000 Hz, estão apresentadas na Tabela 16.

Tabela 16: Valores médios para posição de fonte F3 - método do ruído interrompido.

Médias dos valores por banda de frequência 500 e 1000 Hz - fonte F3 - analisador de frequência		
T20 (s)	T30 (s)	EDT (s)
0,85	0,91	0,68

Fonte: Autor (2021).

Desta forma, com os resultados apresentados, podemos extrair algumas conclusões acerca da qualidade acústica do espaço em estudo, mediante a comparação com os valores de referência estabelecidos na NBR 12179:1992 e na Tabela 5 conforme os autores Beranek (2004) e Brandão (2016). Verifica-se que os tempos de reverberação médios, tanto para a posição F2 (0,84 segundos) e F3 (0,85 segundos) são adequados ao intervalo ideal de tempo de reverberação para uso da

palavra, teatro e cinema (0,75 - 1,0 segundos), ainda levando em consideração que o posicionamento das fontes se encontram em locais não habituais para um orador ou grupo teatral/musical natural. Para as atividades direcionadas à música, como concertos, o que requer um TR mais elevado, o Teatro não corresponde às melhores características para este gênero de apresentação.

Realizando uma análise comparativa com os dados obtidos nas medições *in situ* em ambos os métodos, resposta ao impulso e ruído interrompido na mesma configuração de sala-fonte-receptor, percebe-se que as técnicas são muito próximas, com pequenas divergências nos resultados médios do parâmetro EDT para as situações de fonte sonora F2 e F3. A semelhança entre os valores obtidos indica que os métodos são adequados.

5.3 RESULTADOS SIMULAÇÕES ACÚSTICAS

Os resultados encontrados nas simulações acústicas computacionais utilizando o *software I-SIMPA*, mais aproximados com os valores medidos *in situ*, para os parâmetros Tempo de Reverberação (T20 e T30), Tempo de Decaimento Inicial (EDT), Clareza (C80), Definição (D50) e Tempo Central (Ts), de cada ponto receptor com a fonte na posição F1, para banda de oitava de frequência média (500 Hz e 1000 Hz), estão apresentados no resumo por pontos na Tabela 17.

Tabela 17: Resumo por pontos fonte F1 - simulação acústica.

Resumo por pontos - fonte F1 centro do palco - simulação acústica I-SIMPA						
Receptor	T20 (s)	T30 (s)	EDT (s)	C80 (dB)	D50 (%)	TS (ms)
Setor direito plateia						
M1 - A16	1,46	2,16	1,06	3,45	60,05	79,35
M2 - C21	1,61	2,25	1,13	2,55	50,15	100,50
M3 - E18	1,58	1,91	1,07	3,90	57,50	91,85
M4 - G19	1,58	1,74	1,09	4,00	60,40	102,55
M5 - I21	1,72	2,28	1,29	2,05	52,80	117,35
M6 - K19	1,83	3,05	1,29	1,85	51,90	121,40
M7 - M17	1,82	2,35	1,51	1,40	47,35	141,35
Setor central plateia						
M8 - M10	1,77	2,55	1,51	1,65	44,00	140,40
M9 - I15	1,64	2,17	1,23	3,20	53,65	113,05
M10 - G12	1,73	2,23	1,13	3,20	58,25	100,05
M11 - C15	1,54	2,14	1,13	2,65	52,85	90,15
M12 - A11	1,46	2,14	1,03	5,20	72,50	58,50
M15 - E07	1,45	1,72	1,02	4,05	61,70	90,75
M20 - K07	1,65	2,05	1,42	1,95	47,50	129,25

Tabela 18: Resumo por pontos fonte F1 - simulação acústica.

Resumo por pontos - fonte F1 centro do palco - simulação acústica I-SIMPA						
Receptor	T20 (s)	T30 (s)	EDT (s)	C80 (dB)	D50 (%)	TS (ms)
Setor esquerdo plateia						
M13 - A02	1,58	2,15	1,17	1,90	52,20	99,85
M14 - C06	1,54	2,09	1,07	3,00	55,95	88,00
M16 - E04	1,49	1,87	1,12	3,55	55,85	95,30
M17 - G02	1,72	2,07	1,16	3,70	61,90	103,40
M18 - I04	1,66	2,27	1,21	3,10	57,15	111,85
M19 - K06	1,79	2,32	1,25	1,90	49,70	120,85
M21 - M04	1,70	2,09	1,46	0,90	44,80	141,35

Fonte: Autor (2021).

Na Tabela 19 estão apresentados os valores médios dos resultados para posição da fonte F1 simulada. A partir destes resultados, é possível compará-los com os valores medidos, a fim de validação do modelo.

Tabela 19: Valores médios para posição de fonte F1 - simulação acústica.

Médias dos valores por banda de frequência 500 e 1000 Hz - fonte F1 - simulação acústica						
T20 (s)	T30 (s)	EDT (s)	C80 (dB)	D50 (%)	TS (ms)	
1,62	2,17	1,20	2,82	54,67	106,53	

Fonte: Autor (2021).

5.3.1 Análise Comparativa dos Resultados

Realizou-se uma análise através da técnica das Diferenças Mínimas Perceptíveis (JND) segundo a NBR 3382-1:2017, entre os valores simulados acusticamente no *software I-SIMPA* e os valores obtidos nas medições. As diferenças mínimas de percepção recomendadas para os parâmetros Tempo de Decaimento Inicial (EDT), Clareza (C80) e Definição (D50) são apresentadas na Tabela 20. Já os resultados das diferenças em percentuais dos valores médios comparados, podem ser visualizadas na Tabela 21.

Tabela 20: Grandezas acústicas agrupadas de acordo com aspectos dos ouvintes pela NBR 3382-1:2017.

Aspecto subjetivo do ouvinte	Grandeza acústica	Número único médio em frequência ^a Hz	Diferença mínima perceptível (JND)	Faixa típica ^b
Nível sonoro subjetivo	Fator de força do som, G, em decibels	500 a 1000	1 dB	- 2 dB; + 10 dB

Tabela 20: Grandezas acústicas agrupadas de acordo com aspectos dos ouvintes pela NBR 3382-1:2017.

Aspecto subjetivo do ouvinte	Grandeza acústica	Número único médio em frequência a Hz	Diferença mínima perceptível (JND)	Faixa típica b
Reverberação percebida	Tempo de decaimento inicial (EDT), em segundos	500 a 1000	Rel. 5 %	1,0 s; 3,0 s
Clareza sonora percebida	Clareza, C80, em decibels	500 a 1000	1 dB	-5 dB; + 5 dB
	Definição, D50	500 a 1000	0,05	0,3; 0,7
	Tempo central, TS, em milissegundos	500 a 1000	10 ms	60 ms; 260 ms
Largura aparente da fonte (ASW)	Fracção de energia lateral inicial, JLF ou JLFC	125 a 1000	0,05	0,05; 0,35
Envolvimento do ouvinte (LEV)	Nível sonoro lateral tardio, Lj, em decibels	125 a 1000	Não conhecido	-14 dB; + 1dB

a O número único médio em frequência denota a média aritmética para as bandas de oitava, exceto para Lj, que deve ser a média energética.

b Valores médios em frequência em posições únicas em salas de concerto e salas multiuso não ocupadas de até 25 000 m³.

Fonte: NBR 3382-1 (2017).

Tabela 21: Comparação entre os resultados medidos e simulados.

Análise comparativas resultados médios fonte F1 - medições - simulação acústica					
Valor	T20 (s)	T30 (s)	EDT (s)	C80 (dB)	D50 (%)
Medido	0,98	1,06	0,81	5,11	59,67
Simulado	1,62	2,17	1,20	2,82	54,67
Diferença percentual	66,55%	105,02%	47,75%	44,86%	8,38%
Análise JND				≥ 5%	✓

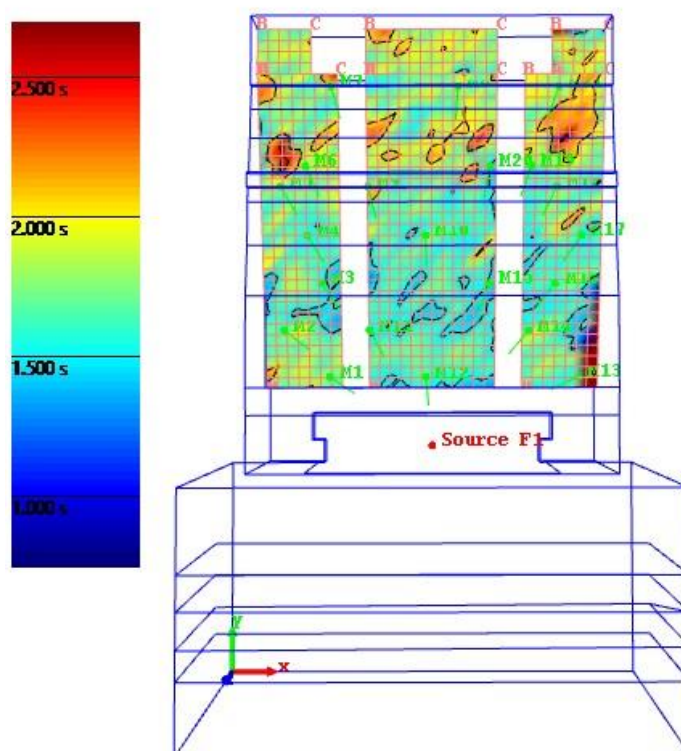
✓ – Existência de Diferença Mínima Perceptível conforme NBR 3382-1:2017.

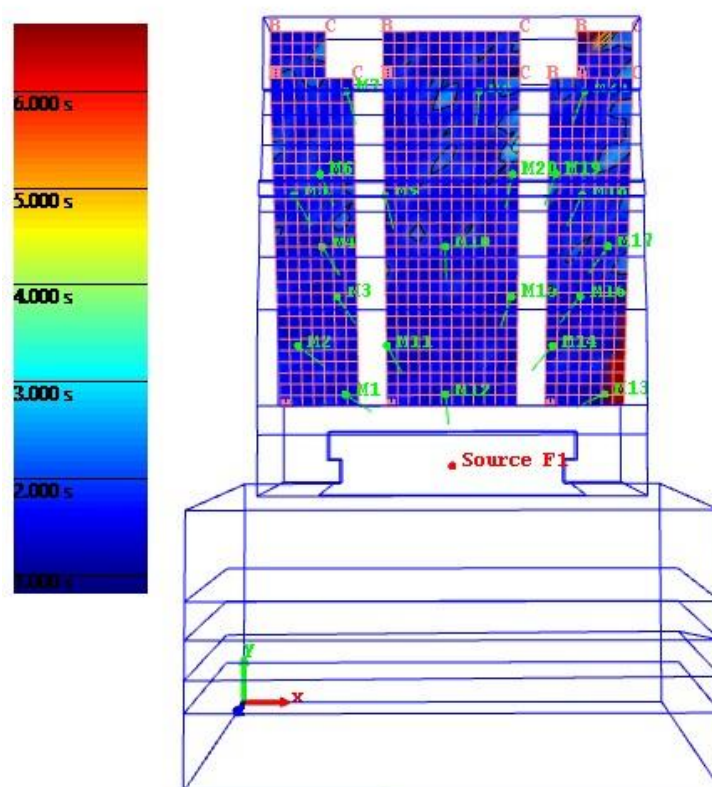
Fonte: Autor (2021).

O primeiro parâmetro a ser analisado e comparado é o Tempo de Reverberação (T20/T30) e o EDT, que nas simulações se apresentaram acima dos resultados obtidos nas medições, conforme pode ser visualizado na Tabela 21. Os valores são moderadamente superiores aos recomendados para percepção da palavra, e adequado as atividades musicais. Pela análise JND do parâmetro EDT, fica explícito que existem diferenças mínimas perceptíveis entre os valores, significando que a simulação variou mais de 5 % em relação à medição. Logo não havendo

convergência, o modelo simulado não corresponde ao modelo real. Portanto, faz necessário realizar um ajuste nos coeficientes de absorção sonora e espalhamento dos materiais constituintes nas superfícies, para que os resultados das simulações se aproximem ao máximo dos valores medidos *in situ*, vindo a validar o modelo. Na Figura 43 são apresentados os mapas acústicos com as configurações espaciais do parâmetro T30, nas frequências de 500 e 1000 Hz respectivamente.

Figura 43: Mapa acústico T30 - 500 e 1000 Hz.

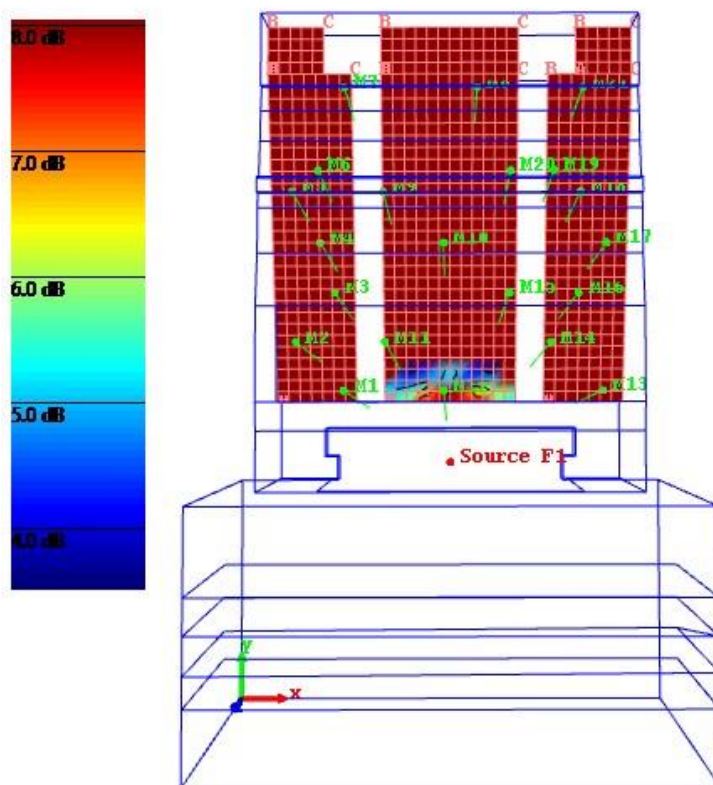
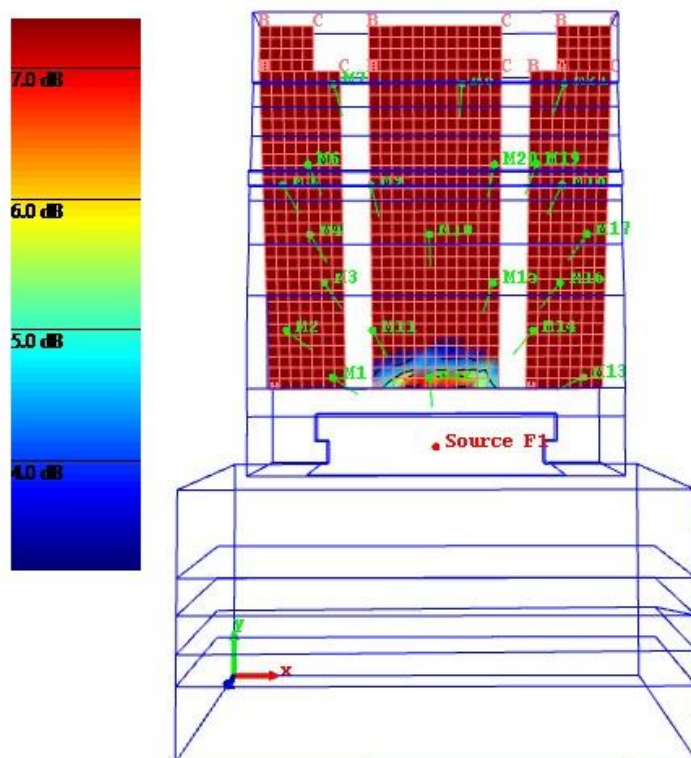




Fonte: Autor (2021).

Em relação a Clareza (C80), o valor médio coletado nas simulações para propriedade acústica também é divergente do resultado encontrado nas medições, conforme percentual mostrado na Tabela 21. Como para o tempo de reverberação, a C80 também carece de uma calibração mais específica relacionada aos coeficientes de absorção e espalhamento sonoro. Na Figura 44 é apresentado o mapa acústico do parâmetro Clareza (C80), nas bandas de 500 e 1000 Hz. Pode-se observar que o parâmetro varia conforme a distância em relação à fonte sonora, e na maioria da audiência os valores são muito elevados, não se adequando ao ideal.

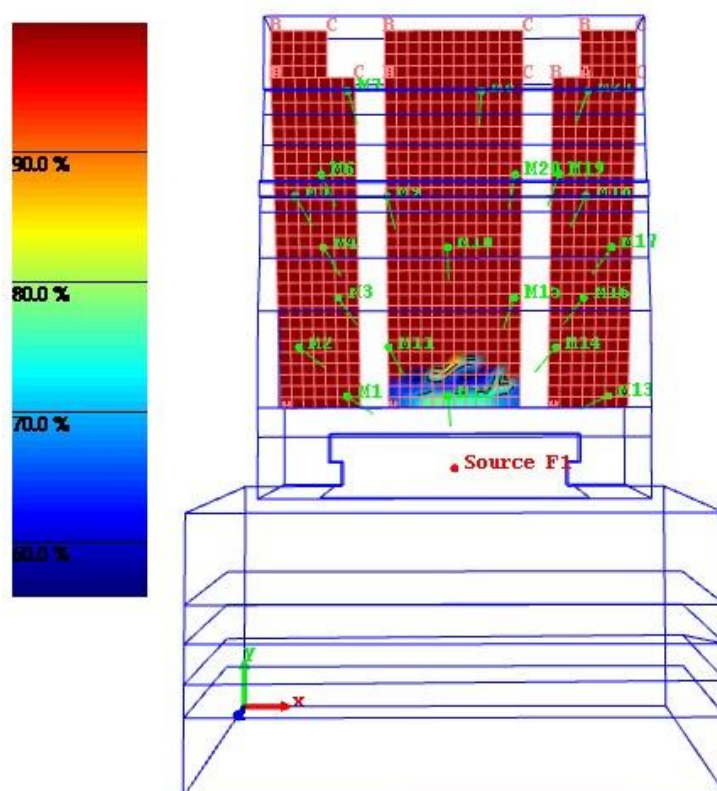
Figura 44: Mapa acústico C80 - 500 e 1000 Hz.

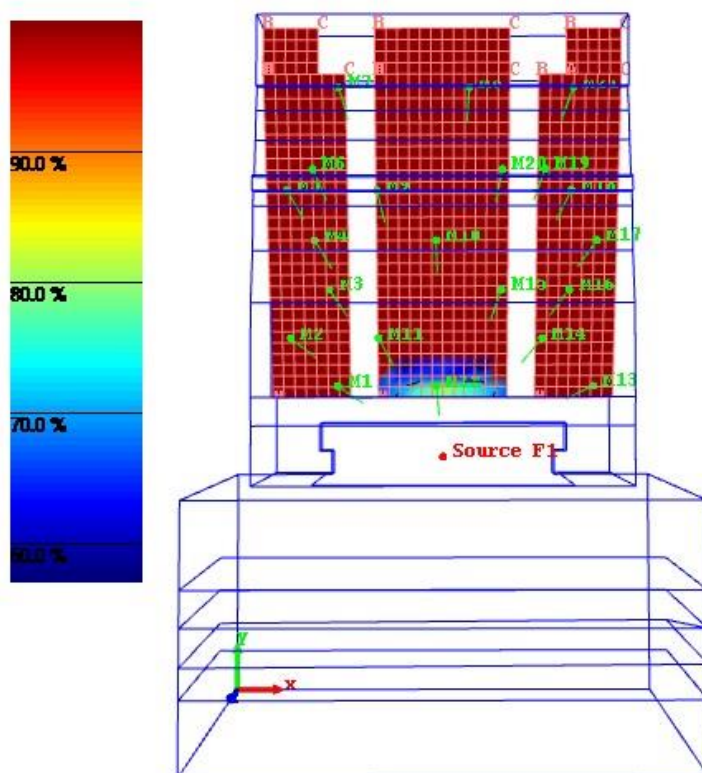


Fonte: Autor (2021).

Conforme mostra a Tabela 21, o valor médio do parâmetro da Definição (D50) obtido nas simulações, foi o que apresentou a menor diferença percentual ao resultado coletado nas medições. Sendo adequado ao valor recomendado, que é acima de 50%. A sala na simulação cumpre este valor ideal em toda plateia, porém é visível a existência de alguma incompatibilidade nos resultados elevados na Figura 45, a qual são mostrados os mapeamentos acústicos do D50 em 500 Hz e 1000 Hz.

Figura 45: Mapa acústico D50 - 500 e 1000 Hz.





Fonte: Autor (2021).

6 CONCLUSÕES

Este trabalho avaliou a qualidade acústica do Teatro Municipal de Guarapuava, por meio da análise dos resultados encontrados nas medições *in situ* e na simulação computacional realizada no *software I-SIMPA*.

A sala em estudo destina-se a diversas atividades, tanto musicais quanto da palavra falada. Tendo essa finalidade múltipla, é natural que o espaço apresente um Tempo de Reverberação (TR) mais adequado para algumas atividades do que outras. O valor médio obtido nas medições de 0,98 segundos (T20) em frequências de 500 Hz e 1000 Hz, com a posição de fonte na área central do palco, é adequado para inteligibilidade da palavra e aceitável para algumas atividades musicais, conforme as recomendações normativas e entre os autores consultados referentes no estudo da acústica de salas. Contudo, para fins de alguns gêneros musicais e concertos que implicam em uma maior demanda de reverberação no espaço, o Teatro Municipal não se enquadra perfeitamente nos valores ideais recomendados em norma. Visto que na condição de sala ocupada, os valores de TR sofreriam uma redução devido a absorção sonora da plateia. O intuito nesse tipo de atividade exige um tratamento específico no ambiente.

Quanto ao Tempo de Decaimento Inicial (EDT), o valor coletado médio para as médias frequências foi de 0,81 segundos, inferior se comparado diretamente aos valores médios dos parâmetros de reverberação. Sendo que majoritariamente em todos os pontos receptores analisados, os resultados médios de EDT foram menores que os de T20 e T30 na faixa de frequência medida, configurando uma impressão subjetiva levemente menor da reverberação no ambiente.

A respeito da propriedade objetiva Clareza (C80), que está relacionada à inteligibilidade da música na capacidade subjetiva em distinguir sons em sequência, o valor médio coletado de 5,11 dB se enquadra aproximadamente na prioridade da captação dos detalhes musicais, de acordo com os valores referenciais apresentados por Beranek (2004). Mesmo que a prioridade do Teatro não seja a reprodução musical, pode-se declarar que a sala apresenta um equilíbrio entre a reverberação e a clareza com que o som é recebido no ambiente.

Quanto a análise dos parâmetros relacionados à inteligibilidade da palavra, o Teatro Municipal de Guarapuava cumpre a recomendação ideal para o parâmetro da Definição (D50), que tem de ser superior à 50 % segundo Brandão (2016), com

resultado médio de 59,67 % nas bandas de frequência em 500 Hz e 1000 Hz. Em referência ao Índice de Transmissão de Fala (STI), a sala apresentou um valor médio de 0,6496 nas medições, correspondente a uma “boa” inteligibilidade. Pode-se afirmar que o ambiente possui um bom comportamento acústico em seu interior para as atividades direcionadas à palavra.

Com a análise dos resultados apresentados através das medições com os métodos da resposta ao impulso e ruído interrompido para as posições de fonte F2 e F3, pode-se extrair algumas conclusões acerca da qualidade acústica do recinto. Verifica-se que os tempos de reverberação médios T20 e T30, tanto para a posição F2 e F3, são adequados ao intervalo ideal de tempo de reverberação para uso da palavra, teatro e cinema. Levando em consideração que o posicionamento das fontes se encontram em locais não habituais para um orador ou grupo teatral/musical natural. Para as atividades direcionadas à música, como concertos, o que requer um TR mais elevado, o Teatro não corresponde às melhores características para este gênero de apresentação.

Realizando uma análise comparativa com os dados obtidos nas medições *in situ* em ambos os métodos, resposta ao impulso e ruído interrompido, para mesma configuração sala-fonte-receptor, percebe-se que as técnicas são muito próximas, com pequenas divergências nos resultados médios do parâmetro EDT para as situações de fonte sonora F2 e F3. A semelhança entre os valores obtidos indica que os métodos são adequados.

Os resultados na simulação acústica computacional do modelo tridimensional do Teatro na ferramenta *I-SIMPA*, apresentaram divergências nas tentativas de calibração do modelo, por meio dos valores de tempo de reverberação medidos. Com os resultados não convergentes para os parâmetros TR, EDT, C80 e D50, o modelo não foi validado, baseando-se em uma análise percentual e das Diferenças Mínimas Perceptíveis (JND) conforme NBR 3382-1:2017 para o EDT. Tais diferenças são justificadas pela dificuldade de escolha dos coeficientes de absorção sonora e espalhamento acústico, que não necessariamente coincidem com os materiais encontrados no interior do ambiente. Constatando assim, uma carência na literatura de dados apropriados sobre os coeficientes de espalhamento dos materiais existentes na sala, sobretudo a respeito das madeiras maciças nobres Cumaru e Itaúba utilizadas nas superfícies de piso, nos lambris das paredes e nos refletores curvos de teto. Ponderando conforme Kolya e Kang (2020), as espécies de madeiras de cerne

duro possuem um comportamento característico quanto à absorção acústica, ou seja, cada madeira deve ter seus coeficientes ensaiados em laboratório para uma eventual simulação acústica, pois coeficientes genéricos, como os utilizados nas simulações deste trabalho, não levaram à resultados satisfatórios.

Em face aos valores obtidos nas medições, pode-se concluir que o Teatro Municipal de Guarapuava apresenta um ótimo comportamento acústico a sua finalidade de uso, especialmente nas atividades direcionadas à percepção da palavra do que para apresentações musicais. A respeito do modelo computacional elaborado, este exige um ajuste mais preciso nos coeficientes de absorção sonora e espalhamento dos materiais existentes no interior do auditório. A fim de obter resultados mais próximos das medições, sendo possível futuramente com sua validação, propor inúmeras soluções acústicas visando melhorias em alguns parâmetros objetivos utilizados para avaliar a qualidade acústica do Teatro a determinado uso específico desejado.

6.1 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Em frente aos resultados encontrados, seria interessante para trabalhos futuros, validar o modelo computacional de simulações acústicas do Teatro Municipal de Guarapuava, com o intuito de propor soluções acústicas visando melhorias em alguns parâmetros objetivos utilizados para avaliar a qualidade acústica do Teatro a execução musical; analisar o nível de pressão sonora do ruído de fundo do Teatro Municipal de Guarapuava, com o sistema de climatização ligado e desligado, a fim de verificar a existência de algum desconforto aos usuários; investigar os valores de coeficientes de espalhamento acústico adequados, correspondentes aos materiais existentes no interior do Teatro; analisar através de métodos estatísticos as diferenças dos resultados entre os métodos de medições da resposta impulsiva e do ruído integrado; avaliar subjetivamente o Teatro por meio de interrogações aos usuários, oradores, músicos, maestros e artistas.

REFERÊNCIAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR ISO 3382:2017. Acústica – Medição de parâmetros de acústica de salas. Parte 1: Salas de espetáculos.** Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR ISO 12179:1992. Tratamento acústico em recintos fechados.** Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

BERANEK, Leo L. ***Concert Halls and Opera Houses: Music, Acoustic, and Architecture.*** 2. ed. New York: Springer, 2004.

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

BKSV. **Analizador de frequência modelo 2250 Light com calibrador.** 2 fotografias. Disponível em: < <https://www.bksv.com/pt/instruments/handheld/sound-level-meters/2250-series/type-2250-l/>>. Acesso em: 17 maio 2021.

BRANDÃO, Eric. **Acústica de salas: projeto e modelagem.** São Paulo: Blucher, 2016.

CHING, F. D. K; BINGGELI, C. **Arquitetura de interiores ilustrada.** 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

CHRISTENSEN, Claus Lyng; RINDEL, Jens Holger. *A new scattering method that combines roughness and diffraction effects.* In: **Forum Acousticum, Budapest, Hungary.** 2005.

COX, Trevor J.; D'ANTONIO, Peter. **Acoustic Absorbers and Diffusers: Theory, Design and Application.** 3 ed. Boca Raton (EUA): CRC Press, 2017.

GAUDEOSO, Caroline; BARBO, Marselle; BRANDÃO, Eric. TUTORIAL PARA O USO DO SOFTWARE GRATUITO DE SIMULAÇÃO EM ACÚSTICA GEOMÉTRICA: I-SIMPA. In: XXVIII ENCONTRO DA SOBRAC, 2018, Porto Alegre. **Anais eletrônicos...** Campinas, Galoá, 2018. Disponível em:< <https://proceedings.science/sobrac/papers/tutorial-para-o-uso-do-software-gratuito-de-simulacao-em-acustica-geometrica--i-simpa->>. Acesso em: 17 set. 2020

GROM. **Fonte sonora omnidirecional modelo DDC-100**. 1 fotografia. Disponível em: < <https://www.grom.com.br/app/webroot/files/3f57eda16fabde3bde839cf44f81414c>>. Acesso em: 17 maio 2021.

KOLYA, Haradhan; KANG, Chun Won. *High acoustic absorption properties of hackberry compared to nine different hardwood species: A novel finding for acoustical engineers*. **Applied Acoustics**, v. 169, 2020.

LAKATOS, Eva M; MARCONI, Maria A. **Metodologia científica**. 7 ed. São Paulo: Atlas, 2017.

MOCCELIN, Nádia. **Orquestra de Câmara no palco do Teatro Municipal em Guarapuava**. Rede Sul de Notícias. Guarapuava, 2018. Disponível em: < <https://redesuldenoticias.com.br/redemais/orquestra-de-camera-no-palco-do-teatro-municipal-em-guarapuava/>>. Acesso em: 15 abr. 2021.

ODEN. **Odeon - manual do usuário**. 16ª versão. 2020. Disponível em: < <https://odeon.dk/download/Version16/OdeonManual.pdf>>. Acesso em: 12 jul. 2021.

PINTO. M. H. A. **Caracterização acústica de grandes auditórios: O caso do auditório da FEUP**. 2012. 119 f. Tese (Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2011/2012) - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2012.

PROACÚSTICA - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA PARA A QUALIDADE ACÚSTICA. **Manual ProAcústica de Acústica Básica**. dez. 2019. Disponível em: <<http://www.proacustica.org.br/publicacoes/manuais-tecnicos-sobre-acustica/manual-acustica-basica.html>>. Acesso em: 11 ago. 2020.

PROACÚSTICA - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA PARA A QUALIDADE ACÚSTICA. **Manual ProAcústica para Qualidade Acústica de Auditórios**. ago. 2019. Disponível em: <<http://www.proacustica.org.br/publicacoes/manuais-tecnicos-sobre-acustica/manual-proacustica-qualidade-acustica-de-auditorios.html>>. Acesso em: 11 ago. 2020.

RIBEIRO, Rodrigo S. **Caracterização do condicionamento acústico de uma sala de aula com o uso de painéis de madeira**. 2020. 305 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2020.

SOUZA, L. C. L. et al. **Bê-á-bá da Acústica Arquitetônica: Ouvindo a Arquitetura.** São Carlos: EdUFSCar, 2012.

ANEXO A - CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO ANALISADOR

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO

Certificado Nº: **CBR2000836**

CALIBRAÇÃO DE:

Modelo:	4966-H-041	Código de Identificação:	---
Descrição:	Microfone Capacitivo	Normas aplicadas:	IEC 61094-5 e -6
Número de série:	3268788		
Fabricante:	Brüel & Kjær		

CLIENTE:

Universidade Tecnológica Federal de Paraná
Av. Professora Laura Pacheco Bastos, 800
Bairro Industrial - Guarapuava / PR
85053-525



Processo LACEL B&K nº: 252/20

CONDIÇÕES DA CALIBRAÇÃO:

Condições ambientais:	Temperatura do ar:	(22,3 ± 3) °C
	Pressão atmosférica:	(92,72 ± 1) kPa
	Umidade relativa do ar:	(66,8 ± 10) %

DOCUMENTAÇÃO UTILIZADA:

Procedimento de calibração BPC 16r03 para Microfone, utilizando o Sistema de Calibração B&K 9721.
Código da calibração utilizado nos programas de controle WT9649 e WT9650: **S251-FF-01**
Formulário padronizado – BFC MIC 01r02

INFORMAÇÕES:

A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza de medição multiplicada pelo fator de abrangência $k = 2$, que para uma distribuição normal corresponde a uma probabilidade de abrangência de 95,45%. A incerteza padrão da medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02.

Este certificado atende aos requisitos de acreditação da Cgcre, que avaliou a competência do laboratório e comprovou sua rastreabilidade a padrões nacionais de medida.

Este certificado é válido apenas para o objeto calibrado e não pode ser reproduzido parcialmente sem autorização prévia.

Cgcre is a signatory of the ILAC and LAAC to Mutual Recognition Arrangement and the Bilateral Agreement on Mutual Recognition with EA.

Data da calibração: 14/12/2020

Data da emissão: 14/12/2020



MARCOS

ALLEGRETTI:10333345886

Gerente de Serviço do Laboratório de Acústica e Vibração

Assinado de forma digital por MARCOS
ALLEGRETTI:10333345886

Dados: 2020.12.14 16:10:25 -03'00'

Laboratório de Calibração acreditado pela Cgcre de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob o número CAL 305

Continuação do Certificado de Calibração N°: CBR2000836

Calibração da Sensibilidade

Tipo da sensibilidade: Circuito aberto (*open-circuit*) Carregado (*loaded*)
Verificação da tolerância: Completa Sem verificação

Sensibilidade nominal: -26 dB re 1V/Pa ± 1,5 dB
Tensão de polarização aplicada: 0 V

Sensibilidade nas condições ambientais de calibração: -26,06 dB re 1V/Pa ou 49,78 mV/Pa
Sensibilidade nas condições ambientais de referência, So: -26,14 dB re 1V/Pa ou 49,30 mV/Pa
Incerteza de medição: 0,11 dB
Correção¹ do fator **K** para as condições ambientais de referência: 0,14 dB re 1V/Pa
Frequência de calibração: 251,19 Hz

Condições ambientais de referência:

Temperatura do ar: 23,0 °C
Pressão atmosférica: 101,325 kPa
Umidade relativa do ar: 50 %

Instrumentos utilizados

Descrição	Fabricante	Modelo	Número de série	Nº Certificado Rastreabilidade	Próxima calibração
Microfone padrão	Brüel & Kjær	4180	2564047	DIMCI 0637/2018 INMETRO	11/05/2021
Termo-higrômetro	Testo	608-H1	34803899	68342/1 e 68342/2 Testo / RBC	04/06/2021
Barômetro digital	Vaisala	PTB330	J3410001	CAL-177370/19 ABSi / RBC	24/09/2021

Informativo

Calibração realizada em conjunto com:
Microfone B&K 4966 - 3265444
Pré-amplificador B&K 1706 - 3247972

Power Module B&K 1704 - 101356
CCLD: On ; Gain: x1 ; Filter: Lin

¹ Correção do fator **K** → $K_0 = -26 - (S_0)$

Laboratório de Calibração acreditado pela Cgcre de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob o número CAL 305

Continuação do Certificado de Calibração N°: CBR2000836

Resposta em Frequência Normalizada

Frequência normalizada: 251,19 Hz

Resposta do Atuador Eletrostático é válida nas condições ambientais de calibração.

Correção aplicada para o campo sonoro: **Correção para Campo Livre (Free Field)**

Frequência	Resposta do Atuador Eletrostático	Resposta para o campo sonoro	Incerteza de medição	Tolerância superior	Tolerância inferior	Verificação da tolerância
[Hz]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[X = Falha]
19,9526	0,14	0,14	0,25	2,00	-2,00	
21,1349	0,13	0,13	0,24	2,00	-2,00	
22,3872	0,14	0,14	0,23	2,00	-2,00	
23,7137	0,13	0,13	0,23	2,00	-2,00	
25,1189	0,13	0,13	0,22	2,00	-2,00	
26,6073	0,12	0,12	0,22	2,00	-2,00	
28,1838	0,12	0,12	0,21	2,00	-2,00	
29,8538	0,11	0,11	0,21	2,00	-2,00	
31,6228	0,11	0,11	0,20	2,00	-2,00	
33,4965	0,10	0,10	0,20	2,00	-2,00	
35,4813	0,10	0,10	0,20	2,00	-2,00	
37,5837	0,10	0,10	0,20	2,00	-2,00	
39,8107	0,09	0,09	0,20	2,00	-2,00	
42,1697	0,08	0,08	0,20	2,00	-2,00	
44,6684	0,09	0,09	0,20	2,00	-2,00	
47,3151	0,08	0,08	0,20	2,00	-2,00	
50,1187	0,08	0,08	0,20	2,00	-2,00	
53,0884	0,08	0,08	0,20	2,00	-2,00	
56,2341	0,08	0,08	0,20	2,00	-2,00	
59,5662	0,07	0,07	0,20	2,00	-2,00	
63,0957	0,08	0,08	0,20	2,00	-2,00	
66,8344	0,06	0,06	0,20	2,00	-2,00	
70,7946	0,06	0,06	0,20	2,00	-2,00	
74,9894	0,06	0,06	0,20	2,00	-2,00	
79,4328	0,05	0,05	0,20	2,00	-2,00	
84,1395	0,04	0,04	0,20	2,00	-2,00	
89,1251	0,05	0,05	0,20	2,00	-2,00	
94,4061	0,04	0,04	0,20	2,00	-2,00	
100,000	0,04	0,04	0,21	2,00	-2,00	
105,925	0,04	0,04	0,21	2,00	-2,00	
112,202	0,04	0,04	0,21	2,00	-2,00	
118,850	0,03	0,03	0,21	2,00	-2,00	
125,893	0,03	0,03	0,19	2,00	-2,00	
133,352	0,03	0,03	0,19	2,00	-2,00	
141,254	0,03	0,03	0,19	2,00	-2,00	
149,624	0,02	0,02	0,19	2,00	-2,00	
158,489	0,03	0,03	0,19	2,00	-2,00	
167,880	0,02	0,02	0,19	2,00	-2,00	
177,828	0,02	0,02	0,19	2,00	-2,00	
188,365	0,01	0,01	0,19	2,00	-2,00	
199,526	0,01	0,01	0,19	2,00	-2,00	
211,349	0,00	0,00	0,19	2,00	-2,00	

Laboratório de Calibração acreditado pela Cgcre de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob o número CAL 305

Continuação do Certificado de Calibração N°: CBR2000836

Frequência	Resposta do Atuador Eletrostático	Resposta para o campo sonoro	Incerteza de medição	Tolerância superior	Tolerância inferior	Verificação da tolerância
[Hz]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[X = Falha]
223,872	0,01	0,01	0,19	2,00	-2,00	
237,137	0,00	0,00	0,19	2,00	-2,00	
251,189	0,00	0,00	0,00	2,00	-2,00	
266,073	0,00	0,00	0,19	2,00	-2,00	
281,838	0,00	0,00	0,19	2,00	-2,00	
298,538	-0,01	-0,01	0,19	2,00	-2,00	
316,228	0,00	0,00	0,19	2,00	-2,00	
334,965	-0,01	-0,01	0,19	2,00	-2,00	
354,813	-0,02	-0,01	0,19	2,00	-2,00	
375,837	-0,02	-0,01	0,19	2,00	-2,00	
398,107	-0,02	-0,01	0,19	2,00	-2,00	
421,697	-0,02	-0,01	0,19	2,00	-2,00	
446,684	-0,02	-0,01	0,19	2,00	-2,00	
473,151	-0,03	-0,02	0,19	2,00	-2,00	
501,187	-0,03	-0,01	0,19	2,00	-2,00	
530,884	-0,03	-0,01	0,20	2,00	-2,00	
562,341	-0,04	-0,02	0,20	2,00	-2,00	
595,662	-0,04	-0,02	0,20	2,00	-2,00	
630,957	-0,05	-0,02	0,20	2,00	-2,00	
668,344	-0,06	-0,02	0,20	2,00	-2,00	
707,946	-0,06	-0,02	0,20	2,00	-2,00	
749,894	-0,06	-0,02	0,20	2,00	-2,00	
794,328	-0,07	-0,02	0,20	2,00	-2,00	
841,395	-0,08	-0,02	0,20	2,00	-2,00	
891,251	-0,09	-0,02	0,20	2,00	-2,00	
944,061	-0,10	-0,03	0,20	2,00	-2,00	
1000,00	-0,10	-0,03	0,20	2,00	-2,00	
1059,25	-0,12	-0,03	0,20	2,00	-2,00	
1122,02	-0,13	-0,03	0,20	2,00	-2,00	
1188,50	-0,14	-0,04	0,20	2,00	-2,00	
1258,93	-0,15	-0,04	0,20	2,00	-2,00	
1333,52	-0,17	-0,04	0,21	2,00	-2,00	
1412,54	-0,19	-0,05	0,21	2,00	-2,00	
1496,24	-0,21	-0,05	0,21	2,00	-2,00	
1584,89	-0,23	-0,06	0,21	2,00	-2,00	
1678,80	-0,26	-0,06	0,21	2,00	-2,00	
1778,28	-0,28	-0,06	0,21	2,00	-2,00	
1883,65	-0,31	-0,06	0,21	2,00	-2,00	
1995,26	-0,34	-0,06	0,21	2,00	-2,00	
2113,49	-0,38	-0,06	0,21	2,00	-2,00	
2238,72	-0,42	-0,06	0,21	2,00	-2,00	
2371,37	-0,47	-0,05	0,21	2,00	-2,00	
2511,89	-0,51	-0,05	0,22	2,00	-2,00	
2660,73	-0,58	-0,05	0,22	2,00	-2,00	
2818,38	-0,64	-0,05	0,22	2,00	-2,00	
2985,38	-0,70	-0,05	0,22	2,00	-2,00	
3162,28	-0,78	-0,05	0,22	2,00	-2,00	
3349,65	-0,86	-0,05	0,22	2,00	-2,00	
3548,13	-0,95	-0,05	0,22	2,00	-2,00	
3758,37	-1,04	-0,05	0,23	2,00	-2,00	

Laboratório de Calibração acreditado pela Cgcre de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob o número CAL 305

Continuação do Certificado de Calibração Nº: CBR2000836

Frequência	Resposta do Atuador Eletrostático	Resposta para o campo sonoro	Incerteza de medição	Tolerância superior	Tolerância inferior	Verificação da tolerância
[Hz]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[X = Falha]
3981,07	-1,15	-0,06	0,23	2,00	-2,00	
4216,97	-1,27	-0,07	0,24	2,00	-2,00	
4466,84	-1,39	-0,07	0,24	2,00	-2,00	
4731,51	-1,52	-0,07	0,24	2,00	-2,00	
5011,87	-1,66	-0,08	0,24	2,00	-2,00	
5308,84	-1,81	-0,07	0,24	2,00	-2,00	
5623,41	-1,98	-0,05	0,24	2,00	-2,00	
5956,62	-2,15	-0,04	0,25	2,00	-2,00	
6309,57	-2,33	-0,02	0,25	2,00	-2,00	
6683,44	-2,51	0,04	0,25	2,00	-2,00	
7079,46	-2,71	0,11	0,25	2,00	-2,00	
7498,94	-2,92	0,17	0,25	2,00	-2,00	
7943,28	-3,14	0,27	0,25	2,00	-2,00	
8413,95	-3,37	0,39	0,29	2,00	-2,00	
8912,51	-3,62	0,53	0,30	2,00	-2,00	
9440,61	-4,13	0,48	0,31	2,00	-2,00	
10000,0	-4,54	0,61	0,32	2,00	-2,00	
10592,5	-4,94	0,84	0,34	2,00	-2,00	
11220,2	-5,33	1,08	0,35	2,00	-2,00	
11885,0	-5,74	1,23	0,36	2,00	-2,00	
12589,3	-6,05	1,30	0,40	2,00	-2,00	
13335,2	-6,35	1,24	0,41	2,00	-2,00	
14125,4	-6,56	1,30	0,42	2,00	-2,00	
14962,4	-6,93	1,32	0,44	2,00	-2,00	
15848,9	-7,43	1,23	0,45	2,00	-2,00	
16788,0	-7,96	0,87	0,49	2,00	-2,00	
17782,8	-8,37	0,61	0,50	2,00	-2,00	
18836,5	-9,09	0,34	0,52	2,00	-2,00	
19952,6	-10,14	-0,21	0,53	2,00	-2,00	

Instrumentos utilizados

Descrição	Fabricante	Modelo	Número de série	Nº Certificado Rastreabilidade	Próxima calibração
Atuador Eletrostático ¹	Brüel & Kjær	UA 0023	AT-01	DIMCI 1353/2019 INMETRO	18/09/2022
Atuador Eletrostático	Brüel & Kjær	UA 0033	AT-02	DIMCI 1354/2019 INMETRO	19/09/2022
Pré-amplificador de microfone	Brüel & Kjær	2669	2344492	DIMCI 1356/2019 INMETRO	25/09/2022

¹ utilizado somente para microfone de 1"

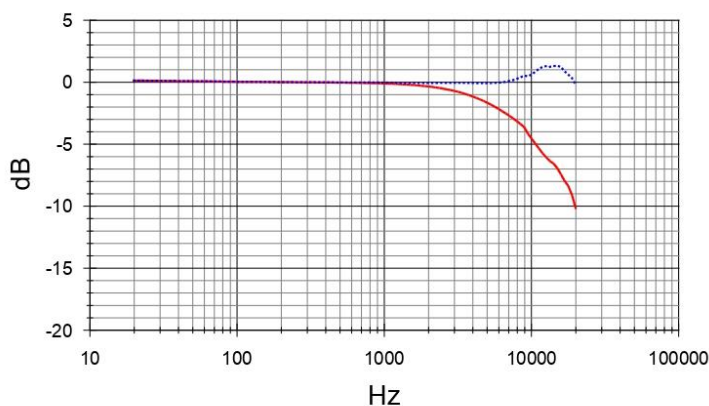
Laboratório de Calibração acreditado pela Cgcre de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob o número CAL 305

Continuação do Certificado de Calibração N°: CBR2000836

Resposta em Frequência Medida

Curva sólida: Resposta do atuador Curva tracejada: Resposta para o campo sonoro

Correção aplicada para o campo sonoro: **Correção para Campo Livre (Free Field)**



Resposta do Campo Sonoro

Curva sólida: Resposta do campo sonoro Curva tracejada: Limites da tolerância

Correção aplicada para o campo sonoro: **Correção para Campo Livre (Free Field)**

