



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – UFOP
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA



PEDRO FARIA OLIVEIRA MORAIS

**MEDIÇÃO E AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS ACÚSTICOS DO TEATRO
MUNICIPAL DE OURO PRETO**

OURO PRETO - MG

2021

PEDRO FARIA OLIVEIRA MORAIS
pedro.morais1@aluno.ufop.edu.br

**MEDIÇÃO E AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS ACÚSTICOS DO TEATRO
MUNICIPAL DE OURO PRETO**

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Professor orientador: DSc. Gustavo Paulinelli Guimarães

OURO PRETO – MG

2021

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

M827m Morais, Pedro Faria Oliveira .
Medição e avaliação dos parâmetros acústicos do teatro municipal de
Ouro Preto. [manuscrito] / Pedro Faria Oliveira Morais. - 2021.
60 f.: il.: color., gráf., tab., mapa.

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Paulinelli Guimarães.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.
Escola de Minas. Graduação em Engenharia Mecânica .

1. Acústica arquitetônica - Salas de recreação. 2. Teatro - Teatro
Municipal - Ouro Preto (MG). 3. Engenharia acústica - Laudo acústicos. 4.
Engenharia acústica - Qualidade Acústica. I. Guimarães, Gustavo
Paulinelli. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 72:711.4

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



FOLHA DE APROVAÇÃO

Pedro Faria Oliveira Morais

Medição e avaliação dos parâmetros acústicos do Teatro Municipal de Ouro Preto

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico

Aprovada em 17 de Dezembro de 2021

Membros da banca

Prof. Dr. Gustavo Paulinelli Guimarães - Orientador(a) - Universidade Federal de Ouro Preto
Prof. Dr. Diogo Antônio de Souza - Universidade Federal de Ouro Preto
Eng. Saulo Neves Matos - Universidade Federal de Ouro Preto

Prof. Dr. Gustavo Paulinelli Guimarães, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 19/12/2021



Documento assinado eletronicamente por **Gustavo Paulinelli Guimaraes, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 19/12/2021, às 22:20, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0260841** e o código CRC **1F872281**.

Agradeço principalmente a minha família por me proporcionarem oportunidades como essa. Aos meus amigos do curso pela parceria durante a graduação. E por fim, à República Canaan por se tornar o meu lar.

AGRADECIMENTOS

O sentimento de imensa felicidade e gratidão que sinto nesse momento é graças ao esforço não só meu, mas também o de muitos que vivenciaram e compartilharam tantos desafios ao meu lado para que isso que tudo se tornasse possível.

Primeiramente, agradeço à minha família por toda a estrutura, valores e essência que me deram. Aos amigos que ajudaram no dia das medições, Gabriel, Higor, Marcelo e Daniel. Ao Diretor do Teatro Municipal de Ouro Preto, Roberto Sussuca, por ter cedido o espaço e acreditar no trabalho.

“Os lábios da sabedoria estão fechados, exceto aos ouvidos do Entendimento”.

O Caibalion

RESUMO

MORAIS, Pedro Faria Oliveira. Avaliação dos parâmetros acústicos coletados no teatro municipal de Ouro Preto através do *software REW*. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica). Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, 61 páginas. 2021.

O estudo da acústica de salas está se sofisticando ao longo dos anos e vem sendo aplicado em diversas áreas no intuito de promover uma boa experiência acústica ao ouvinte ou até mesmo proteger a saúde das pessoas. O Teatro municipal de Ouro Preto foi fundado em 1770 e já passou por diversas reformas estruturais. O local é destinado a apresentações musicais, peças de teatro, dança, palestras, dentre outros espetáculos. A acústica do ambiente foi desenvolvida majoritariamente com base em parâmetros subjetivos da época. O desenvolvimento da tecnologia ao longo das últimas décadas, promoveu um avanço no estudo da acústica de salas. Através de equipamentos eletrônicos e *softwares*, foi possível aprimorar a captação da resposta impulsiva dos ambientes, possibilitando uma melhor análise acústica do local. O crescimento das cidades vem acompanhado com o aumento da geração de ruídos, e por consequência, problemas auditivos nas pessoas foram sendo cada vez mais frequentes devido ao excesso dessa exposição. Dessa forma, ambientes onde uma boa qualidade acústica é exigida, foram se aperfeiçoando para oferecer o devido conforto acústico requerido para cada ambiente específico. Neste âmbito, o objetivo geral deste trabalho é analisar, com as tecnologias atuais, os parâmetros acústicos obtidos experimentalmente através do *software REW* no Teatro Municipal de Ouro Preto, para assim avaliar a qualidade acústica do local. Por meio dessa pesquisa, será possível contribuir para possíveis tratamentos acústicos futuros no teatro, além de favorecer o desenvolvimento dos estudos na área da acústica de ambientes fechados.

Palavras-chave: Acústica de salas. Qualidade acústica. Teatro Municipal de Ouro Preto. Prâmetros acústicos.

ABSTRACT

The study of room acoustics has become more sophisticated over the years and has been applied in several areas to promote a good acoustic and listening experience or even protect people's health. Ouro Preto's municipal theater was founded in 1770 and has undergone several renovations and alterations. The place is intended for musical presentations, theater performances, dance, lectures, among other presentations. The acoustics of the environment were mostly developed based on subjective acoustic parameters used at the time. The development of technology over the last few decades has promoted a breakthrough in the study of room acoustics. Through electronic equipment and software, it was possible to improve the capture of the impulsive response of the environments, enabling a better acoustic analysis of the place. The growth of cities has been accompanied by an increase in noise generation, and consequently, hearing problems in people were increasingly frequent due to excessive exposure. Thus, environments where a good acoustic quality is required have been improved to offer the acoustic comfort required for each specific environment. In this context, the general objective of this work is to analyze, with current technologies, the acoustic parameters obtained experimentally through the REW software in the Municipal Theater of Ouro Preto, to evaluate the acoustic quality of the place. Through this research, it will be possible to contribute to possible future acoustic treatments in theatre, in addition to favoring the development of studies in indoor acoustics.

Key-words: Room acoustics. Acoustic quality. Ouro Preto Municipal Theater. Acoustic parameters.

LISTA DE SIMBOLOS

RT60: Tempo de Reverberação [s]

Topt: Tempo de decaimento RT60 ideal com base na inclinação da curva de Schroeder [s]

EDT: Tempo de Decaimento Inicial [s]

C50: Clareza [dB]

C80: Clareza [dB]

D50: Definição [%]

λ : Comprimento de Onda [m]

c: Velocidade do som [m/s]

F: frequência [Hz]

I: Intensidade [W/m^2]

P: Quantidade de Energia [W]

b: Espessura [m]

V: Volume [m³]

a: Coeficiente de absorção sonora

A: Área [m²]

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Som direto e sons refletidos em uma sala de aula.....	9
Figura 2 - Campo Auditivo do ser humano.....	10
Figura 3 - Níveis de Ruído em Decibéis.. ..	11
Figura 4 - Representações do Som.....	15
Figura 5- Comprimento de Onda.	16
Figura 6 - Superfícies típicas habitualmente existentes numa sala.....	18
Figura 7- Representação do comportamento de um raio sonoro em diferentes meios.	19
Figura 8 - Difração do som.	21
Figura 9 - Difusão do Som.....	21
Figura 10 - Formação de Ondas Estacionárias.....	22
Figura 11 - Tempo de Reverberação: RT60 (A) RT30/RT20 (B).	25
Figura 12- Tempo Ótimo de Reverberação de acordo com uso.	26
Figura 13 - Relação entre inteligibilidade e definição.	29
Figura 14 – Tipos de planta baixa comuns encontrados em auditórios.	32
Figura 15 – Vista do palco com a marcação do local das medições.	37
Figura 16 – Setup de Medição	39
Figura 17 - Fachada da Casa da Ópera de Vila Rica.	44
Figura 18– Localização do Teatro Municipal de Ouro Preto.....	44
Figura 19 – Vista interna do Teatro Municipal de Ouro Preto.	45
Figura 20 - T_{opt} médio.	48
Figura 21 - T_{opt} médio por andar.	49
Figura 22 – EDT médio.....	49
Figura 23- EDT médio por andar.....	50
Figura 24- C_{50} médio.	51
Figura 25 - C_{50} médio por andar.	52
Figura 26 - C_{80} médio.	53
Figura 27 – C_{80} médio por andar.	54
Figura 28 – D_{50} médio.	55
Figura 29 - D_{50} médio por andar.....	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Coeficientes de Absorção	20
Tabela 2 – Variáveis e Indicadores	38
Tabela 3 – Dados tratados e organizados no software Microsft Excel.	42
Tabela 4 - Dimensões do teatro.....	46
Tabela 5 – Médias gerais dos parâmetros selecionados.....	46
Tabela 6 – Desvio padrão entre as médias de Topt.....	48
Tabela 7 – Desvio padrão entre as médias de EDT	50
Tabela 8 – Desvio padrão entre as médias de C50	51
Tabela 9 – Desvio padrão entre as médias de C80	53
Tabela 10 – Desvio padrão entre as médias de D50	55

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	8
1.1	Formulação do Problema.....	8
1.2	Justificativa.....	10
1.3	Objetivo.....	12
1.3.1	Geral.....	12
1.3.2	Específicos.....	12
1.4	Estrutura.....	12
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
2.1	Análises acústicas.....	14
2.2	Propagação do Som e das Ondas.....	15
2.2	Comprimento de Onda e Velocidade do Som.....	16
2.3	Características do Som.....	17
2.4	Comportamento do Som em Ambientes Fechados.....	17
2.4.1	Reflexão, Refração e Absorção do Som.....	18
2.4.2	Difração e Difusão do Som.....	20
2.4.3	Padrões de Ondas Estacionárias.....	22
2.5	Qualidade acústica de salas.....	23
2.5.1	Tempo de Reverberação.....	25
2.5.2	Tempo de Decaimento Inicial (<i>EDT</i>).....	27
2.5.3	Inteligibilidade.....	28
2.5.4	Definição (D50).....	28
2.5.5	Clareza (C50/C80).....	30
2.5.6	Ruído de Fundo.....	31
2.7	Características das Casas da Ópera.....	31

2.8 Software Room EQ Wizard (REW)	32
3. METODOLOGIA	34
3.1 Tipo de Pesquisa.....	34
3.2 Materiais e Métodos	36
3.2.1 Descrição da metodologia das medições	37
3.3 Variáveis e Indicadores	38
3.4 Instrumentos de Coleta de Dados	39
3.5 Tabulação dos Dados.....	40
3.6 Considerações Finais do capítulo	40
4- RESULTADOS E DISCUSSÕES	41
4.1 Apresentação dos dados tratados no <i>Microsoft Excel</i>	41
4.1 Informações do local estudado	44
4.2 Médias gerais dos parâmetros selecionados	46
4.3 Resultado dos parâmetros acústicos	47
4.3.1 <i>Topt</i>	47
4.3.2 <i>EDT</i>	49
4.3.3 C50	51
4.3.4 C80	53
4.3.5 D50.....	55
5- CONCLUSÃO	57
5.1 Conclusão	57
5.2 Considerações Finais	57
BIBLIOGRAFIA	59

1 INTRODUÇÃO

O primeiro capítulo aborda os principais elementos a serem tratados, por meio da formulação do problema nessa área, a justificativa acerca da importância dessa pesquisa, a apresentação dos objetivos geral e específicos e por fim, a estrutura em que esse trabalho será mostrado.

1.1 Formulação do Problema

A acústica de salas é um termo bem amplo que descreve basicamente as propriedades acústicas de espaços fechados, se destinando ao estudo da modelagem da propagação sonora em ambientes e no condicionamento acústico de recintos como salas de aula, salas de concerto, teatros, igrejas, salas de conferência, escritórios, cinemas, estúdios etc.

De acordo com Brandão (2016):

A acústica de salas, enquanto disciplina científica, serve ao propósito de elucidar como o som se propaga nos mais diversos tipos de ambiente (não só as salas de concerto e os estúdios). Além disso, como a experiência de qualquer ser humano em uma sala é subjetiva, é preciso criar formas de mensurar essa experiência com métricas objetivas. Em suma, nós queremos quantificar o quão agradável é ou será a sua experiência em uma sala existente ou em projeto.

Medir e controlar o comportamento das ondas é particularmente útil em ambientes onde a qualidade acústica é importante. Com isso, a resposta acústica da sala deve atender ao seu objetivo principal, surgindo assim, a necessidade de avaliar a percepção sonora humana dentro de cada ambiente.

Em um ambiente fechado, os ouvintes escutam o som direto do locutor seguido por muitas reflexões atrasadas do discurso. Embora o que normalmente é ouvido seja o efeito combinado de diversas reflexões, todos os reflexos não são iguais e nem todos afetam o ouvinte da mesma maneira (BISTAFÁ E GRANADO, 2005).

A Figura 1 demonstra como o som direto e o som refletido chegam até os ouvintes.

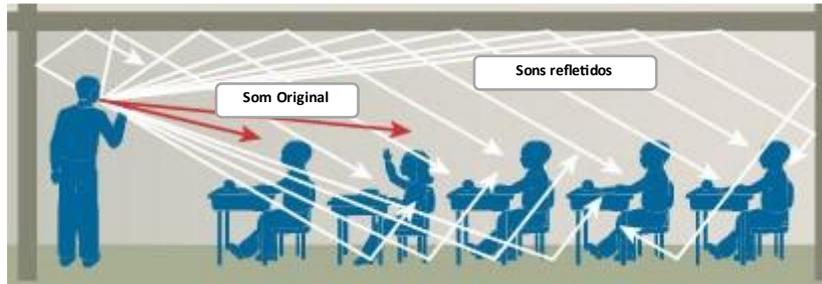


Figura 1- Som direto e sons refletidos em uma sala de aula.
Fonte: Adaptado de UFRRJ (2000).

Na figura 1, as setas em vermelho indicam o som direto sendo emitido pelo professor, as setas em branco indicam as reflexões emitidas pelas superfícies da sala que chegam até os ouvintes. Quando se trata de música, estas reflexões podem favorecer a mistura dos sons, contribuindo para o colorido musical, como disse Donoso (2005). Paralelo a isso, o excesso de reflexões pode dificultar o entendimento do ouvinte em ambientes onde a fala é prioridade.

A Universidade Federal de Santa Maria (2021) entende que:

O estudo da acústica de salas compreende tanto a caracterização acústica de ambientes já existentes por meio de técnicas experimentais e numéricas, quanto o projeto, adequação e simulação acústica de novos recintos.

Com base em medições, as propriedades acústicas de um espaço fechado podem ser modificadas, redesenhando o ambiente ou adicionando materiais nas paredes e tetos que promovam isolamento, absorção ou difração do som.

Antes da revolução digital, os parâmetros utilizados em projetos acústicos eram majoritariamente subjetivos, vinculados à percepção e interpretação acústica do ouvinte. Com o desenvolvimento exponencial da tecnologia, as medições têm se tornado cada vez mais precisas, facilitando a análise dos parâmetros acústicos em ambientes fechados. Entretanto é necessário um elevado investimento em sensores de instrumentação, *hardware*, *software* e mão de obra especializada.

Diversos parâmetros auxiliam na caracterização das propriedades acústicas de uma sala, nesse trabalho serão analisadas as medições realizadas no Teatro Municipal de Ouro Preto, localizado em Ouro Preto – MG. Serão levantados os seguintes parâmetros para análise da qualidade acústica do local: Tempo de Reverberação ($RT60$), Tempo de Decaimento Inicial (EDT), Clareza ($C50$ e $C80$) e Definição ($D50$).

Diante desse cenário, tem-se a seguinte questão problema:

Qual a atual condição acústica Teatro Municipal de Ouro Preto?

1.2 Justificativa

Segundo a Casa da Ópera (2021), o Teatro Municipal de Ouro Preto foi fundado em 1770 e é hoje o teatro mais antigo em funcionamento da América Latina. Tendo em vista a ausência de equipamentos na época para análises acústicas de ambientes, os projetistas utilizavam principalmente de parâmetros acústicos subjetivos. Hoje com o desenvolvimento da tecnologia, é possível realizar medições e modelagens acústicas que promovam maior assertividade no desenvolvimento de uma boa qualidade acústica do local.

Na maioria dos casos, o consumidor final da acústica é o ouvinte que deseja apreciar um concerto de música, que assiste a uma palestra ou uma apresentação de teatro, por exemplo. O ouvinte não exige que o tempo de reverberação, nas várias frequências, tenha certos valores e nem insiste que a pressão sonora deva exibir certos valores específicos. Em vez disso, ele espera que a sala com sua acústica apoie a música que está sendo executada ou torne a fala facilmente inteligível.

Sabe-se que a faixa de percepção do som para humanos vai de 20 a 20.000 Hz, e que a percepção das frequências mais altas diminui gradualmente com a idade, principalmente quando exposta a níveis excessivos de ruído onde a audição pode ser danificada.

A Figura 2 representa o campo auditivo do ser humano.

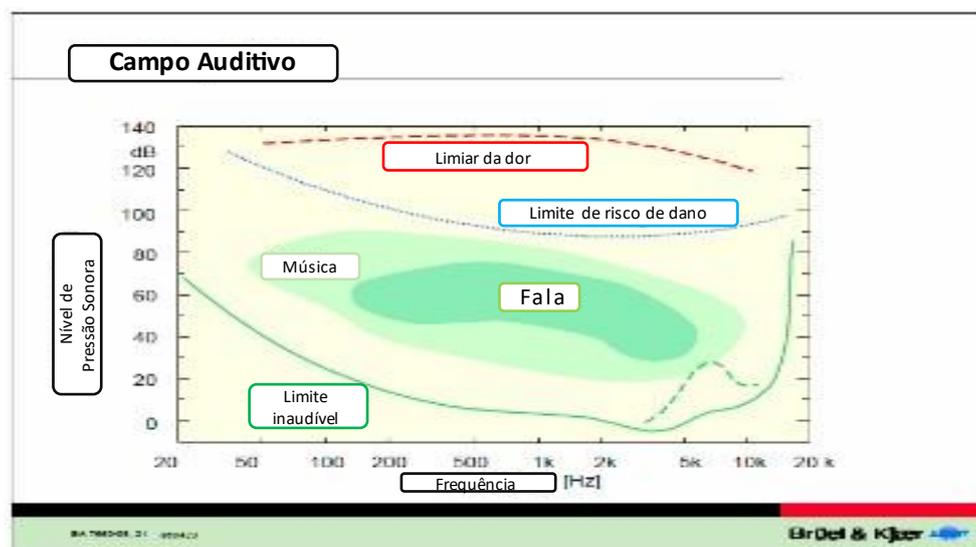


Figura 2 - Campo Auditivo do ser humano.
Fonte: Adaptado de Brüel & Kjær (1998).

A Figura 2 demonstra o campo auditivo do ser humano em termos de faixa de frequências e nível de pressão sonora. Dentro dele, estão os campos que abrangem a fala, a música, e as linhas dos limites fisiológicos do ser humano.

O crescimento desgovernado das cidades nos últimos anos vem contribuindo para a geração de ruídos e tem afetado diretamente na qualidade de vida das pessoas e de ambientes onde necessita-se de uma boa qualidade acústica. A poluição sonora é uma questão de saúde pública e considerada pela OMS (Organização Mundial de Saúde) a terceira maior poluição do planeta, perdendo apenas para a do ar e da água.

Assim como explica Moudon (2009), em 2000 a OMS produziu diretrizes sobre ruído ocupacional e comunitário. A União Europeia instituiu programas de vigilância e redução de ruído nas cidades. Nos EUA, algumas cidades revisaram suas leis de ruído, mas as iniciativas proativas de redução de ruído permanecem confinadas a novos projetos de infraestrutura de transporte, deixando assim uma grande parte da população em risco.

A Figura 3 mostra os níveis de ruído gerado por alguns objetos em decibéis.

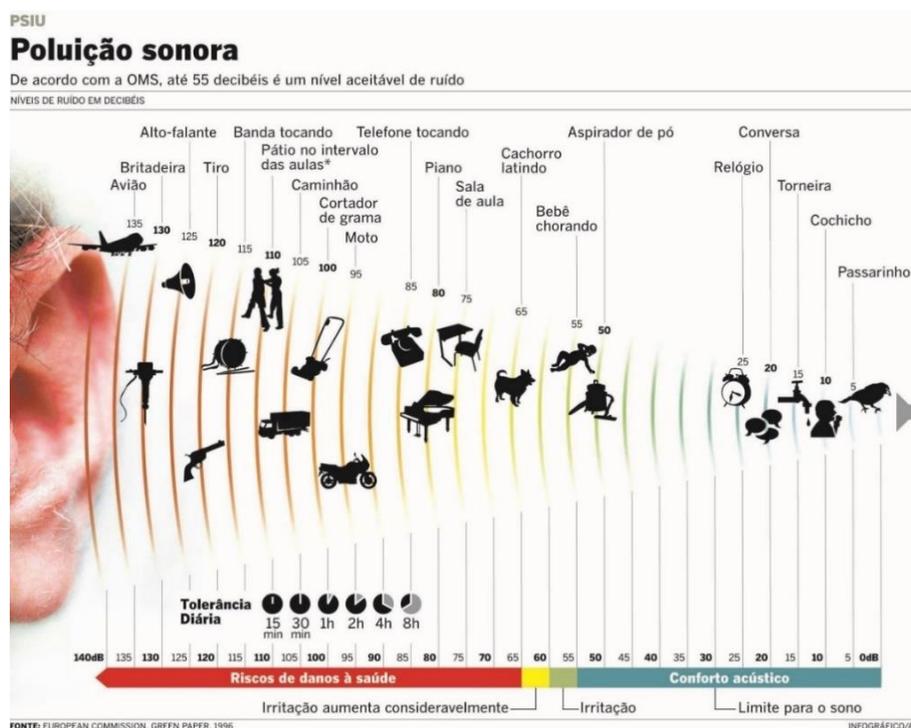


Figura 3 - Níveis de Ruído em Decibéis.

Fonte: European Commission - Green Paper (1996).

A figura 3 ilustra uma comparação entre os níveis de pressão sonora de emitidos por algumas fontes sonoras presentes no cotidiano. Nota-se que acima de 55dB já causa irritação ao ouvido humano, e para níveis acima de 65dB a exposição ao ruído pode trazer danos à saúde.

Em função disso, o trabalho visa realizar uma avaliação dos parâmetros acústicos coletados no teatro Municipal de Ouro Preto através do *software REW*, averiguando a qualidade acústica do local, mesmo com os elevados níveis de poluição sonora atuais.

1.3 Objetivo

1.3.1 Geral

O objetivo do trabalho é identificar quais são os parâmetros utilizados para avaliação da qualidade acústica em ambientes fechados, e em seguida, realizar testes *in loco* para coletar os valores desses parâmetros no Teatro Municipal de Ouro Preto. Ao obter os resultados, será avaliada a qualidade acústica do local segundo algumas recomendações presentes na literatura da área da acústica.

Ao identificar quais propriedades do campo sonoro estão relacionadas a certas impressões auditivas, é possível definir quais são os parâmetros físicos que influenciam a impressão do ouvinte na caracterização acústica de uma sala. Com essas considerações, o estudo não terá fatos puramente físicos, alinhando também os elementos subjetivos da percepção humana.

1.3.2 Específicos

- Realizar um estudo teórico em cima da acústica de salas e as propriedades físicas e subjetivas que definem uma boa qualidade acústica;
- Analisar os dados levantados a partir dos testes *in loco* para avaliar a qualidade acústica do ambiente.

1.4 Estrutura

O trabalho está dividido em cinco capítulos, em que o primeiro é composto pela introdução, onde inicialmente ocorre a formulação do problema, seguido pela justificativa, objetivos gerais e específicos e a estrutura do texto.

O segundo capítulo aborda a revisão bibliográfica, contendo teorias e conceitos que circundam a acústica de salas e o conforto acústico.

No terceiro capítulo, a metodologia foi desenvolvida para elaboração de um procedimento metodológico, composto principalmente, pelos materiais e métodos utilizados para obter os valores do Tempo de Reverberação (*RT60*), Decaimento Inicial (*EDT*), Clareza (*C50* e *C80*) e Definição (*D50*).

O quarto capítulo é composto pelos resultados e discussões, juntamente com a análise dos dados obtidos no capítulo terceiro em comparação com a fundamentação teórica do capítulo segundo.

Por fim, o capítulo quinto trata das conclusões e recomendações para trabalhos futuros acerca do caso estudado.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo desenvolve-se o tema sobre análises acústicas, propagação do som e das ondas, comprimento de onda e velocidade do som, características do som, comportamento do som em ambientes fechados, qualificação da acústica de salas, características das casas de ópera.

2.1 Análises acústicas

De acordo com Kuttruff (2001), qualquer campo sonoro complexo pode ser considerado como uma superposição de inúmeras ondas sonoras simples. Dessa forma, a acústica usa fórmulas e conceitos que permitem uma compreensão melhor desse fenômeno ondulatório.

Assim como Plomp (2002) propôs em seu livro *The Intelligent Ear: On the Nature of Sound Perception*, a palavra som é usada neste trabalho com dois significados diferentes: no sentido físico, como vibrações do ar originadas de uma fonte, e no sentido perceptivo, referindo-se há como essas vibrações são percebidas pelos ouvintes.

De forma complementar, Kuttruff (2001) diz que as técnicas de medição acústica servem como uma investigação da opinião pública sobre as qualidades acústicas de uma sala. E essas técnicas de medição servirão melhor ao seu propósito quanto mais próximos os parâmetros medidos do campo sonoro estiverem relacionados aos parâmetros subjetivos. Sendo assim, o estudo da acústica utiliza de aproximações, simplificações, métodos e modelos estatísticos, na tentativa de se obter uma imagem mais próxima da realidade. Os diversos dados obtidos do campo sonoro são geralmente reduzidos estatisticamente para que sejam mais tratáveis, facilitando assim o entendimento do comportamento sonoro e suas características. O problema é realizar essas reduções e simplificações de acordo com as propriedades da audição humana, ou seja, de tal forma que os parâmetros correspondam o mais próximo possível a determinadas sensações subjetivas.

2.2 Propagação do Som e das Ondas

A propagação do som, segundo Everest (2001), se inicia quando uma partícula de ar é deslocada de sua posição original, dessa forma as forças elásticas do ar tendem a restaurá-la à sua posição inicial. Devido a inércia da partícula, ela ultrapassa a posição de repouso, colocando em ação forças elásticas na direção oposta e assim por diante. Por tanto, o som é a energia vibratória das partículas de ar.

De forma geral, a propagação do som é um conjunto de ondas mecânicas que transportam, em movimentos periódicos, energia cinética e potencial, necessitando de um meio para se propagar, seja ele líquido, sólido ou gasoso, assim como explica Halliday & Resnick (2014). Quanto maior a densidade do meio, maior será a interação entre as partículas e conseqüentemente maior será a velocidade de propagação do som. Na presença de vácuo, não existem partículas a serem interagidas, logo não há propagação do som.

A figura remete as representações do som.

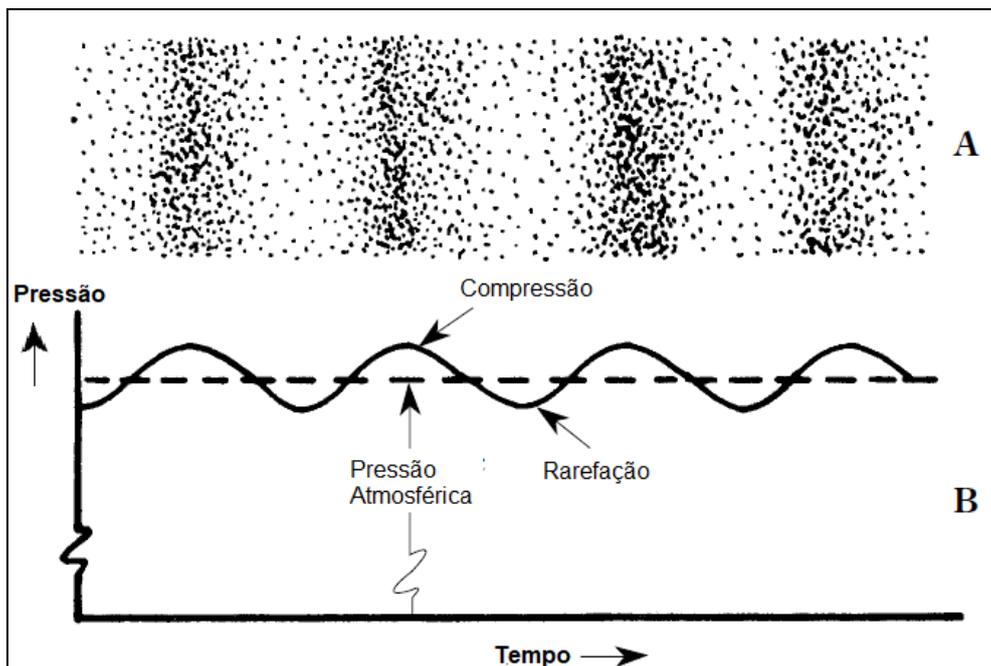


Figura 4 - Representações do Som.
Fonte: Everest (2001).

Os pequenos pontos representados na Figura 4-A são moléculas de ar se interagindo em movimentos periódicos. As moléculas aglomeradas representam áreas de compressão com aumento da pressão do ar. Na região onde as moléculas encontram-se mais espaçadas, são representadas as rarefações, com redução na pressão do ar. A Figura 4-B é uma representação gráfica da propagação do som, ou seja, ciclos de compressão e rarefação das moléculas do ar.

2.2 Comprimento de Onda e Velocidade do Som

A figura 5 representa uma onda sonora em comparação com as zonas de compressão e rarefação do ar.

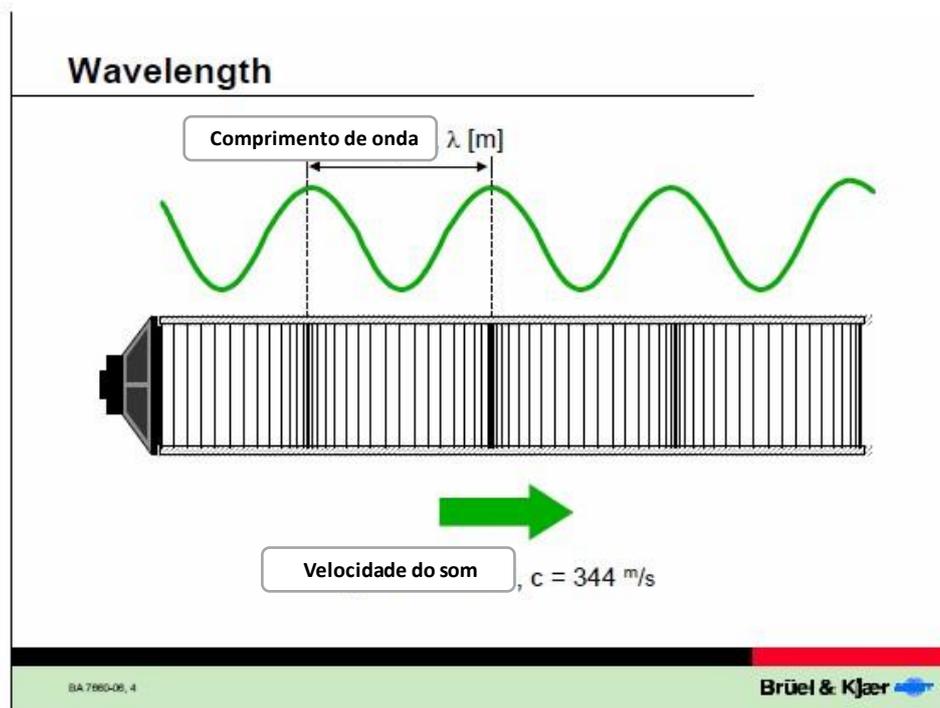


Figura 5- Comprimento de Onda.
Fonte: Adaptado de Bruel & Kjaer (1988).

Tal como Halliday & Resnick (2014), o comprimento de onda (λ) pode ser definido como a distância que uma onda percorre para completar um ciclo, pode ser medido entre picos ou vales sucessivos, como demonstrado na Figura 5.

A velocidade do som é a rapidez em que uma onda é capaz de se propagar através do espaço. Ela depende das propriedades para armazenar energia cinética e energia potencial do meio em que essa onda se propaga, assim como explica Halliday & Resnick (2014). A velocidade de propagação do som ao nível do mar na temperatura de 20 °C é aproximadamente 343 m/s.

A equação abaixo representa como obter o comprimento de onda relacionando o comprimento de onda e a velocidade do som.

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1)$$

Sendo que a frequência (número de ciclos em um determinado período de tempo) é f , o comprimento de onda é λ e a velocidade som no ar é c .

2.3 Características do Som

De forma geral Roosing, Moore & Wheeler (2014) elucida que existem três características básicas que nos permitem identificar um determinado som: a altura, o timbre (relacionado ao espectro) e a intensidade. A altura do som está relacionada à frequência. Sons agudos (ou altos) possuem elevada frequência e comprimentos de onda curtos. Já os sons graves (ou baixos) possuem baixa frequência e grandes comprimentos de onda.

Segundo Everest (2001), intensidade do som é a quantidade de energia que a onda sonora transporta por área unitária, conforme a equação 2.

$$I = \frac{P}{A} \quad (2)$$

Sendo que I é a intensidade, P é a quantidade de energia e A é a onda sonora transportada por área.

A intensidade com que ouvimos um som é apenas uma pequena parte da potência sonora radiada pela fonte sonora, sendo medida em Watt por metro quadrado (Henrique, 2002). Ela também está relacionada a amplitude, quanto maior for a amplitude, maior será a intensidade. Dessa forma é possível caracterizar de forma objetiva um som forte de um som fraco.

De acordo com Roosing, Moore & Wheeler (2014) é através do timbre que é possível distinguir a natureza da fonte sonora, pois cada fonte apresenta um modo de vibração próprio, ou seja, um som característico. O timbre, segundo Havelock, Kuwano & Vorlander (2008) é a cor do som, o que distingue o som de um trompete e um violino. De forma complementar Everest (2001), diz que o timbre é um termo subjetivo, sendo o espectro o seu o termo físico análogo.

2.4 Comportamento do Som em Ambientes Fechados

Para Henrique (2002), a acústica de salas estuda o campo sonoro complexo gerado em espaços fechados. É fundamental definir para que fim se destina o ambiente, pois cada um apresenta exigências acústicas diferentes, sejam eles, auditórios, teatros, salas de aula, estúdios para gravação

etc. Entretanto, em qualquer um dos casos, o importante é que a mensagem a ser transmitida seja bem perceptível ao ouvinte.

A figura 6 representa as superfícies típicas habitualmente existentes numa sala.

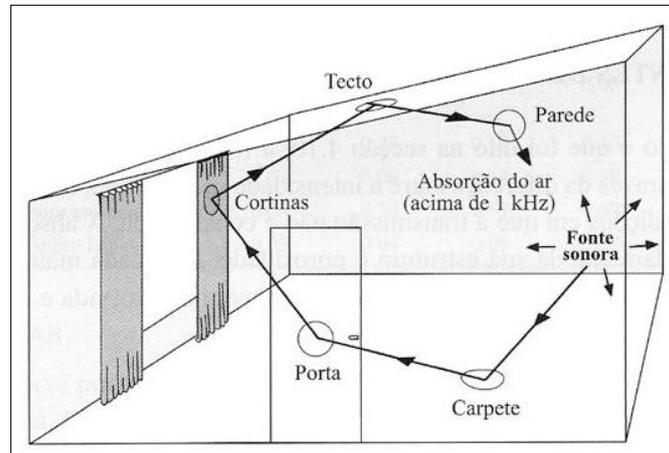


Figura 6 - Superfícies típicas habitualmente existentes numa sala.
Fonte: Bruel & Kjaer (1988).

No campo sonoro de uma sala, o som viaja em todas as direções possíveis, dependendo da diretividade da fonte, colidindo em paredes, tetos, pisos, objetos etc. como mostrado na Figura 6.

De acordo com Lavoisier *apud* Unicamp (2021) “na natureza nada se cria, nada se perde, tudo se transforma”. A lei da conservação de energia afirma que a energia não pode ser criada nem destruída, mas pode ser alterada de uma forma para outra.

Sendo assim, o comportamento acústico em ambientes fechados é o resultado de fenômenos físicos da propagação das ondas no ambiente. Fenômenos físicos importantes para reforço de som interno são refração, reflexão, difusão, difração e absorção (HAVELOCK, KUWANO, & VORLANDER, 2008).

2.4.1 Reflexão, Refração e Absorção do Som

De acordo com Brüel & Kjør (1998), quando o som atinge superfícies maiores do que seu comprimento de onda, ocorrem reflexões. Caso a superfície tenha muita pouca absorção, todo o som refletido terá energia igual ao som direto originado da fonte. Se toda a energia refletida é perdida devido à alta absorção das superfícies refletoras, obtêm-se uma sala anecoica, que são salas com ausência de reflexões com tempo de reverberação muito baixo.

A figura 7 mostra o comportamento de um raio sonoro em diferentes meios.

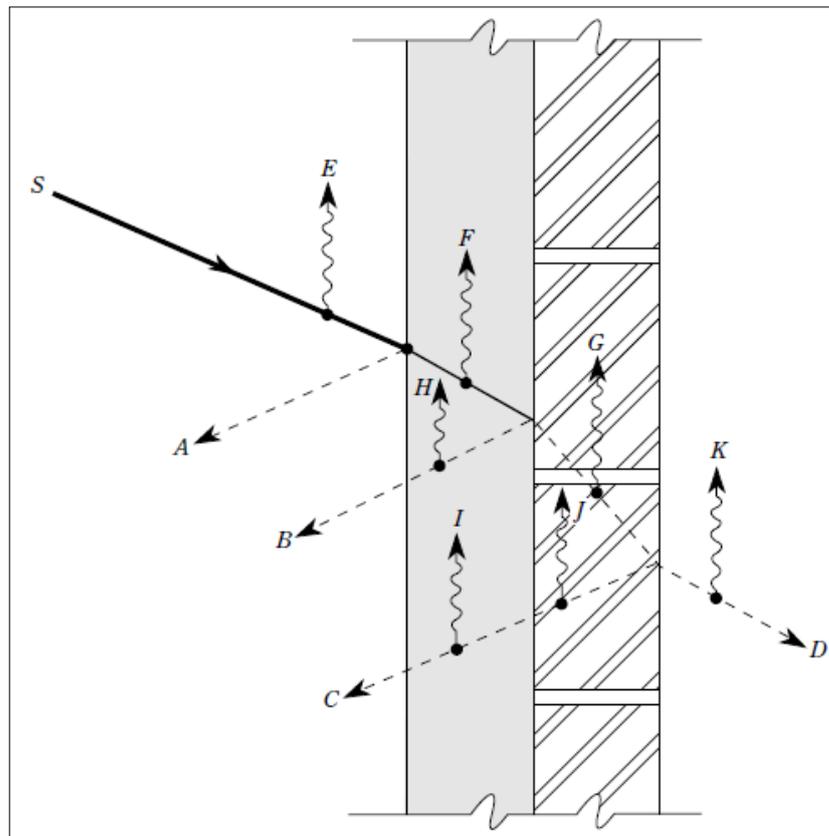


Figura 7- Representação do comportamento de um raio sonoro em diferentes meios.
Fonte: Everest (2001).

A Figura 7 demonstra um raio de som incidindo sobre um material acústico em uma parede de alvenaria. Através dessa figura, é possível entender melhor os fenômenos de absorção, reflexão e refração do som. Após o raio de som atingir a superfície dos blocos de concreto (superfície cinza) acontecem reflexões em três superfícies diferentes (pontos iniciais das linhas A, B e C), e diferentes graus de refração em cada interface. Segundo Everest (2001), a inclinação das linhas de refração, está relacionada a densidade do meio, quanto maior for a densidade, maior é a refração do som e conseqüentemente maior a inclinação.

Conforme Everest (2001), cada reflexão e passagem do som pelo ar ou pelo material acústico, é dissipada parte da energia original do raio do som. As linhas verticais da Figura 7 representam a perda de calor pelo atrito que cada material oferece às vibrações das partículas de ar. As linhas E e K, no caso, representam a absorção do som pelo ar, que acontece em frequências muito altas.

Para Havelock, Kuwano & Vorlander (2008), a reflexão é a capacidade do material da superfície de espelhar uma onda sonora de entrada com uma certa perda, sendo a ideia oposta da absorção.

O coeficiente de absorção é dado pela relação entre a energia sonora incidente e a absorvida, caracterizando assim, a eficiência de uma superfície ou material na absorção do som. Ele varia com a frequência e com o ângulo em que a onda sonora ou raio incide sobre o material. Nos cálculos, coeficientes de absorção sonora, são obtidos através da média sobre todos os ângulos de incidência possíveis (EVEREST, 2001).

A Tabela 1, mostra exemplos de alguns coeficientes de absorção comumente utilizados:

Tabela 1- Coeficientes de Absorção

	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz
Concreto pintado	0.05	0.06	0.07	0.09
Janela de vidro	0.25	0.18	0.12	0.07
Argamassa	0.09	0.07	0.05	0.05
Bloco de concreto	0.44	0.31	0.29	0.39
Piso de pedra	0.01	0.01	0.01	0.02
Piso de madeira	0.11	0.10	0.07	0.06
Piso de carpete	0.05	0.10	0.20	0.45
Telha acústica	0.93	0.83	0.99	0.99

Fonte: Donoso (2005).

Nota-se a grande divergência entre os coeficientes de absorção de acordo com cada material. Reforçando a importância da seleção correta dos materiais no interior do recinto, pois eles influenciam diretamente na percepção sonora dos ouvintes.

2.4.2 Difração e Difusão do Som

O fenômeno da difração está relacionado ao fato de que o som é capaz de viajar em torno de cantos/quinas e através de obstáculos. As frentes de ondas sonoras (*Sound wave fronts*) e os raios sonoros viajam em linha reta, exceto quando algo fica no caminho. Obstáculos podem fazer com que o som seja alterado em sua direção de seu caminho retilíneo original. O processo pelo qual essa mudança de direção ocorre é chamado de difração (Everest, 2001).

Segundo Brüel & Kjær (1998), quanto menor o comprimento de onda, ou seja, quanto maior a frequência, menor é o fenômeno da difração. Por isso a difração é menos detectável para a luz do que para o som, devido aos comprimentos de onda extremamente curtos da luz. Em salas, as notas graves são mais proeminentes porque seus comprimentos de onda são mais longos e assim facilmente difratados em cantos e obstáculos.

De acordo com Havelock, Kuwano & Vorlander (2008), a difração é a curvatura de uma onda sonora em torno de um obstáculo, caso o obstáculo seja pequeno em relação ao comprimento de onda. Caso contrário, o obstáculo sombreia o som. A figura 8 representa a difração do som e suas particularidades.

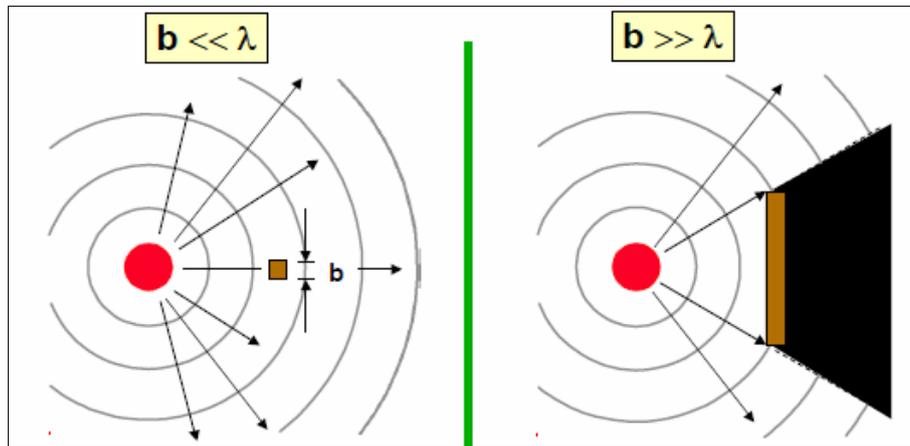


Figura 8 - Difração do som.
Fonte: Brüel & Kjær (1998).

O tamanho da obstrução, para Brüel & Kjær (1998), deve ser comparado ao comprimento de onda do campo sonoro para estimar a quantidade de difração. Se a obstrução, representa na Figura 8 por b , for menor que o comprimento de onda (λ), a obstrução é insignificante. Se a obstrução for maior que o comprimento de onda, o efeito será perceptível como um efeito de sombra.

A difusão é uma forma especial de reflexão, segundo Havelock, Kuwano & Vorlander (2008). Os materiais difusores possuem irregularidades superficiais desejadas que devem propagar a onda sonora que chega igualmente em todas as direções.

A figura 9 representa a difusão do som e suas particularidades.

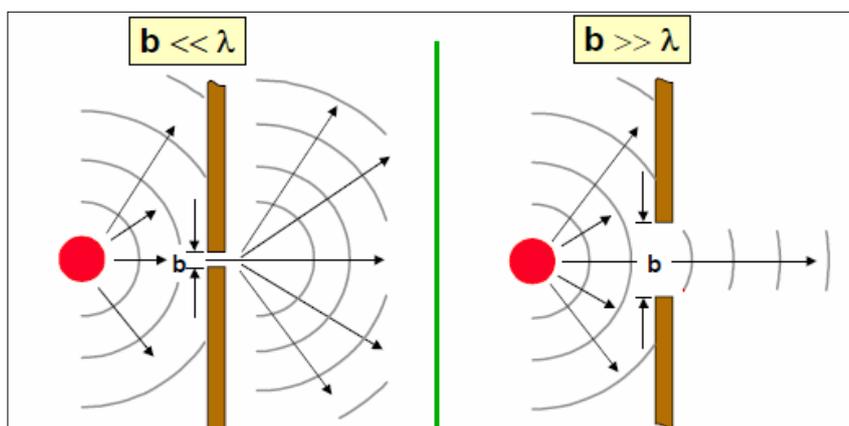


Figura 9 - Difusão do Som.
Fonte: Brüel & Kjær (1998).

A difusão ocorre, segundo o exemplo de Brüel & Kjær (1998), quando o som passa através de orifícios em um muro. No lado esquerdo da Figura 9 é apresentado um exemplo de quando os orifícios (de espessura b) são menores do que o comprimento de onda (λ) do som, assim, a passagem do som será irradiada novamente em um padrão omnidirecional (todas as direções) semelhante à fonte sonora original. Já no lado direito da figura 9, é mostrada a situação oposta, quando o orifício tem dimensões maiores do que o comprimento de onda do som, quando isso ocorre, o som terá um efeito direcional.

2.4.3 Padrões de Ondas Estacionárias

Segundo Roosing, Moore & Wheeler (2014), o fenômeno que dá origem as ondas estacionárias é a ressonância. Elas normalmente ocorrem quando as ondas estão confinadas em um determinado espaço, e são resultantes da superposição de ondas de mesma frequência, mesma amplitude, mesmo comprimento de onda, mesma direção e sentidos opostos, passando a ter um padrão de vibração estacionário. As ondas estacionárias são definidas como um particular padrão de interferência.

A figura 10 representa a formação das ondas estacionárias.

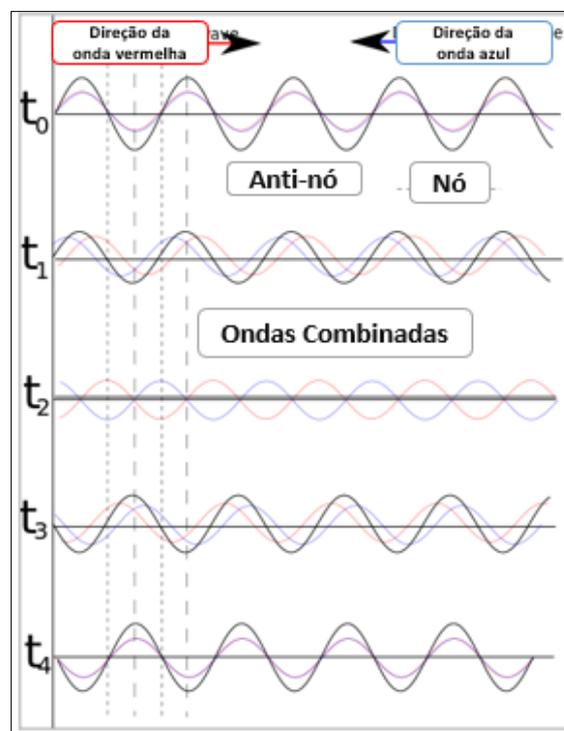


Figura 10 - Formação de Ondas Estacionárias.
Fonte: Adaptado de Vieira (2006).

A Figura 10 mostra quando uma onda estacionária é formada, alguns pontos do espaço permanecem em repouso durante todo o tempo, chamados de nós, formando regiões de interferência total. Além disso, também são formados pontos de interferência construtiva, chamados de antinós, que são a resultante do encontro entre os vales e entre as cristas das ondas que estão se interagindo.

De acordo com Havelock, Kuwano & Vorlander (2008), em um ambiente fechado, o som refletido irá interferir com outras ondas sonoras de mesma ou de outras fontes. Se o comprimento de onda corresponder a uma ou várias dimensões da sala, essas ondas criarão os chamados padrões de ondas estacionárias. Esse fenômeno pode acumular determinadas frequências em algumas áreas, dando uma impressão crescente do som, ou cancelar essas ondas em outras áreas, deixando o som aparentemente mais fraco.

Portanto, o conhecimento das ondas estacionárias pode ser utilizado para acentuar ou cancelar determinadas frequências, podendo assim alterar a forma e as dimensões do local, dependendo da intenção do ambiente.

2.5 Qualidade acústica de salas

Sabe-se que não é possível criar o ambiente acústico ideal. O prazer de ouvir música, por exemplo, está diretamente ligado ao gosto pessoal do ouvinte, e isso varia de uma pessoa para outra. Por este motivo, sempre haverá diferentes opiniões sobre a qualidade acústica de ambientes. Entretanto, claramente um dos objetivos no estudo da acústica de salas, é o de evitar deficiências acústicas e erros.

Segundo Henrique (2002), o volume e o formato do recinto, juntamente dos materiais presentes no local, são de extrema importância para a qualidade da acústica do ambiente, pois eles interferem na captação das ondas emitidas dentro do recinto, e conseqüentemente, na interpretação do som pelo ouvinte. Evitar ecos, efeito de focalização sonora e exercer um bom isolamento do ruído exterior, são alguns dos objetivos em ambientes onde a inteligibilidade de fala é importante.

A qualidade acústica de uma sala pode ser avaliada por meio de parâmetros objetivos (através de cálculos ou medições), e parâmetros subjetivos, relacionados à percepção subjetiva do ouvinte. Os principais parâmetros selecionados pelo Donoso (2005) em sua apostila da IFSC para determinação da qualidade acústica de uma sala, são:

- Intimidade (*intimacy*): sensação acústica de se estar perto da fonte sonora;
- Vivacidade (*liveness*): tempo de reverberação para médias e altas frequências;
- Calor (*warmth*): relacionado a riqueza dos sons graves (75 a 350 Hz);
- Brilho (*brilliance*): boa percepção de altas frequências;
- Intensidade do som direto (*loudness*);
- Nível de som reverberante: deve ser o mesmo em todo o auditório;
- Clareza (*definition, clarity*): mede o grau de percepção de todos os detalhes musicais ou o grau de definição com que os sons são percebidos como distintos;
- Envolvimento e difusão (*diffusion, uniformity*): boa distribuição do som;
- Equilíbrio tímbrico (*balance*): igualdade na recepção de todos os tipos de sons;
- Ruído de fundo (*background noise*): deve ser menos de 24 dB a 1000 Hz.

De acordo com Roosing, Moore & Wheeler (2014), os requisitos acústicos para salas de concerto, óperas, salas de leitura, teatros e igrejas são bastante diferentes, mas há uma série de requisitos comuns que devem ser atendidos:

1- Volume adequado: todos devem ser capazes de ouvir o palestrante ou artista. A sala não deve ser muito grande ou ter absorção excessiva;

2- Uniformidade: Os ouvintes em todas as partes da sala devem ouvir quase o mesmo som possível. Deve haver um número suficiente de superfícies de difusão de som para evitar pontos “mortos”. Todas as seções de uma orquestra devem se misturar de maneira equilibrada;

3- Clareza: Deve haver superfícies de absorção suficientes para que o som reverberante não mascare os sons seguintes;

4- Reverberação ou vivacidade: O ouvinte deve se sentir banhado pelo som de todos os lados, mas ao mesmo tempo ser capaz de localizar a fonte sonora. Clareza e vivacidade podem ser parcialmente contraditórias;

5- Liberdade de ecos: O som refletido deve chegar cedo o suficiente para reforçar o som direto, mas não deve ser percebido como um eco separado;

6- Baixo nível de ruído de fundo: O ruído dos sistemas de aquecimento e ventilação e de fontes externas deve ser mantido muito baixo.

2.5.1 Tempo de Reverberação

O tempo de reverberação é um dos parâmetros acústicos mais importante na análise de um projeto de condicionamento acústico, segundo Henrique (2002).

A figura 12 mostra o tempo de reverberação $RT60$ e o $RT30/RT20$.

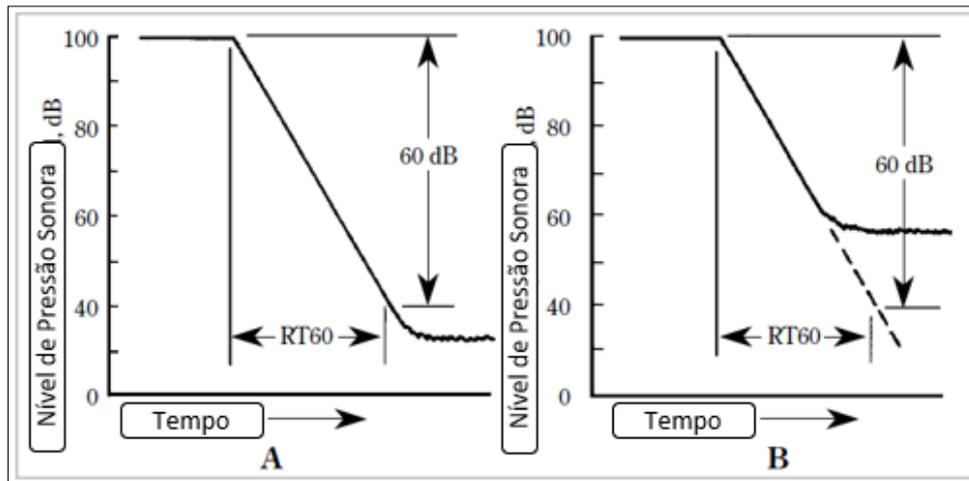


Figura 11 - Tempo de Reverberação: $RT60$ (A) $RT30/RT20$ (B).

Fonte: Adaptado de Everest (2001).

O tempo de reverberação ($RT60$), segundo Everest (2001), é definido como o tempo necessário para o som em uma sala diminuir 60 dB após interrompida a fonte sonora, como exemplificado na Figura 11-A. Porém, essa definição pode não ser adequada do ponto de vista prático, pois ela não leva em consideração os elevados níveis de ruído de fundo atuais, que inviabiliza a detecção do ponto de -60 dB. Dessa forma, a inclinação do limite de decaimento é extrapolada para determinar o tempo de reverberação devido ao ruído, sem a necessidade de elevar o nível de pressão sonora da fonte, dando origem aos parâmetros $RT30/RT20$ (como mostrado na figura Figura 11-B) que consideram um decaimento de 30 dB ou 20 dB após interrompida a fonte sonora.

A área de absorção total (A) e o volume da sala (V) influenciam diretamente para estimar o tempo de reverberação. Os métodos de Sabine e Eyring são as formas mais comuns utilizadas para estimá-lo (EVEREST, 2001).

A fórmula de Sabine é normalmente a mais indicada para salas com maior reverberação e com o coeficiente de absorção do material (α) menor do que 0,15.

$$RT_{SABINE} = 0,16 \cdot \frac{V}{\alpha \cdot A} \quad (3)$$

A fórmula de Eyring a seguir, baseia-se no modelo do campo difuso, demonstrando a forma mais adequada para salas com maior coeficiente de absorção total.

$$RT_{EYRING} = \frac{0,16 \cdot V}{-A \cdot \ln(1 - a)} \quad (4)$$

Segundo Roosing, Moore & Wheeler (2014), o Tempo de Reverberação ideal de uma sala depende majoritariamente da sua finalidade de uso e do volume. Em geral, os espaços destinados a fala requerem tempos de reverberação mais curtos do que para música, pois tempos de reverberação longos estão geralmente relacionados à falta de definição e clareza, prejudicando a inteligibilidade de fala, entretanto dão ambiência e preenchimento na música.

É impossível especificar tempos de reverberação precisamente ótimos. A Figura 113 demonstra algumas recomendações da ABNT para o tempo de reverberação ótimo de acordo com o objetivo acústico de cada local.

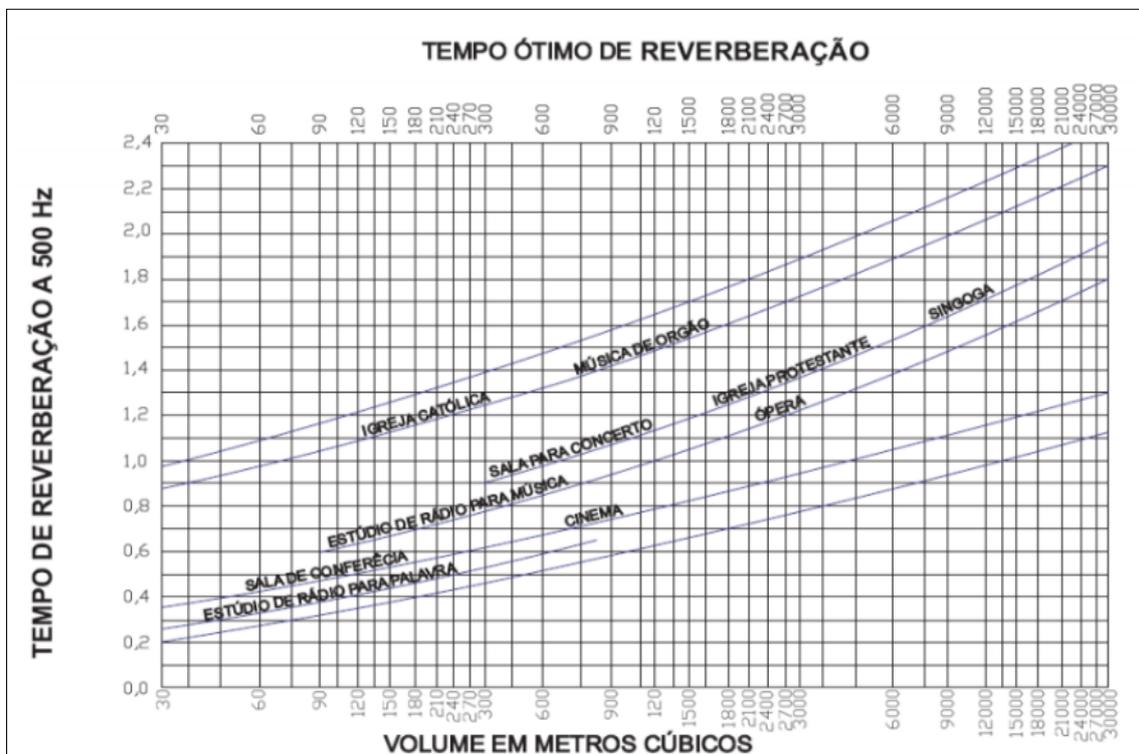


Figura 12- Tempo Ótimo de Reverberação de acordo com uso.

Fonte: ABNT (1992).

A figura 13 ilustra como tempo de reverberação ótimo a 500 Hz varia de acordo com o volume do recinto em metros cúbicos. As curvas demonstram a relação entre essas duas grandezas para cada objetivo do ambiente. Pode-se observar que o tempo de reverberação ótimo é diretamente proporcional ao volume do local, independentemente da finalidade acústica do ambiente.

Segundo o Donoso (2005), geralmente considera-se que um tempo de reverberação menor que 0,5 segundos é acusticamente favorável para ambientes destinados a fala. Neste caso, as reflexões não atrapalham o entendimento do ouvinte pois elas aumentam a intensidade do som que chega ao ouvido. Além disso, Everest (2001), complementa que o longo tempo de reverberação tende à falta de definição e clareza na música e perda de inteligibilidade na fala.

Dessa forma, Rossing, Moore & Wheeler (2014), complementa que o tempo de reverberação ideal é em geral, um meio-termo entre clareza (exigindo um curto tempo de reverberação), volume (exigindo um alto nível de reverberação) e vivacidade (exigindo um longo tempo de reverberação).

2.5.2 Tempo de Decaimento Inicial (*EDT*)

O Tempo de Decaimento Inicial, como explica Beranek (2004), corresponde ao tempo de decaimento nos primeiros 10dB após a interrupção da fonte sonora, multiplicada por 6. O fator 6 se justifica devido ao fato de ocorrer um decaimento de dez decibéis em um período aproximadamente equivalente a um sexto do tempo necessário para 60 decibéis de queda (tempo de reverberação). Dessa forma o fator 6 permite uma comparação direta entre *EDT* e o tempo de reverberação (ambos em segundos). Variações menores que 0,3 segundos são encontradas entre *EDT* e *RT60* (BRANDÃO, 2016). Essas variações tendem a se estabilizar a partir de certa distância.

O Tempo de Decaimento Inicial, segundo Kuttruff (2000) é fortemente influenciado pelas reflexões iniciais, dependendo visivelmente da posição de medição, além de ser sensível aos detalhes da geometria da sala. Além disso, Brandão (2016) analisa que *EDT* não varia tanto com a ocupação da sala.

Tal como acontece com as salas de concerto, Barron (2010) disse que o tempo de decaimento precoce (*EDT*) é considerado uma medida da sensação de reverberação.

De acordo com Rossing, Moore & Wheeler (2014), uma rápida queda inicial (*EDT*) é interpretada pelo ouvido como tempo de reverberação é curto. Sendo assim, o autor complementa que mesmo quando o tempo total de reverberação do ambiente estiver adequado, mas a inclinação inicial for muito íngreme (*EDT* baixo), o ambiente pode dar uma impressão de som seco ou falta de reverberação.

De forma complementar, Beranek (2004) afirma que alguns resultados em casas de ópera, apontam que *EDT* indica uma qualidade acústica melhor do que o tempo de reverberação.

2.5.3 Inteligibilidade

A inteligibilidade de fala está relacionada com o nível de compreensão do ouvinte de uma voz emitida por um interlocutor. De acordo com Bruel & Kjær (1988), a inteligibilidade é uma resposta subjetiva, e pode ser medida examinando-se o número de palavras sem sentido foneticamente anotadas corretamente por uma equipe de ouvintes treinados. Os resultados são expressos como índice em uma escala de 0 a 1, denominado *Articulation Index (AI)*. Índices menores que 0,3 geralmente sugerem uma fala com baixa inteligibilidade e índices acima de 0,7 indicam boa inteligibilidade. Como cada ouvinte possui uma percepção sonora, é comum uma grande variabilidade nos resultados.

Donoso (2005) complementa que o ouvido humano só consegue distinguir dois sons que chegam a ele com um intervalo de tempo superior a 0,1 s. Se em algum ponto de uma sala a diferença entre o som direto e o refletido for muito grande, o entendimento da fonte sonora pode ficar confuso.

Segundo Kuttruff (2000), qualquer reverberação afeta a inteligibilidade da fala porque confunde a estrutura do tempo e mistura as características espectrais de fonemas ou sílabas sucessivas. Sendo assim, o autor considera que as reflexões mais atrasadas são consideradas prejudiciais do ponto de vista da transmissão da fala.

O principal efeito da reverberação excessiva, segundo Everest (2001), é prejudicar a inteligibilidade da fala, mascarando as consoantes de nível inferior. Sendo assim, os espaços para fala requerem tempos de reverberação mais curtos do que para música, devido ao interesse do ambiente no som direto e não nas reflexões.

As típicas soluções para melhorar a clareza da fala, segundo Bruel & Kjær (1988), geralmente são reforços no nível da pressão sonora, redução do tempo de reverberação, prevenção de ecos e atenuação de ruído de fundo.

2.5.4 Definição (D50)

Esse parâmetro tenta quantificar numericamente a influência da acústica de salas na inteligibilidade da fala (capacidade do ouvinte distinguir cada sílaba).

Segundo Everest (2001), a definição *D50* é a relação entre energia inicial e total como uma porcentagem, usando a energia do som nos primeiros 50ms como a parte inicial.

O parâmetro *D50*, de acordo com Kuttruff (2000), foi a primeira tentativa de definir um critério objetivo sobre a nitidez do som derivada da resposta impulsiva. Em seu livro, o autor calcula a definição através da seguinte fórmula.

$$D = \frac{\int_0^{50 \text{ ms}} [g(t)]^2 dt}{\int_0^{\infty} [g(t)]^2 dt} 100\% \quad (5)$$

Através da fórmula, pode-se entender que *D50* irá atingir 100% quando a resposta impulsiva não tiver nenhuma reflexão com atrasos superiores a 50ms, ou seja, quando o som for transmitido em ambientes abertos.

A figura 14 abaixo, elucida a relação entre a inteligibilidade de fala e a definição.

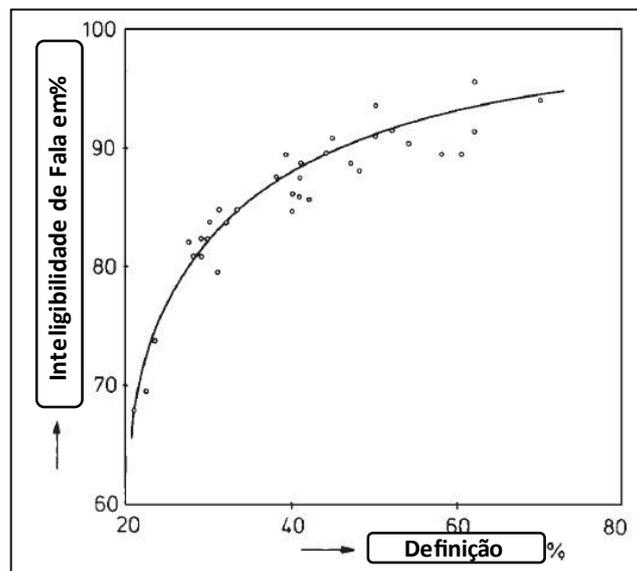


Figura 13 - Relação entre inteligibilidade e definição
Fonte: Adaptado de Kuttruff (2000).

Através da figura 14, nota-se que *D50* é diretamente proporcional à inteligibilidade de fala. Valores a partir de 50% para *D50*, atingem uma inteligibilidade de fala superior a 90%, ou seja, um bom entendimento da voz falada.

2.5.5 Clareza (C50/C80)

Os parâmetros de clareza, são a razão da energia da resposta impulsiva que chega aos ouvidos nos primeiros 50 milissegundos (*C50*) ou 80 milissegundos (*C80*), de acordo com Everest (2001). Basicamente, é a capacidade que se consegue distinguir os sons que estão sendo emitidos e é expresso em segundos.

A clareza, segundo Kuttruff (2000), é semelhante ao parâmetro da definição. Entretanto, se difere, pois, caracteriza a transparência do som em uma sala de concerto. O autor, define o índice de clareza *C80* a partir da seguinte equação.

$$C = 10 \log_{10} \left\{ \frac{\int_0^{80 \text{ ms}} [g(t)]^2 dt}{\int_{80 \text{ ms}}^{\infty} [g(t)]^2 dt} \right\} \text{ dB} \quad (6)$$

O limite do tempo de atraso para cálculo do *C80* é de 80 ms. Esse valor é superior ao da definição, segundo Kuttruff (2000), pois ele está mais relacionado à música, onde as reflexões são menos perceptíveis em relação aos sinais da voz. Assim sendo, para avaliar a clareza da voz humana, o limite do tempo de atraso é de 50ms, calculando assim o *C50*.

De acordo com Roosing, Moore & Wheeler (2014), para haver uma boa clareza deve haver superfícies de absorção suficientes para que o som reverberante não mascare os sons seguintes.

Para mais, Kuttruff (2000) diz que de acordo com investigações recentes sobre salas de concerto na Europa e nos EUA, a faixa típica para *C80* é de cerca de -5 a + 3dB. Onde -3dB é um nível tolerável, e 0dB indica uma clareza subjetiva suficiente mesmo para rápidas passagens musicais. Enquanto Brandão (2016) alerta que valores positivos de *C80* indicam uma sala com percepção de pouca reverberação, estando os valores preferidos entre -4dB e 0 dB.

Além disso, Brandão (2016) explica que o uso de assentos não acolchoados pode estar ligado ao aumento de *C80* devido ao aumento da quantidade de energia na cauda reverberante.

2.5.6 Ruído de Fundo

O ruído de fundo é caracterizado como o som ambiente do recinto, gerado por fontes sonoras que são indesejáveis em relação ao objetivo do som na sala.

De acordo com Roosing, Moore & Wheeler (2014), o ruído de fundo pode ser de origem interna (por exemplo, sistemas de ventilação) ou externa (por exemplo, o tráfego de automóveis). Até mesmo vibrações de baixa frequência de máquinas podem ser transmitidas pela estrutura do edifício para um auditório. Ruídos podem também ser originados de portas barulhentas, isolamento inadequado da sala e assim por diante.

Em ambientes comuns, não é possível anular o ruído de fundo completamente, sendo assim, segundo Everest (2001), a decisão mais importante relacionada ao ruído de fundo é a seleção de uma meta de nível de ruído.

De forma complementar Roosing, Moore & Wheeler (2014), explica que o ruído de fundo não é um problema tão frequentemente encontrado em grandes salas de concerto, pois essas edificações tiveram uma consulta prévia de um projetista acústico qualificado. Entretanto o excesso de ruído de fundo é muito comum em igrejas, auditórios de escolas e salas de concerto menores onde um projetista acústico qualificado não é comumente consultado.

As soluções possíveis para reduzir o ruído de fundo segundo Roosing, Moore & Wheeler (2014), podem ser colocar o auditório no centro de um complexo de edifícios, construir paredes pesadas e garantir que nenhuma janela fique de frente para a rua.

2.7 Características das Casas da Ópera

As casas de ópera, segundo Brandão (2016), misturam características acústicas de teatros e de salas de concerto. Elas devem atender aos atributos tanto musicais quanto de fala, portanto o ambiente deve possuir boa inteligibilidade de fala e boa clareza musical. Os palcos geralmente são profundos, com reservas de espaço tanto na vertical quanto na horizontal. O volume das casas de ópera geralmente é menor que as salas de concerto, reduzindo assim o tempo de reverberação ($RT60$), que geralmente encontra-se entre 1,2 e 1,5 segundos.

Em acréscimo, Beranek (2004) afirmou que a reverberação é menos importante em casas de ópera do que em salas de concertos devido ao foco dos ouvintes não só na música, mas também na inteligibilidade da voz.

A figura 15 ilustra as plantas baixas comuns encontradas em auditórios.

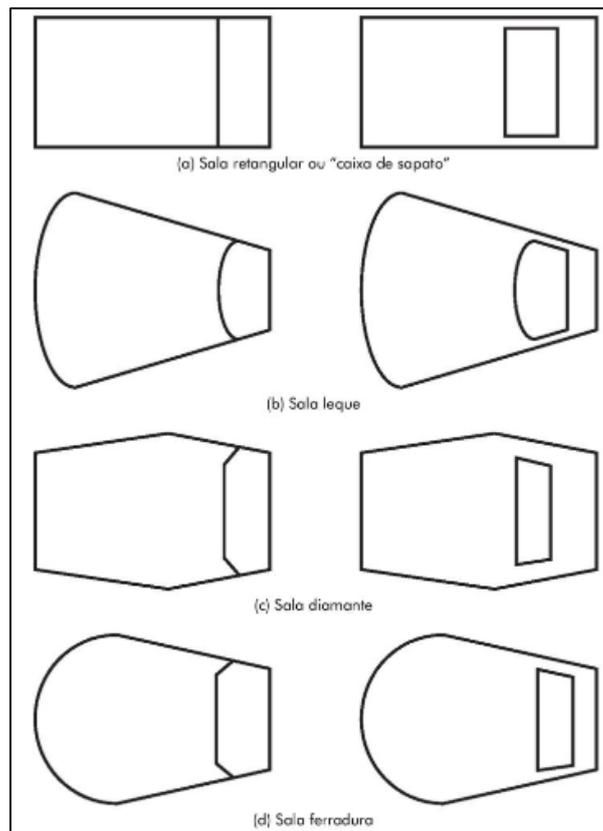


Figura 14 – Tipos de planta baixa comuns encontrados em auditórios
Fonte: Brandão (2016).

A figura 15 mostra 4 tipos de plantas baixas, sendo o formato ferradura a forma mais tradicional encontrada em salas de ópera. De acordo com Brandão (2016), este formato permite abrigar muitos espectadores num espaço relativamente menor, ainda que a visão não se torne muito eficiente em todos os pontos. Além disso, a forma de ferradura, permite que as paredes traseiras e laterais reflitam os sons laterais diretos e iniciais nas cabeças dos ouvintes.

2.8 Software Room EQ Wizard (REW)

De acordo com Mucaly (2021), o *REW* é um software gratuito para a realização de medições acústicas. Ele mede as respostas da sala perante o comportamento do som no ambiente, e seus recursos para medição e análise de áudio ajudam a entender o comportamento acústico do local, fornecendo assim, informações relevantes para execução de ajustes acústicos nos mais diversos tipos de ambientes.

Para fazer uma medição através do *software*, segundo Mucaly (2021), são necessários basicamente de uma fonte sonora e um microfone. Basicamente, as medições partem de um sinal de varredura logarítmica (que leva o mesmo tempo para ir de 40 a 80Hz ou 4kHz a 8kHz), que é enviado até a fonte (alto-falante ou *subwoofer*), emitindo ruídos que começam pelas frequências mais baixas e aumentando continuamente para frequências mais altas. Dessa forma o microfone capta o som que viaja diretamente da fonte e todo o som que é refletido nas superfícies da sala.

3. METODOLOGIA

Nesta seção é apresentado os meios para obter os objetivos da pesquisa. O conteúdo deste capítulo contém o tipo de pesquisa, os materiais e métodos utilizados, variáveis e indicadores, instrumentos de coleta de dados, tabulação dos dados e as considerações finais.

3.1 Tipo de Pesquisa

O ambiente acadêmico, de acordo com Pereira *et. al.* (2018), busca por respostas para problemas e entender diversos fenômenos que acontecem, por isso a realização de pesquisas é importante, por contribuírem para o desenvolvimento das inúmeras áreas do saber.

Segundo Prodanov & Freitas (2013), a pesquisa quantitativa considera que tudo pode ser quantificável, o que significa traduzir em números opiniões e informações para classificá-las e analisá-las. Tal como Pereira *et. al.* (2018) explica, nos métodos quantitativos faz-se a coleta de dados numéricos por meio do uso de medições de grandezas e obtém-se por meio da metrologia. Estes métodos geram conjuntos ou massas de dados que podem ser analisados por meio de técnicas matemáticas como é o caso das porcentagens, estatísticas e probabilidades, métodos numéricos, métodos analíticos e geração de equações e/ou fórmulas matemáticas aplicáveis a algum processo.

Os métodos qualitativos, para Pereira *et. al.* (2018) são aqueles nos quais é importante a interpretação por parte do pesquisador com suas opiniões sobre o fenômeno em estudo. Complementando, Prodanov & Freitas (2013) considera que há uma relação dinâmica entre o mundo real e o sujeito, isto é, um vínculo indissociável entre o mundo objetivo e a subjetividade do sujeito que não pode ser traduzido em números. A interpretação dos fenômenos e a atribuição de significados são básicas no processo de pesquisa qualitativa.

De acordo com Prodanov & Freitas (2013), a pesquisa exploratória tem como finalidade proporcionar mais informações sobre o assunto investigado e possui planejamento flexível, permitindo assim um estudo do tema sob diversos ângulos e aspectos. Envolvendo assim, segundo Selltitz *et. al.* (1967), as seguintes considerações:

- levantamento bibliográfico;
- entrevistas com pessoas que tiveram experiências práticas com o problema pesquisado;
- análise de exemplos que estimulem a compreensão.

Para um estudo de caso, segundo Severino (2014), o caso escolhido para a pesquisa deve ser significativo e bem representativo, para que consiga fundamentar uma generalização para situações análogas.

Assim como explica Gil (2008), o método experimental consiste essencialmente em submeter os objetos de estudo à influência de certas variáveis, em condições controladas e conhecidas pelo investigador, para observar os resultados que a variável produz no objeto. De forma complementar, Gil (2002) diz que esse tipo de pesquisa constitui o mais precioso procedimento para testar hipóteses, pois os cientistas conseguem estabelecer relações de causa e efeito com as variáveis.

A pesquisa bibliográfica, segundo Gil (2002), é desenvolvida com base em algum conteúdo já existente, predominantemente de livros e artigos científicos em geral. De acordo com Prodanov & Freitas (2013) tal tipo de pesquisa, exige que o pesquisador esteja atento as possíveis inconsistências que as literaturas possam apresentar, garantindo assim a veracidade das informações.

Sendo assim, quanto aos objetivos, pesquisa pode ser classificada como exploratória. Justifica-se a seleção desta metodologia de pesquisa devido ao levantamento e análise de parâmetros acústicos no teatro, contribuindo assim para o estudo da acústica de ambientes destinados à música e teatro.

Em relação aos procedimentos técnicos, a pesquisa classifica-se como bibliográfica, experimental e estudo de caso. No que concerne a esse trabalho, é feita uma pesquisa bibliográfica visando a fundamentação teórica necessária ao desenvolvimento do projeto, com o intuito de realizar o estudo de caso. A pesquisa experimental é utilizada quando se definiu um objeto de estudo, a acústica do teatro, e selecionou-se as variáveis capazes de o influenciar, que são os parâmetros acústicos coletados pelo *software REW*.

A classificação da pesquisa na forma de abordagem foi quali-quantitativa, referente ao tratamento dos dados. Nos aspectos qualitativos, emprega-se o entendimento e interpretação dos dados e os aspectos quantitativos, os experimentos que conduzem as interpretações analíticas.

3.2 Materiais e Métodos

O local utilizado para estudo foi o Teatro Municipal de Ouro Preto. Os materiais utilizados para as medições foram:

- Monitor de Referência KRK Rokit G4 de 5'' com potência de 55W (Fonte sonora direcional);
- Microfone omnidirecional para medição Behringer ECM8000;
- Tripé para apoio do Microfone;
- Interface de áudio *Steinberg UR22mkII*;
- *Notebook Dell Inspiron 3442*;
- 1 Cabo *MIDI/USB*;
- 2 cabos XLR de 10 metros de comprimento;
- 1 cabo P10/P10;
- 1 cabo P10/XLR;
- Mesa de madeira para apoio do monitor de referência.

Com a finalidade de avaliar os parâmetros acústicos que foram coletados no Teatro Municipal de Ouro Preto por meio do *software REW*, será realizado, primeiramente, um estudo bibliográfico.

Inicialmente é realizada a revisão bibliográfica acerca da pesquisa, abrangendo o estudo sobre análises acústicas, propagação do som e das ondas, comprimento de onda e velocidade do som, características do som, comportamento do som em ambientes fechados, qualificação da acústica de salas, características das casas de Ópera, *software REW*.

Sequencialmente, é realizado o levantamento dos dados experimentais obtidos através de medições *in loco*. O processamento dos dados é realizado através do *software REW*, que realiza cálculos internos para obtenção dos parâmetros acústicos selecionados previamente.

Em seguida, o modelamento é feito através do *Microsoft Excel*, onde os dados coletados foram organizados de forma que fosse possível realizar visualizações gráficas e facilitar a análise dos parâmetros acústicos em cada um dos pontos medidos, com o intuito de concluir sobre a qualidade acústica do local.

3.2.1 Descrição da metodologia das medições

Foram selecionados 11 pontos para realização das medições no teatro, no intuito de abranger uma análise dos parâmetros acústicos em todos os andares. O microfone foi posicionado na mesma altura dos ouvidos de uma pessoa de estatura comum sentada (1,20 metros). Em todas as medições, o microfone foi direcionado para a posição da fonte sonora, que se encontra localizada no centro do palco.

Em cada um dos pontos foram realizadas 3 medições. Assim, por meio das 33 medições totais, foram obtidos os parâmetros previamente selecionados, são eles: o tempo de reverberação (*RT60*), as clarezas (*C50* e *C80*), a definição (*D50*) e o tempo de decaimento inicial (*EDT*). Dessa forma foi gerada uma elevada quantidade de dados que foram organizados e tratados no *software Microsoft Excel*.

A figura 15 mostra a vista do palco com os respectivos 11 pontos de medição selecionados.

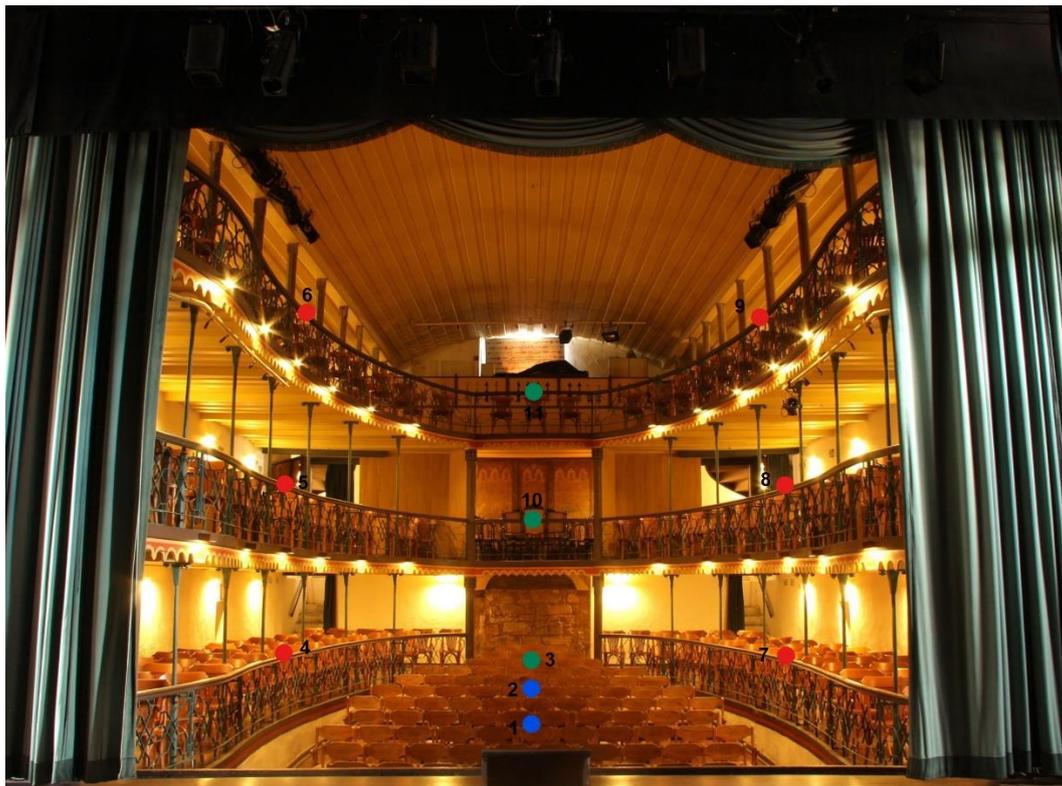


Figura 15 – Vista do palco com a marcação do local das medições.
Fonte: Bracher (2017).

Cada um dos pontos marcados na figura 15 indicam uma medição. Os pontos em vermelho são os pontos laterais dos espectadores em relação a emissão da fonte sonora, em cada um dos andares, totalizando 6 pontos. Enquanto, os 2 pontos em azul representam maior proximidade com a

fonte sonora e alinhados ao centro do palco. E por fim, os 3 pontos verdes são os pontos, em cada andar, mais distantes da fonte sonora, também se encontram alinhados ao centro do palco.

3.3 Variáveis e Indicadores

As variáveis podem ser consideradas uma medida ou classificação, uma quantidade variável, um conceito operacional com valores, propriedades, aspecto ou fator, identificado em um objeto de estudo e passível de verificação. Também podem ser entendidas como qualquer meio que pode ser classificado em duas ou mais categorias. (GIL, 2002).

Os indicadores da variável são a definição operacional dos elementos que possibilitarão identificá-lo de maneira prática. Caso seja muito complexo, será necessário determinar suas dimensões, através de medidas (GIL, 2002).

Através do estudo das variáveis e de sua medição, são selecionados os indicadores de acordo com os objetivos da pesquisa. Na tabela 2, são mostrados as variáveis e os indicadores do trabalho.

As variáveis e os indicadores deste trabalho são dispostos na tabela 2.

Tabela 2 – Variáveis e Indicadores

Variáveis	Indicadores
Tempo de Reverberação (<i>RT60</i>)	Volume do recinto
	Geometria do recinto
	Coefficiente de absorção das superfícies
	Distância entre a captação e a fonte sonora
Clareza (<i>C50</i> e <i>C80</i>)	Volume do recinto
	Geometria do recinto
	Coefficiente de absorção das superfícies
	Distância entre a captação e a fonte sonora
Definição (<i>D50</i>)	Volume do recinto
	Geometria do recinto
	Coefficiente de absorção das superfícies
	Distância entre a captação e a fonte sonora
Tempo de Decaimento Inicial (<i>EDT</i>)	Volume do recinto
	Geometria do recinto
	Coefficiente de absorção das superfícies
	Distância entre a captação e a fonte sonora

Fonte: Pesquisa direta (2021).

3.4 Instrumentos de Coleta de Dados

Nessa etapa é realizada a coleta de dados com a finalidade de obter o embasamento teórico fundamental da pesquisa por meio de revisões bibliográficas, análises e experimentos.

Como citado nesse capítulo, esse projeto é de caráter bibliográfico, exploratório, experimental, quali-quantitativo e estudo de caso. A realização de uma observação direta com a intenção de analisar dados coletados experimentalmente, visa acumular informações úteis para comparar os dados coletados e os dados disponíveis na literatura.

As medições por meio de equipamentos de médio-custo foram realizadas no software gratuito *REW EQ WIZARD* instalado no *notebook Dell Inspiron 3442 Intel Core i5* conectado à interface de áudio *Steinberg UR22mkII* através de um cabo *MIDI*. Em uma das entradas da interface, foi conectado o microfone de medição *Behringer ECM8000* por meio da junção de dois cabos XLR. Na saída *R*, foi conectado o monitor de referência *KRK Rokit G4 5"* através de um cabo *P10/XLR*. Foi feito um *looping* através de um cabo *P10/P10*, ligando a segunda entrada da placa à saída *L* da mesma. A figura 16 mostra o setup para medição.

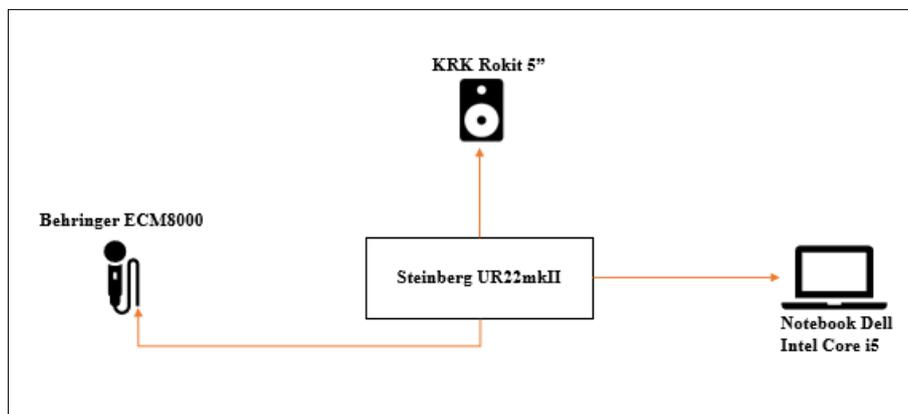


Figura 16 – Setup de Medição
Fonte: Pesquisa direta (2021).

O princípio da coleta de dados se dá por meio de um monitor de referência, que emite ruídos, gerados a partir do *software REW*, para que o microfone possa captar a resposta acústica da sala. Dessa forma, os resultados são processados pelo próprio *software REW* no *notebook*.

3.5 Tabulação dos Dados

Os dados obtidos experimentalmente por meio dos instrumentos previamente explicados, foram processados pelo próprio *software REW*, que gera um relatório de dados acordo com as medições. Em seguida, esses dados foram então tratados e analisados pelo *Microsoft Excel*.

Para compilar melhor os dados e reduzir possíveis erros nas informações coletadas, foram realizadas médias entre os dados obtidos nas 3 medições de cada ponto. Sendo assim, todas as análises feitas nesse trabalho são oriundas de médias de 3 valores de cada um dos parâmetros coletados experimentalmente em cada ponto de medição. Por fim, a discussão e relato dos resultados será realizada no *Microsoft Word*.

3.6 Considerações Finais do capítulo

Neste capítulo foi apresentada a metodologia para fundamento do tema proposto. Foram apresentadas os equipamentos e *softwares* escolhidos para coleta e análise dos dados para questão problema. O capítulo seguinte aborda o estudo de caso, onde são evidenciados os resultados obtidos pelas medições.

4- RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo é apresentado o desenvolvimento da pesquisa feita, com o objetivo de conferir e analisar os parâmetros obtidos pelo *software REW EQ*, verificando a importância e relevância do projeto.

Todos os parâmetros aqui analisados se baseiam em nossa compreensão dos diferentes efeitos percebidos dos sons da fala que chegam cedo e que chegam mais tarde nos quartos. Eles também são geralmente altamente correlacionados entre si. *C80* tem sido usado para se relacionar com a percepção de “clareza” de sons musicais, enquanto semelhante a *D50*, a relação entre som inicial e tardio. *C50*, tem sido usada para se relacionar com a inteligibilidade de fala em salas (BISTAFA, 2005).

4.1 Apresentação dos dados tratados no *Microsoft Excel*

As medições foram realizadas no dia 28 de outubro de 2021 entre às 20:30 e 21:30 da noite. Conforme explicado no capítulo 3, os dados foram coletados pelo *software REW* e em seguida foram tratados no *Microsoft Excel*. A Tabelas 3 apresenta os dados organizados e tratados no *software Microsoft Excel*.

Tabela 3 – Dados tratados e organizados no *software Microsoft Excel*.

Local	Posição	Ponto	Parâmetro	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Plateia (Piso)	Frente	Ponto 1	EDT (s)	1,271	1,057	1,251	0,932	1,165	1,292
Plateia (Piso)	Frente	Ponto 1	Topt (s)	1,120	1,369	1,236	1,439	1,470	1,344
Plateia (Piso)	Frente	Ponto 1	C50 (dB)	-1,310	2,773	2,533	2,580	1,863	1,353
Plateia (Piso)	Frente	Ponto 1	C80 (dB)	0,733	4,293	3,167	3,847	3,460	3,297
Plateia (Piso)	Frente	Ponto 1	D50 (%)	42,50	65,43	64,20	64,43	60,57	57,70
Plateia (Piso)	Centro	Ponto 2	EDT (s)	0,973	1,026	0,895	0,935	1,129	1,303
Plateia (Piso)	Centro	Ponto 2	Topt (s)	1,129	1,342	1,229	1,450	1,434	1,221
Plateia (Piso)	Centro	Ponto 2	C50 (dB)	-3,150	0,437	2,710	4,080	-0,607	0,500
Plateia (Piso)	Centro	Ponto 2	C80 (dB)	2,020	3,507	6,430	5,377	3,087	2,867
Plateia (Piso)	Centro	Ponto 2	D50 (%)	32,63	52,53	65,10	71,93	46,50	52,87
Plateia (Piso)	Fundo	Ponto 3	EDT (s)	1,214	0,970	0,795	1,131	1,302	1,203
Plateia (Piso)	Fundo	Ponto 3	Topt (s)	0,866	1,433	1,242	1,234	1,403	1,281
Plateia (Piso)	Fundo	Ponto 3	C50 (dB)	-5,540	-4,860	5,190	-0,363	0,540	-0,717
Plateia (Piso)	Fundo	Ponto 3	C80 (dB)	-3,987	-0,770	6,480	3,197	3,123	1,743
Plateia (Piso)	Fundo	Ponto 3	D50 (%)	21,83	24,63	76,77	47,90	53,10	45,87
Frisa (1º Andar)	Lateral Esquerda	Ponto 4	EDT (s)	1,462	1,177	1,434	1,279	1,561	1,094
Frisa (1º Andar)	Lateral Esquerda	Ponto 4	Topt (s)	1,194	1,476	1,380	1,257	1,452	1,324
Frisa (1º Andar)	Lateral Esquerda	Ponto 4	C50 (dB)	-4,617	2,070	-0,530	0,100	0,243	1,413
Frisa (1º Andar)	Lateral Esquerda	Ponto 4	C80 (dB)	-2,540	3,500	2,037	2,393	1,633	3,953
Frisa (1º Andar)	Lateral Esquerda	Ponto 4	D50 (%)	25,67	61,70	46,97	50,57	51,40	58,07
Camarote (2º Andar)	Lateral Esquerda	Ponto 5	EDT (s)	1,374	2,426	1,348	1,360	1,321	1,281
Camarote (2º Andar)	Lateral Esquerda	Ponto 5	Topt (s)	1,046	1,307	1,384	1,448	1,412	1,309
Camarote (2º Andar)	Lateral Esquerda	Ponto 5	C50 (dB)	1,560	-0,007	-0,180	-1,913	1,297	1,020
Camarote (2º Andar)	Lateral Esquerda	Ponto 5	C80 (dB)	3,113	1,823	2,007	1,257	3,213	2,997
Camarote (2º Andar)	Lateral Esquerda	Ponto 5	D50 (%)	58,90	49,93	48,97	39,13	57,40	55,87
Galeria (3º Andar)	Lateral Esquerda	Ponto 6	EDT (s)	1,608	1,539	1,477	1,583	1,522	1,473
Galeria (3º Andar)	Lateral Esquerda	Ponto 6	Topt (s)	1,063	1,389	1,363	1,351	1,492	1,300
Galeria (3º Andar)	Lateral Esquerda	Ponto 6	C50 (dB)	-4,860	-3,480	-3,400	0,530	-0,503	-0,200
Galeria (3º Andar)	Lateral Esquerda	Ponto 6	C80 (dB)	-3,637	-2,480	0,470	1,680	1,207	1,860
Galeria (3º Andar)	Lateral Esquerda	Ponto 6	D50 (%)	24,63	30,97	31,37	53,03	47,10	48,83
Frisa (1º Andar)	Lateral Direita	Ponto 7	EDT (s)	1,386	1,414	1,266	1,562	1,358	1,178
Frisa (1º Andar)	Lateral Direita	Ponto 7	Topt (s)	1,188	1,412	1,295	1,344	1,439	1,288
Frisa (1º Andar)	Lateral Direita	Ponto 7	C50 (dB)	2,043	-0,610	-1,557	1,550	1,540	0,950
Frisa (1º Andar)	Lateral Direita	Ponto 7	C80 (dB)	3,707	0,683	-0,030	3,450	3,117	3,480
Frisa (1º Andar)	Lateral Direita	Ponto 7	D50 (%)	61,57	46,50	41,13	58,83	58,77	55,47
Camarote (2º Andar)	Lateral Direita	Ponto 8	EDT (s)	1,215	1,348	1,229	1,124	1,350	1,121
Camarote (2º Andar)	Lateral Direita	Ponto 8	Topt (s)	0,920	1,310	1,398	1,549	1,362	1,320
Camarote (2º Andar)	Lateral Direita	Ponto 8	C50 (dB)	-0,820	-2,100	2,953	-0,143	0,633	0,140
Camarote (2º Andar)	Lateral Direita	Ponto 8	C80 (dB)	2,660	-0,210	3,817	4,950	3,363	2,677
Camarote (2º Andar)	Lateral Direita	Ponto 8	D50 (%)	45,30	38,17	66,37	49,20	53,63	50,83
Galeria (3º Andar)	Lateral Direita	Ponto 9	EDT (s)	1,998	1,629	1,360	1,518	1,562	1,298
Galeria (3º Andar)	Lateral Direita	Ponto 9	Topt (s)	0,875	1,498	1,351	1,454	1,450	1,336
Galeria (3º Andar)	Lateral Direita	Ponto 9	C50 (dB)	-3,427	0,963	-0,570	-0,287	0,313	-0,080
Galeria (3º Andar)	Lateral Direita	Ponto 9	C80 (dB)	-1,840	3,703	2,473	1,770	2,203	2,317
Galeria (3º Andar)	Lateral Direita	Ponto 9	D50 (%)	31,23	55,53	46,73	48,37	51,80	49,57
Camarote (2º Andar)	Fundo	Ponto 10	EDT (s)	1,173	0,637	0,875	0,887	0,902	1,117
Camarote (2º Andar)	Fundo	Ponto 10	Topt (s)	1,254	1,309	1,313	1,338	1,376	1,317
Camarote (2º Andar)	Fundo	Ponto 10	C50 (dB)	-2,233	4,197	2,697	3,233	3,833	1,493
Camarote (2º Andar)	Fundo	Ponto 10	C80 (dB)	1,170	8,717	5,723	5,283	6,270	4,160
Camarote (2º Andar)	Fundo	Ponto 10	D50 (%)	37,50	72,20	65,00	67,77	70,60	58,47
Galeria (3º Andar)	Fundo	Ponto 11	EDT (s)	1,176	0,865	1,039	1,294	1,188	1,152
Galeria (3º Andar)	Fundo	Ponto 11	Topt (s)	0,972	1,283	1,394	1,415	1,488	1,339
Galeria (3º Andar)	Fundo	Ponto 11	C50 (dB)	-2,013	3,820	0,780	-2,070	1,010	1,363
Galeria (3º Andar)	Fundo	Ponto 11	C80 (dB)	3,050	5,293	3,683	1,243	3,333	4,027
Galeria (3º Andar)	Fundo	Ponto 11	D50 (%)	38,60	70,67	54,50	38,30	55,80	57,80

Fonte: Pesquisa direta, 2021.

A tabela 3 foi organizada de forma que fosse possível deixar em cada linha os valores obtidos em cada ponto vinculados a cada parâmetro, separados pelas frequências de 125Hz, 250Hz, 500Hz, 1000Hz, 2000Hz e 4000Hz. Na coluna intitulada parâmetro, encontra-se, entre parênteses, a grandeza dos valores apresentados em cada uma das linhas.

Para melhor entendimento dos dados obtidos, Mucaly (2021) oferece as seguintes definições:

- *EDT: Early Decay Time*, baseado na inclinação da curva de *Schroeder* entre 0 dB e -10 dB. Esta não é uma figura RT60, mas sim uma indicação de quão rapidamente o som inicial na posição de medição decai - é muito mais dependente da localização do que RT60. Um declínio precoce rápido (figura de EDT baixo) indica melhor clareza do que em posições onde o EDT é mais alto;

- *T20*: O tempo de decaimento do RT60 com base na inclinação da curva de *Schroeder* entre -5 dB e -25 dB;

- *T30*: O tempo de decaimento RT60 com base na inclinação da curva de *Schroeder* entre -5 dB e -35 dB;

- *Topt*: Um tempo de decaimento RT60 ideal com base na inclinação da curva de *Schroeder* em uma faixa variável escolhida para produzir o melhor ajuste linear. Se o tempo de decaimento inicial for muito menor do que T30, a medida de *Topt* usa um ponto inicial com base na interseção das linhas de regressão EDT e T30, caso contrário, usa -5 dB. *REW* testa cada ponto final em etapas de 1dB até o final da curva de *Schroeder* e escolhe aquele que oferece o melhor ajuste linear;

- Clareza *C50*: A relação de energia inicial para tardia em dB, usando a energia do som nos primeiros 50 ms como a parte inicial. C50 é mais frequentemente usado como um indicador de clareza de fala;

- Clareza *C80*: A relação de energia inicial para tardia em dB, usando a energia do som nos primeiros 80 ms como a parte inicial. C80 é mais frequentemente usado como um indicador de clareza musical;

- Definição *D50*: A relação entre energia inicial e total como uma porcentagem, usando a energia do som nos primeiros 50 ms como a parte inicial;

4.1 Informações do local estudado

O local estudado era anteriormente chamado de Casa da Ópera de Vila Rica, hoje é intitulado como Teatro Municipal de Ouro Preto. Segundo Centro Técnico de Artes Cênicas - CTAC (1997), a construção do teatro é datada em 1770 e foi construída pelo coronel João de Souza Lisboa, dentro da tradição luso-brasileira. A figura 17 mostra a fachada do teatro estudado.



Figura 17 - Fachada da Casa da Ópera de Vila Rica.
Fonte: CTAC (1997).

Segundo o Centro Técnico de Artes Cênicas - CTAC (1997), o teatro possui uma fachada singela, com inspirações arquitetônicas neoclássicas, barrocas e alguns elementos medievais. O local já passou por diversas reformas ao longo dos anos, não possuindo todos os elementos estruturais da época de sua construção.

A figura 18 mostra a sua localização na cidade de Ouro Preto - MG.

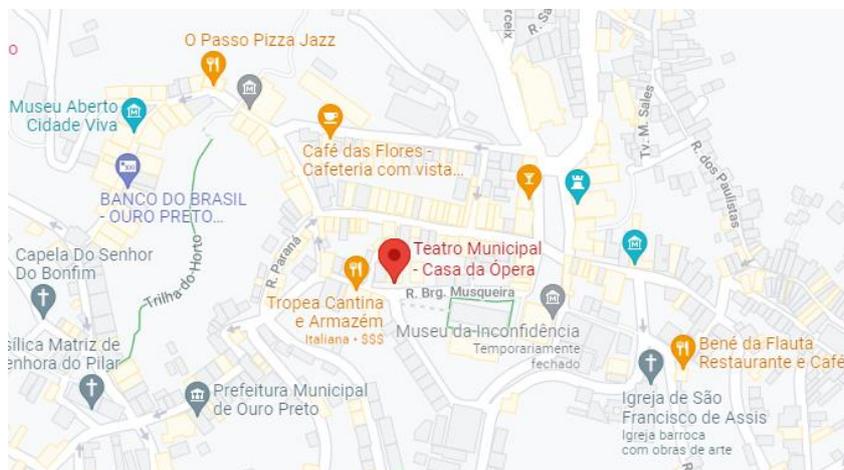


Figura 18– Localização do Teatro Municipal de Ouro Preto.
Fonte: Pesquisa direta (2021).

O endereço se encontra na Rua Brigadeiro Musqueira, s/n, em Ouro Preto, no estado de Minas Gerais.

A figura 19 mostra a vista interna do Teatro.



Figura 19 – Vista interna do Teatro Municipal de Ouro Preto.
Fonte: Pesquisa direta (2021).

Os materiais presentes no recinto, junto com a geometria do local são de extrema importância para a análise da qualidade acústica do local. A partir da figura 19 é possível notar os pisos e assentos de madeira. Por ser uma construção do século XVIII, as paredes do local foram construídas por meio de pedras características da época. No acabamento, as paredes foram revestidas com argamassa.

O local possui capacidade para 280 pessoas se sentarem segundo a Casa da Ópera (2021). A organização das cadeiras é dividida da seguinte forma:

- 1º Andar – Plateia principal – 92 cadeiras de madeira fixas;
- 1º Andar – frisas – 84 cadeiras de madeira móveis;
- 2º Andar – Camarotes – 58 cadeiras de madeira móveis;
- 2º Andar – Camarote imperial – 08 cadeiras de madeira móveis (utilizado apenas em situações especiais);
- 3º Andar – Galerias – 58 cadeiras de madeiras móveis.

As dimensões básicas do teatro foram coletadas no próprio local no dia da medição. Os valores obtidos foram colocados na tabela 4 abaixo.

Tabela 4 - Dimensões do teatro.

Local	Dimensões	Metros	Volume Total do ambiente [m ³]
Frisas (1° Andar)	Largura	10,55	2357,28
Frisas (1° Andar)	Comprimento	14,45	
Frisas (1° Andar)	Altura	9,75	
Palco	Largura	11,2	
Palco	Comprimento	9,6	
Palco	Altura	8,1	

Fonte: Pesquisa direta (2021)

Nota-se que foram realizadas medições em dois locais diferentes do teatro. Sendo o volume a multiplicação entre largura, comprimento e altura, as medidas no nível do frisas representam o volume destinado ao público. Enquanto as medidas do palco representam o volume destinado para as apresentações. De maneira geral, a soma desses dois volumes mostra o volume total em que o som se propaga no teatro, que é de aproximadamente 2.357,28 m³.

Através da obtenção do volume total do recinto, é possível analisar o tempo de reverberação ótimo para esse volume de acordo com o objetivo acústico do ambiente.

4.2 Médias gerais dos parâmetros selecionados

A tabela 5 apresenta os valores das médias dos parâmetros analisados nesse trabalho.

Tabela 5 – Médias gerais dos parâmetros selecionados

Frequência	<i>Topt</i> (s)	<i>EDT</i> (s)	<i>C50</i> (dB)	<i>C80</i> (dB)	<i>D50</i> (%)
125 Hz	1,057	1,350	-2,215	0,405	38,215
250 Hz	1,375	1,281	0,291	2,551	51,661
500 Hz	1,326	1,179	0,966	3,296	55,191
1000 Hz	1,389	1,237	0,663	3,132	53,588
2000 Hz	1,434	1,305	0,924	3,092	55,152
4000 Hz	1,307	1,228	0,658	3,034	53,758

Fonte: Pesquisa direta (2021).

Conforme é visualizado na tabela 5, a maioria dos valores se apresentam próximos ao da literatura analisada nesse trabalho para uma boa qualidade acústica de ambientes. A faixa de

frequência de 125Hz foi a que apresentou maiores divergências em comparação as outras faixas de frequência. Como os objetivos principais da acústica do teatro em questão se dividem para atender aos requisitos musicais e de peças de teatro, é observado um equilíbrio entre os parâmetros coletados que atendem a esses dois requisitos.

Vale ressaltar que os valores foram obtidos a partir de medições no teatro vazio, sem a presença de espectadores. A resposta acústica da sala está diretamente ligada a quantidade de pessoas em seu interior, isso se explica devido ao aumento das superfícies de absorção no local, que conseqüentemente altera a percepção sonora dos ouvintes e os parâmetros acústicos.

4.3 Resultado dos parâmetros acústicos

A seguir serão apresentadas as análises feitas no *Microsoft Excel* para cada parâmetro acústico. A análise partirá dos resultados experimentais em comparação com a bibliografia estudada nesse trabalho. Sendo assim pode-se avaliar e verificar individualmente se cada parâmetro atende aos requisitos de uma boa experiência acústica no recinto.

Nos tópicos seguintes também será apresentado os desvios padrões calculados para as respectivas médias. Por meio do desvio padrão, segundo Pinheiro *et. al.* (2015), é possível quantificar o grau de dispersão de uma variável aleatória em torno da sua média.

4.3.1 *Topt*

Para análise do tempo de reverberação (*RT60*) foi utilizado o parâmetro *Topt* fornecido pelo *REW*, que consiste, segundo Mucaly (2021) em um tempo de decaimento *RT60* ideal.

A figura 20 apresenta as médias de *Topt*.

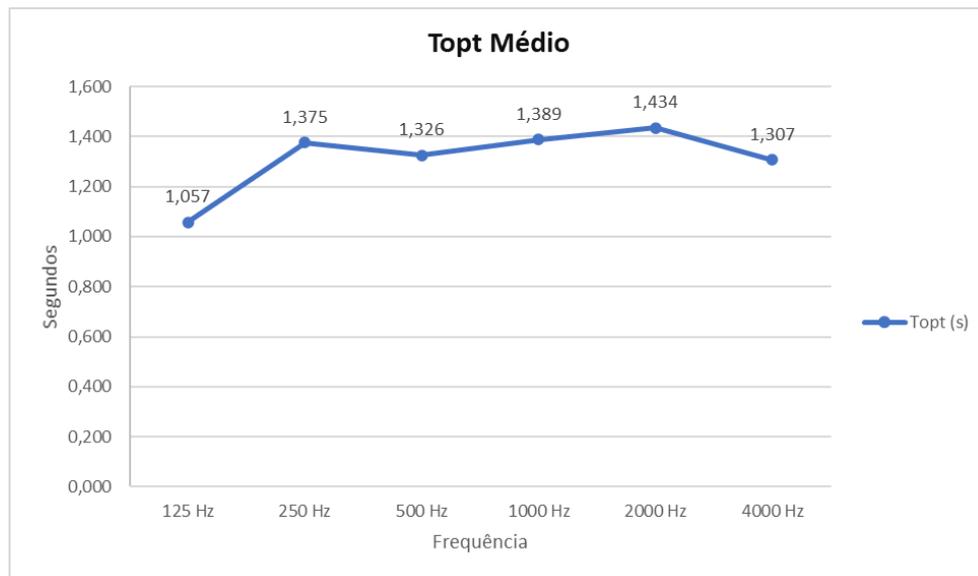


Figura 20 - *Topt* médio.
Fonte: Pesquisa direta (2021).

Observa-se na figura 20 as médias de *Topt* dos 11 pontos medidos através do ensaio experimental para cada frequência selecionada. Assim, é possível perceber um padrão bem próximo para os valores de *Topt*. A maior discrepância é identificada na frequência mais baixa, de 125 Hz. O tempo de reverberação ótimo na frequência de 500Hz para o volume do recinto estudado (2357,28m³) é de aproximadamente 1,2 segundos, enquanto o valor obtido para essa frequência através dos ensaios experimentais foi de 1,326 segundos, um pouco acima do recomendado.

A tabela 6 apresenta o desvio padrão destas médias.

Tabela 6 – Desvio padrão entre as médias de *Topt*

Frequência	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Desvio Padrão	0,134	0,073	0,066	0,094	0,043	0,035

Fonte: Pesquisa direta (2021).

O desvio padrão mostra valores bem baixos, indicando pouca variabilidade entre as médias obtidas. A frequência de 125Hz foi a que apresentou maior valor para o desvio padrão.

A figura 21 mostra os valores de *Topt* divididos por cada andar.

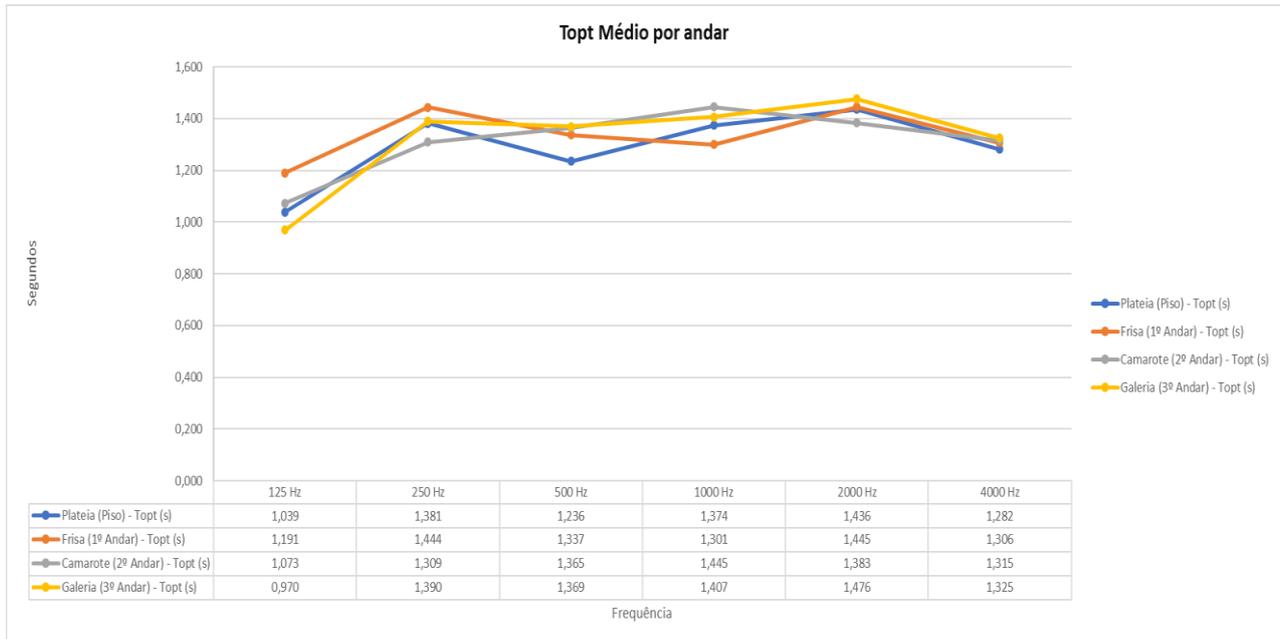


Figura 21 - *Topt* médio por andar.
Fonte: Pesquisa direta (2021).

Os dados apontam pouca variação entre os andares. A frequência de 125Hz, apresenta o valor de *Topt* mais baixo de cada andar.

4.3.2 EDT

A figura 22 apresenta as médias de *EDT* dos 11 pontos medidos através do ensaio experimental para cada frequência desejada.

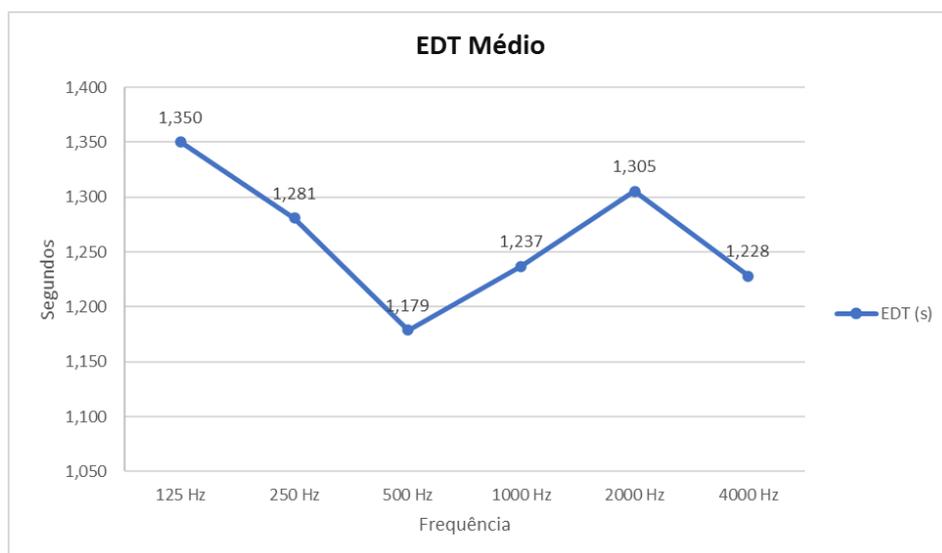


Figura 22 – *EDT* médio.
Fonte: Pesquisa direta (2021).

Assim como discutido anteriormente, quando o tempo de decaimento inicial é menor que o Tempo de Reverberação, a sensação de reverberação é amenizada, e, para o oposto, a sensação de reverberação é aumentada.

Avaliando a figura 22, é possível perceber que entre 250 Hz e 4000 Hz, apresentam-se valores de *EDT* menores do que o *Topt*, indicando uma sensação do ouvinte sobre o tempo de reverberação menor do que a realidade. Já na faixa de frequência mais grave (125Hz), o valor de *EDT* foi superior (1,35 segundos), dando ao ouvinte uma sensação de tempo de reverberação maior do que a realidade, o que pode indicar uma clareza pior que os outros valores analisados.

A tabela 7 apresenta o desvio padrão destas médias.

Tabela 7 – Desvio padrão entre as médias de *EDT*

Frequência	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Desvio Padrão	0,273	0,483	0,239	0,256	0,203	0,113

Fonte: Pesquisa direta (2021).

O desvio padrão para os valores do *EDT* médio demonstram-se maiores em comparação ao desvio padrão do *Topt* médio, o que indica maior dispersão nas médias de *EDT*. Isso pode ser explicado devido a *EDT* estar mais relacionado as primeiras reflexões, sendo esses valores mais sensíveis à distância das medições em relação a fonte sonora.

A seguir, na figura 23, é mostrado os valores de *EDT* médio divididos em cada andar.

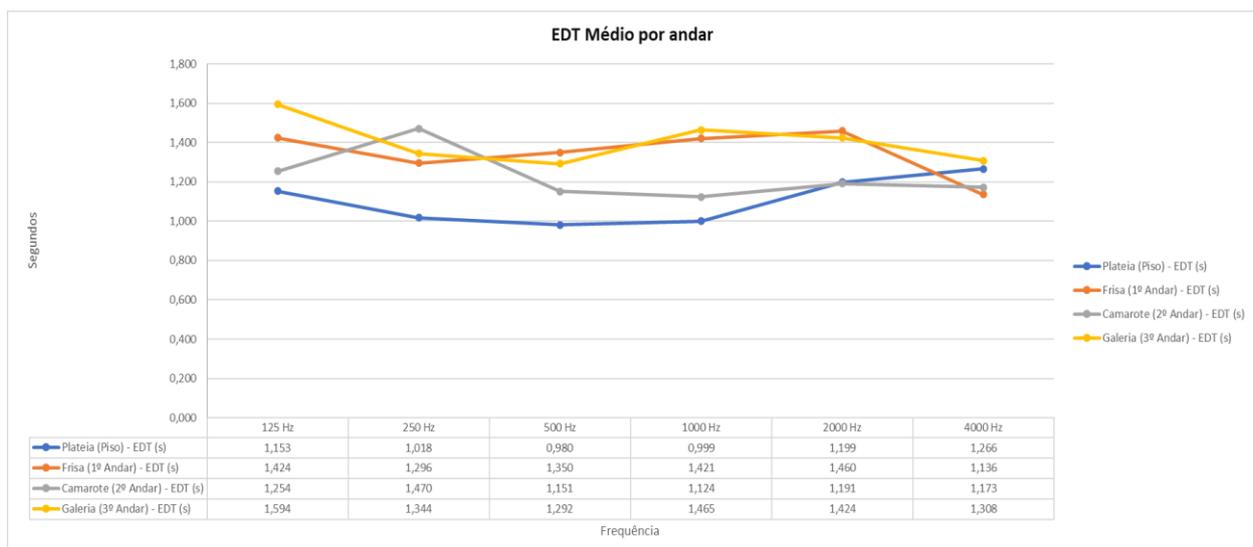


Figura 23- EDT médio por andar.

Fonte: Pesquisa direta (2021).

Nota-se que não houve um padrão para os valores médios de *EDT*, variando muito em cada andar e nas frequências. É perceptível que na plateia (pisos), os valores de *EDT* são menores entre 125Hz e 1000Hz. Na frisa (1º andar) e na galeria (3º andar), foram identificados valores bem semelhantes para *EDT*. Os valores de *EDT* no camarote (2º andar), se apresentaram maiores nas frequências mais baixas, e a partir de 500Hz notou-se uma estabilização nesses valores.

4.3.3 C50

A figura 24 apresenta as médias de *C50* dos 11 pontos medidos através do ensaio experimental para cada frequência desejada.

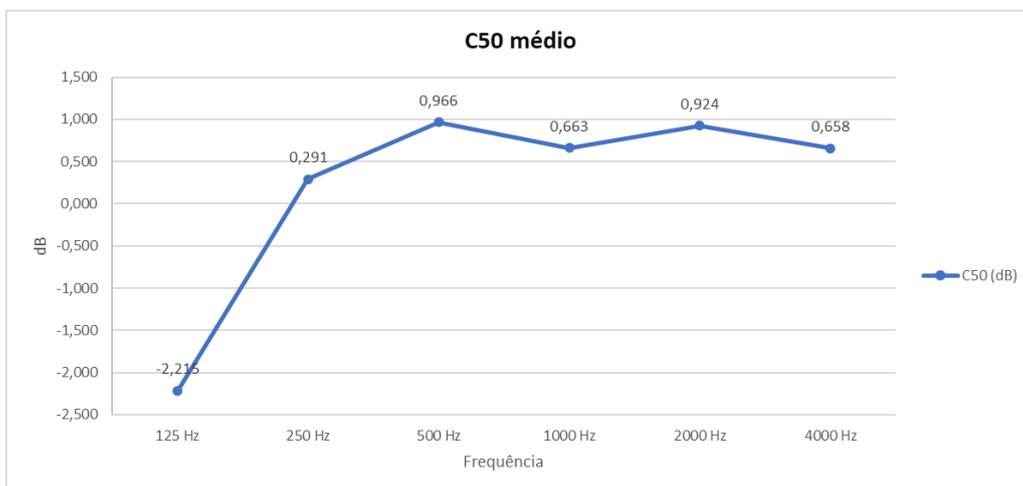


Figura 24- C50 médio.

Fonte: Pesquisa direta (2021).

Conforme a figura 24, os valores apresentados entre 250 Hz e 4000 Hz mostram uma relação positiva entre a energia inicial e a tardia após 50ms, porém quase nula. Como *C50* é mais frequentemente usado como um indicador de clareza de fala, pode-se dizer que a clareza de fala é relativamente boa para essa faixa de frequência, por prevalecer as primeiras reflexões e não as tardias. O único valor negativo coletado para esse parâmetro, foi na frequência de 125Hz, o que indica excessivas reflexões após 50ms, podendo prejudicar o entendimento do ouvinte nessa faixa de frequência.

A tabela 8 apresenta o desvio padrão destas médias.

Tabela 8 – Desvio padrão entre as médias de *C50*

Frequência	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Desvio Padrão	2,477	2,913	2,483	1,995	1,238	0,770

Fonte: Pesquisa direta (2021).

O desvio padrão apresentou valores elevados entre as médias em cada frequência, o que mostra elevada dispersão dos valores obtidos em cada ponto, exceto em 4000Hz. Isso pode ser justificado mais uma vez devido à posição das medições em relação a fonte sonora, que influencia diretamente nas reflexões iniciais e tardias.

A figura 25 apresenta os valores de $C50$ médios separados por cada andar.

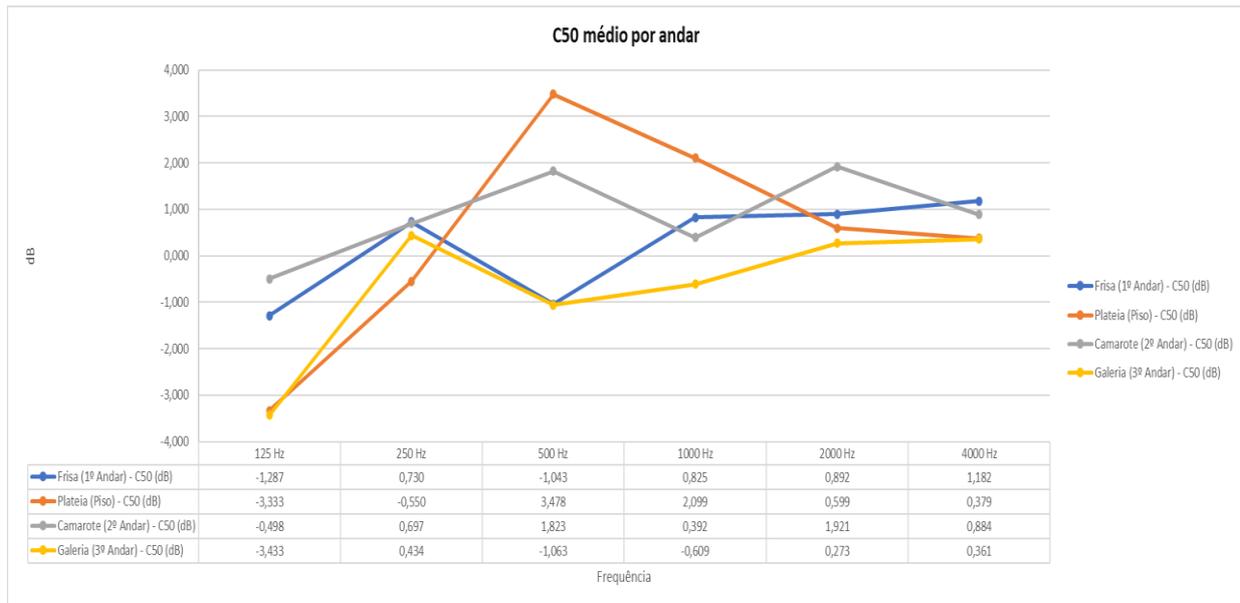


Figura 25 - $C50$ médio por andar.
Fonte: Pesquisa direta (2021).

Através da figura 25, é possível observar que o parâmetro $C50$ se mantém negativo para a faixa de frequência de 125Hz em todos os andares. Em comparação aos outros andares, o camarote (2º andar) foi o que apresentou os valores mais constantes entre 125Hz e 4000Hz. Em 500Hz nota-se a maior dispersão entre os dados coletados, isso pode ser explicado devido a diferença de altura entre os pontos de medição.

4.3.4 C80

A figura 26 apresenta as médias de C80 dos 11 pontos medidos através do ensaio experimental para cada frequência desejada.

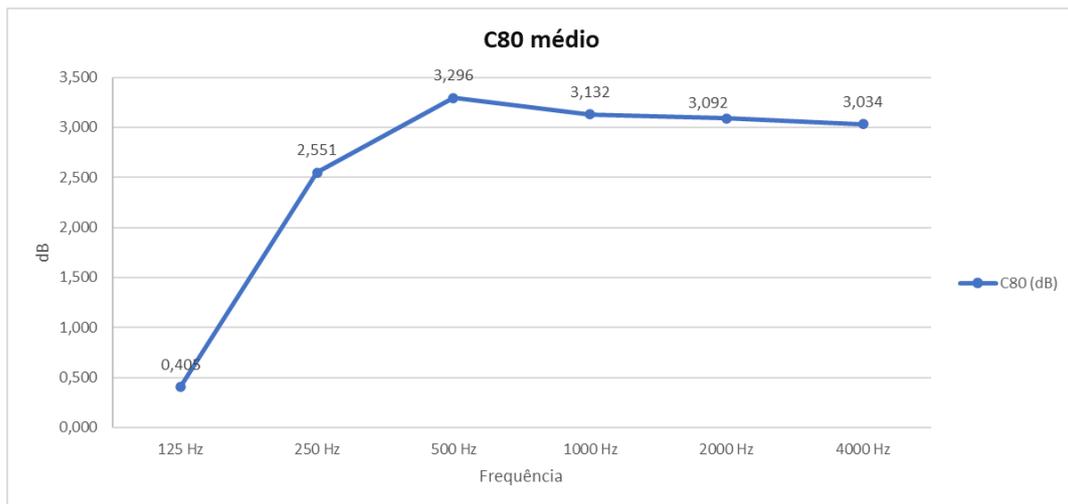


Figura 26 - C80 médio.

Fonte: Pesquisa direta (2021).

De acordo a figura 26, os valores apresentados entre 250 Hz e 4000 Hz mostram uma relação positiva elevada entre a energia inicial e a tardia após 80ms. Isso demonstra uma deficiência nas reflexões tardias, que são reflexões que contribuem para o colorido musical. Como *C80* é mais frequentemente usado como um indicador de clareza musical, pode ser que nessa faixa de frequência ocorra uma sensação de pouca reverberação, ou de um som opaco ou seco. Na frequência de 125Hz, apresentou-se um valor quase que nulo para a relação entre energia inicial e tardia.

A tabela 9 apresenta o desvio padrão destas médias.

Tabela 9 – Desvio padrão entre as médias de C80

Frequência	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Desvio Padrão	2,880	3,157	2,220	1,587	1,298	0,842

Fonte: Pesquisa direta (2021).

O desvio padrão apresentou valores elevados entre as médias em cada frequência, o que mostra alta variabilidade dos valores obtidos em cada ponto, exceto em 4000Hz.

A figura 27 representa o *C80* médio por andar.

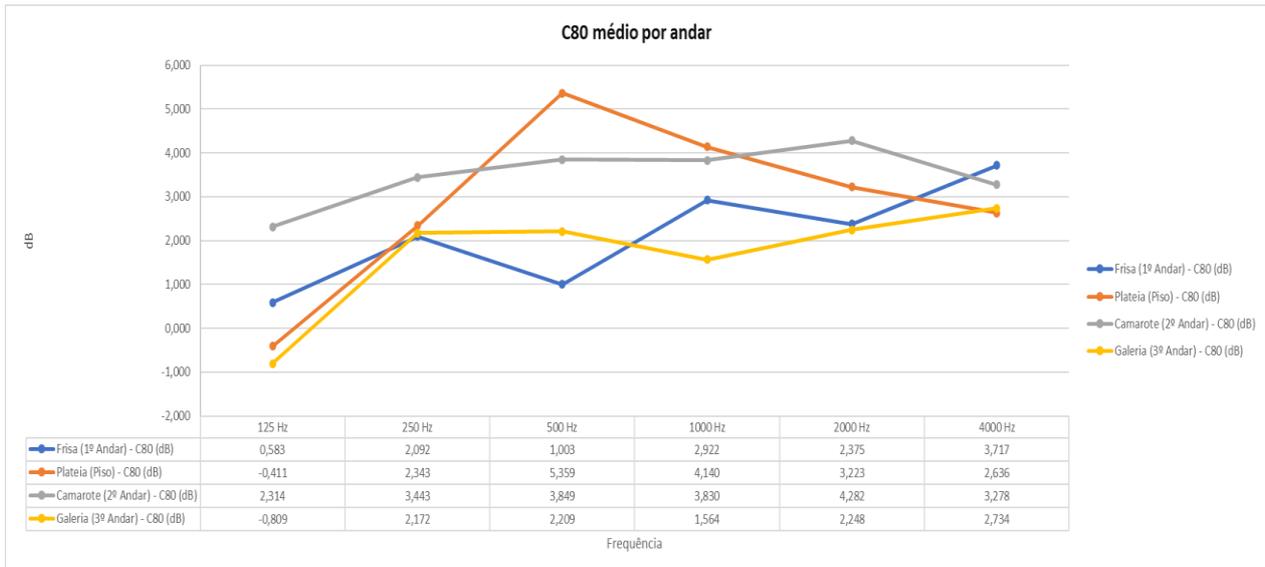


Figura 27 – C80 médio por andar.
 Fonte: Pesquisa direta (2021).

Observa-se na figura 27, que os valores mais baixos de $C80$ de cada andar, estão na faixa de frequência de 125Hz. No camarote (2º andar), foi onde apresentou-se maior linearidade entre os valores obtidos de $C80$, mas com valores excessivos nas reflexões iniciais. Valores negativos foram identificados apenas na faixa de frequência de 125 Hz na frisa (piso), na plateia (1º andar) e na galeria (3º andar). A elevada dispersão entre os valores de cada andar, pode ser explicada também pela diferença de altura entre os pontos de medição.

4.3.5 D50

A figura 28 apresenta as médias de *D50* dos 11 pontos medidos através do ensaio experimental para cada frequência desejada.

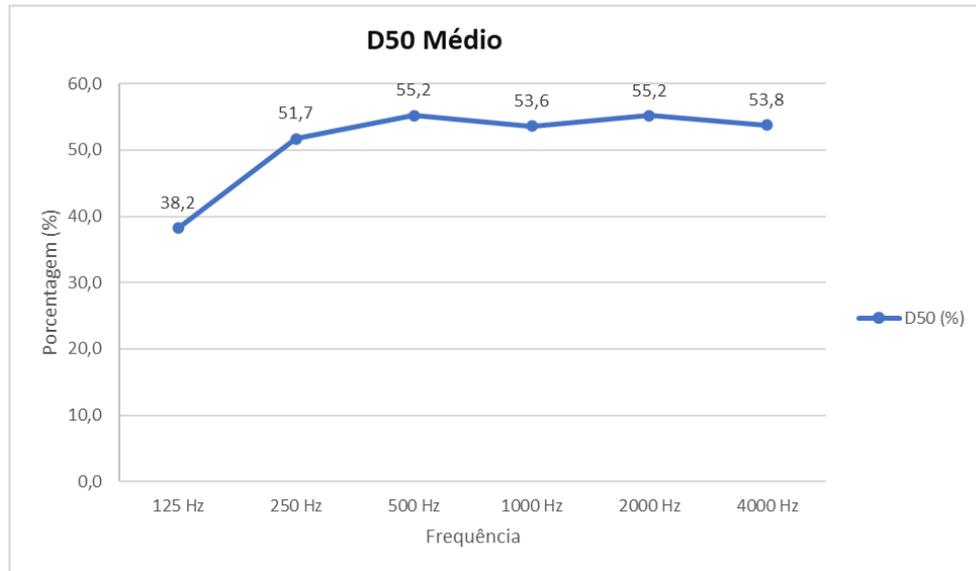


Figura 28 – D50 médio.

Fonte: Pesquisa direta (2021).

Através da figura 28, é possível observar valores acima de 50% para *D50* entre 250 Hz e 4000 Hz, o que indica boa compreensão do discurso realizado dentro do ambiente nessa faixa de frequência. Apenas na frequência de 125 Hz, o valor de *D50* foi menor que 50%.

A tabela 10 apresenta o desvio padrão destas médias.

Tabela 10 – Desvio padrão entre as médias de *D50*

Frequência	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Desvio Padrão	13,163	15,684	13,452	11,017	6,768	4,398

Fonte: Pesquisa direta (2021).

O desvio padrão encontrado para as médias de *D50* foram elevados, principalmente nas frequências mais baixas, reforçando a ideia de que as medições são sensíveis à posição do microfone em relação a fonte sonora.

A figura 29 representa o *D50* médio por andar.

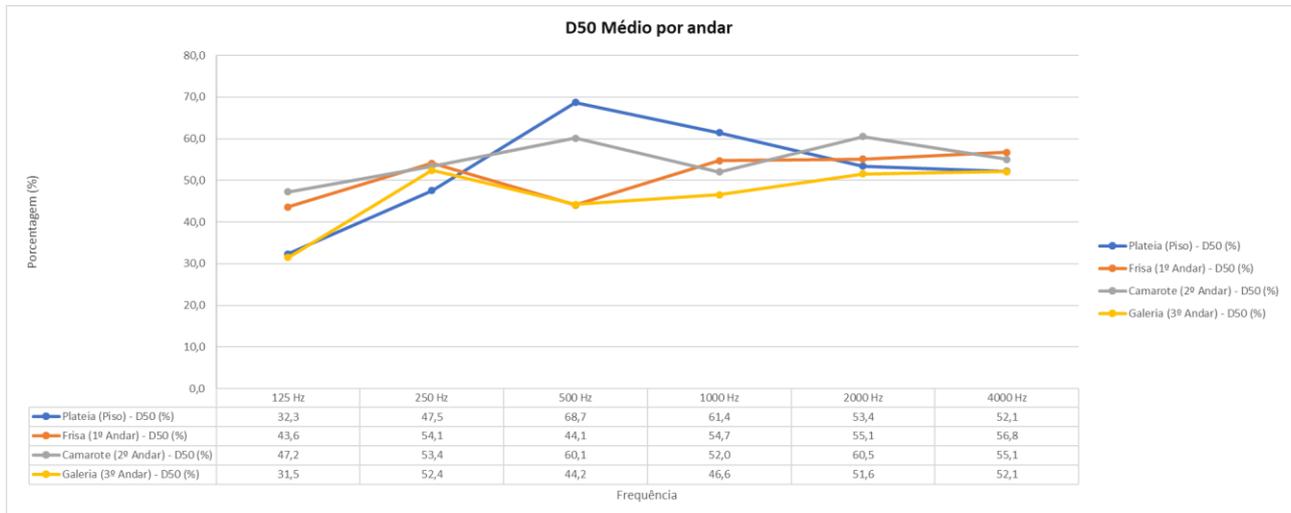


Figura 29 - *D50* médio por andar.

Fonte: Pesquisa direta (2021).

Na figura 29 é possível identificar que, entre 1000 Hz e 4000 Hz, a maioria dos valores de *D50* estão acima de 50%. Em 500 Hz, apresenta-se elevada variação entre os andares, sendo a plateia (piso) e o camarote (2º andar) com os melhores valores para essa faixa de frequência. Em 125 Hz, nota-se valores abaixo de 50%.

5- CONCLUSÃO

Neste capítulo é apresentada as conclusões retiradas do trabalho com base nos resultados obtidos. Também foram relacionadas algumas recomendações para possíveis trabalhos futuros.

5.1 Conclusão

Em geral, a faixa de frequência que apresentou maior discrepância nos valores dos parâmetros, foi a de 125Hz. Isso pode ser explicado talvez pela geometria do local e o baixo volume do teatro.

O parâmetro mais importante da acústica, o Tempo de Reverberação (analisado nesse trabalho pelo parâmetro como T_{opt}), apresentou-se com valores bem próximos aos recomendados pelos padrões da ABNT (1992) em todas as faixas de frequência (exceto em 125 Hz) para todos os pontos medidos. O T_{opt} médio encontrado em 500 Hz foi de 1,326 segundos, o que mostra semelhança com o valor de aproximadamente 1,2 segundos do tempo de reverberação ótimo no volume de $\sim 2,400 \text{ m}^3$ do local. Quando os assentos estiverem ocupados por pessoas, os valores T_{opt} irão reduzir devido ao aumento da quantidade de superfícies absorvedoras.

Os valores médios de EDT se apresentaram abaixo dos valores médios de T_{opt} na maioria dos pontos, o que indica melhor entendimento da fala e menor sensação de reverberação nos pontos onde isso ocorreu (entre 250Hz e 4000Hz). Nas faixas de frequência restantes, o EDT apresentou valores acima dos valores obtidos de T_{opt} , dando uma sensação de reverberação maior que a realidade.

De acordo com os valores $C50$, constatou-se, de maneira geral, uma boa clareza para a fala devido à baixa energia das reflexões tardias até 50ms. Em contrapartida, os dados obtidos para $C80$, em geral, se apresentaram com valores elevados, indicando baixa energia das reflexões tardias após 80ms. Dessa forma a sensação do ouvinte perante a música pode apresentar uma falta de coloração musical. Valores positivos para esses parâmetros foram localizados na maioria das frequências analisadas, exceto na faixa de frequência de 125 Hz.

Os dados coletados para $D50$ se alinham com os de $C50$, e mostram uma boa inteligibilidade de fala no local. Sendo $D50$, a relação entre energia inicial e total como uma porcentagem, a maioria dos valores obtidos deram acima de 50%, exceto em 125Hz que teve uma média geral de $\sim 38,215\%$, bem abaixo dos valores encontrados nas outras frequências analisadas. A média geral de $D50$ em todas as faixas de frequência foi de 51,26%.

Diante dos dados obtidos para $C50$ e $D50$, pode-se dizer que o som refletido chega cedo o suficiente para reforçar o som direto, o que garante um bom entendimento da voz falada no interior do recinto.

Em geral, os valores de $C80$, e a comparação entre EDT e $Topt$, demonstraram que a sensação no interior do teatro de reverberação pode estar sendo levemente prejudicada. Entretanto os valores não apresentaram grandes discrepâncias diante da literatura analisada para ser considerada uma deficiência acústica nesse quesito.

O Teatro Municipal de Ouro Preto apresenta bom desempenho acústico segundo os dados coletados. A performance do ambiente apresentou bons valores tanto para a inteligibilidade do discurso quanto para a música. A geometria do local alinhada à disposição das cadeiras, juntamente da inclinação do palco e da plateia, favorece a acústica do ambiente, permitindo uma boa experiência sonora aos ouvintes em todos os andares do recinto.

5.2 Considerações Finais

O trabalho levantou parâmetros importantes para diversas análises acústicas, entretanto ainda existem diversas outras possibilidades. Uma análise sobre o ruído de fundo no local seria interessante de ser realizada a partir do levantamento de valores em dias diferentes e horários diversos. Essas informações serviriam para poder definir melhor as datas e horários de determinadas apresentações. Além disso pode-se criar uma média para o valor do ruído de fundo no local.

A geometria do ambiente é um fator muito importante na resposta acústica do local. Análises perante a proporção do volume do palco e do ambiente destinado aos espectadores, da inclinação do palco e da plateia, e o formato do recinto, podem trazer informações relevantes para entender melhor o comportamento acústico do teatro.

BIBLIOGRAFIA

- BARRON, M. (2010). *Auditorium Acoustics and Architectural Design* (Second Edition ed.). New York, USA: Spon Press.
- BERANEK, L. (2004). *Concert Halls and Opera Houses Music, Acoustics, and Architecture*. New York: SPRINGER-VERLAG.
- BISTAFA, S., & GRANADO, M. (2005). *A survey of the acoustic quality for speech in auditoriums*. São Paulo: Electronic Journal.
- BRANDÃO, E. (2016). *Acústica de salas - Projeto e modelagem*. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda.
- BRUEL & KJAER. (1988). *Measurements in Building Acoustics*. Nærum, Denmark.
- BRUEL & KJAER. (1998). *Sound and Vibration Measurement A/S*. Brüel & Kjær.
- DONOSO, J. (2005). *Apostila Física (Arquitetura)*. São Carlos - SP: Instituto de Física de São Carlos.
- DONOSO, J. P. (2005). *Som e Acústica*. São Carlos: Instituto de Física de São Carlos.
- EVEREST, A. F. (2001). *The Master Handbook of Acoustics* (Fourth ed.). New York, United States: McGraw-Hill.
- GIL, A. (2002). *Como Elaborar Projetos de Pesquisa* (4 ed.). São Paulo: Atlas.
- GIL, A. (2008). *Métodos e Técnicas de Pesquisa Social* (6 ed.). Atlas.
- HALLIDAY, D., RESNICK, R., & WALKER, J. (2014). *Fundamentals of Physics* (10 ed., Vol. 2). John Wiley & Sons, Inc.
- HAVELOCK, D., KUWANO, S., & VORLANDER, M. (2008). *Handbook of Signal Processing in Acoustics* (Vol. 1). Springer.
- HENRIQUE, L. L. (2002). *Acústica Musical*. Lisboa: Fundação Calouste Gulbekian.
- KUTTRUFF, H. (2000). *Room Acoustics* (Fourth ed.). London: Spon Press.
- MOUDON, A. V. (2009). *Real Noise from the Urban Environment*. Elsevier Inc.
- PEREIRA, A. S., MOREIRA SHITSUKA, D., PARREIRA, F. J., & SHITSUKA, R. (2018). *Metodologia da Pesquisa Científica* (1ª ed.). Santa Maria, RS: Núcleo de Tecnologia Educacional – NTE.

- PINHEIRO, J., GOMES, G., DA CUNHA, S., & CARVAJAL, S. (2012). *Probabilidade e Estatística*. Elsevier.
- PLOMP, R. (2002). *THE INTELLIGENT EAR: On the Nature of Sound Perception*. Mahwah, New Jersey, United States: LAWRENCE ERLBAUM ASSOCIATES, PUBLISHERS.
- PRODANOV, C. C., & DE FREITAS, E. C. (2013). *Metodologia do Trabalho Científico: métodos e Técnicas da Pesquisa e do Trabalho Acadêmico* (2ª Edição). Novo Hamburgo: Feevale.
- ROSSING, T. D., MOORE, R., & WHEELER, P. (2014). *The Science of Sound* (Third Edition). Harlow: Pearson Education Limited.
- SEVERINO, A. J. (2014). *Metodologia do Trabalho Científico*. São Paulo: CORTEZ EDITORA.
- SELLTIZ, Claire et ai. *Métodos de pesquisa nas relações sociais*. São Paulo: Herder, 1967.
- MULCAHY, JOHN (2021). **About REW**. Disponível em: <https://www.roomeqwizard.com/>
- VIEIRA, Lucas (2006). *Standing wave*. Disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Standing_wave_2.gif