



MODELAÇÃO BIM DO TEMPO DE REVERBERAÇÃO EM SALAS DE AULA

FRANCISCO HERON CAVALCANTE FELIX

outubro de 2024

MODELAÇÃO BIM DO TEMPO DE REVERBERAÇÃO EM SALAS DE AULA

Francisco Heron Cavalcante Felix

**Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil, Área de Especialização em
Construções**

Orientador: Duarte Barroso Lopes

Júri:

Presidente:

Prof. Dra. Maria do Rosário Santos Oliveira, Professora-adjunta, ISEP

Vogais:

Vogal1: Ricardo Manuel dos Santos Ferreira de Almeida, prof Coordenador, ESTGV - Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu do Inst Politecnico de Viseu

Vogal2: Duarte Barroso Lopes, prof Adjunto, ISEP Instituto Superior de Engenharia de Porto - Instituto Politécnico de Porto

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter conduzido este trabalho académico com integridade. Não plagiei ou apliquei qualquer forma de uso indevido de informações ou falsificação de resultados ao longo do processo que levou à sua elaboração.

Declaro que o trabalho apresentado neste documento é original e de minha autoria, não tendo sido utilizado anteriormente para nenhum outro fim.

Declaro ainda que tenho pleno conhecimento do Código de Conduta Ética do P.PORTO.

Francisco Heron Cavalcante Felício

ISEP, Porto, 06 de outubro de 2024

Dedicatória

Dedico este pequeno esforço a meu irmão, Henrique.

Resumo

Este estudo investiga o uso da metodologia de modelagem de informação de construção para análise de desempenho acústico de ambientes construídos em fase de projecto. Através de revisão na literatura, foi possível obter um quadro do estado da arte e identificar como lacuna de pesquisa a necessidade de haver interoperabilidade de soluções neste sentido, nomeadamente com ferramentas inseridas em *softwares* de modelagem – seleccionando-se como alternativa relevante o REVIT, a ser implementado em salas de aula mediante escolha fundamentada em coleta prévia de dados, constante de trabalho de HUPALO (2017) ao qual este dá prosseguimento e contribui no sentido de propor ferramenta computacional. Tomou-se como parâmetro o tempo de reverberação; baseado na fórmula de Sabine e com banco de dados encontrado em literatura (após pesquisa comparativa e escolha do conjunto de dados mais amplo), desenvolveu-se modelo em *Dynamo* cujos resultados, após testados, representaram satisfatoriamente o tempo de reverberação de duas salas, escolhidas por serem quase simétricas. Concluiu-se que a metodologia aplicada é recurso válido para auxílio na tomada de decisão do processo projectual, com impacto em projetos de salas de aula e ambientes similares dentro das delimitações da pesquisa, sendo possível apontar desenvolvimentos futuros no intuito de ampliar o estudo.

Palavras-chave: acústica, reverberação, projeto, modelagem, Dynamo, REVIT

Abstract

This study investigates the use of building information modelling methodology for acoustic performance analysis of built environments in the design phase. Through an extensive literature review, it was possible to obtain an overview of the state of the art and identify the need for interoperability of solutions as a research gap, particularly regarding tools embedded in modelling *software*. REVIT was selected as a relevant alternative to be implemented in classrooms chosen based on prior data collection documented in the work of HUPALO (2017), which this research continues and contributes to by proposing a computational tool. Reverberation time was chosen as a parameter; based on Sabine's equation and a database found in the literature (after comparative research and selection of the most comprehensive dataset), a model was developed in Dynamo whose results, after testing, satisfactorily represented the reverberation time of two rooms, chosen for being almost symmetrical. It was concluded that the methodology is a valid resource to aid in decision-making in the design process, with an impact on classroom projects and similar environments within the research boundaries, and it was possible to point out future developments to further expand the study.

Keywords: acoustics, reverberation, project, modelling, Dynamo, REVIT

Agradecimentos

A Gabriela, pela determinação e força ao me acompanhar em um período de privações e provações para que obtivéssemos nossos títulos acadêmicos.

Ao engenheiro Duarte Barroso Lopes, pela atenção e sensibilidade demonstrados ao longo da construção desta tese.

Ao café Âncora D'ouro (O Piolho), onde tive o privilégio e o orgulho de morar por cerca de um ano e meio, no auge da pandemia de COVID-19, sendo por dois meses o único habitante daquele estabelecimento, no que foi um imenso gesto de solidariedade – terá sempre minha gratidão e carinho. Em especial, e *in memoriam*, agradeço a Luís Filipe Gonçalves da Costa.

Índice

1	Introdução	1
1.1	Considerações iniciais	1
1.2	Problema de pesquisa	1
1.3	Objetivos de pesquisa	2
2	Estado da arte generalidades	3
2.1	Generalidades	3
2.2	Propriedades das ondas	3
2.2.1	Propriedades básicas das ondas	3
2.2.2	Interferência entre ondas	4
2.3	Fundamentos do som	5
2.3.1	Variáveis fundamentais	7
2.3.2	A escala decibel	8
2.4	O sistema auditivo	10
2.5	Percepção do som	11
2.5.1	Conceitos e termos relevantes	11
2.5.2	Curvas de ponderação	12
2.6	Fenômenos ondulatórios do som	12
2.6.1	Reflexão sonora	13
2.6.2	Difusão sonora	13
2.6.3	Espalhamento sonoro	14
2.6.4	Absorção sonora	14
2.6.5	Transmissão sonora	15
2.6.6	Difração sonora	15
2.7	Som e ruído	16
2.7.1	Ruídos segundo sua transmissão	17
2.7.2	Ruídos segundo a distribuição de suas frequências	18
2.7.3	Tipos de ruído - classificação geral	18
2.7.4	Aplicação	19
2.8	Tempo de Reverberação	20
2.8.1	O fenômeno da reverberação	20
2.8.2	Definição do tempo de reverberação (TR) e fórmula de Sabine	21
2.9	Modelos matemáticos - comparação de equações	23
2.9.1	Coefficientes de absorção sonora	23
2.9.2	Comparação das Fórmulas para cálculo do Tempo de Reverberação	26
2.10	Tempo de reverberação ótimo e inteligibilidade	30
2.11	Relevância da Acústica em Salas de Aula	32
2.11.1	Relevâncias fundamentais	32

2.11.2 Relevância para alunos e professores	33
2.12 Simulação Acústica e BIM.....	33
2.12.1 Generalidades	33
2.12.2 Modelos computacionais	35
2.13 Normas e Legislação	37
2.13.1 Legislação - Portugal	37
2.13.2 Legislação - outros países	40
2.13.3 Normas técnicas	42
3. Caso de Estudo	47
3.1 Análise de Edifícios e Salas de Aula	47
3.1.1 Sala C301	47
3.1.2 Sala C302	48
3.2 Metodologia.....	49
3.2.1 Construção do Experimento	49
3.2.2 Definições do Modelo BIM	55
4 Resultados	57
4.1 Validação (etapa de testes 1) - sala C301	57
4.2 Análise dos resultados (etapa de testes 2) - sala C301	60
4.3 Validação (etapa de testes 3) - sala C301	61
4.4 Análise de Sensibilidade (etapa de testes 4) - sala C301.....	66
4.5 Validação (etapa de testes 1) - sala C302	68
4.6 Análise dos resultados (etapa de testes 2) - sala C302	71
4.7 Validação (etapa de testes 3) - sala C302	72
4.8 Análise de Sensibilidade (etapa de testes 4) - sala C302.....	75
4.9 Diferenças entre as salas C301 e C302	77
5. Conclusões	80
5.1 Considerações finais.....	80
5.2 Críticas e Desenvolvimentos Futuros	81
5.2.1 Críticas	81
5.2.2 Desenvolvimentos futuros.....	82
6. Referências	83
Anexo A.....	91

Lista de Figuras

Figura 1 - características de uma onda (adaptado de Photinos, 2021).	3
Figura 2 - interferência entre ondas (adaptado de Photinos, 2021).	4
Figura 3 - o fenômeno do som no ar (Principles of assessment, ([s.d.].....	5
Figura 4 - modelos de ondas plana e esférica (adaptada de Bistafa, 2011).	6
Figura 5 - comportamento das ondas sonoras (adaptado de Sound propagation, reflection, absorption and transmission - Atelier Crescendo Acoustic Consultancy, ([s.d.].....	6
Figura 6 - relação entre pressão sonora, nível de pressão sonora, frequência sonora e oitavas (adaptada de CIOP - Central Institute for Labour Protection, ([s.d.].....	8
Figura 7 - sistema auditivo humano (adaptado de Jacobsen et al., 2008).	10
Figura 8 - movimento da membrana basilar(Jacobsen et al., 2008).....	10
Figura 9 - curvas isotônicas ou curvas de Fletcher-Munson (Costa, 2003).	11
Figura 10 - valores assumidos por STI e seu significado.	11
Figura 11 - curvas de ponderação (adaptado de Ansys, [s.d.].....	12
Figura 12 - fenômeno da reflexão sonora (adaptado de Gianni, 2010).	13
Figura 13 - distribuição direcional de som após dispersão (Kuttruff, 2000).....	14
Figura 14 - fenômenos de interação do som com materiaisSound propagation, reflection, absorption and transmission - Atelier Crescendo Acoustic Consultancy, ([s.d.].....	15
Figura 15 - distinção entre som e ruído (adaptado de Amaral, 1968).....	16
Figura 16 - transmissão de ruídos aéreos e de percussão (Freitas, (2012)	17
Figura 17 - mecanismo de mascaramento ilustrado pela introdução de um tom puro(Bistafa, 2011). 19	
Figura 18 - decaimento exponencial da energia sonora devido à reverberação (adaptado de Early Decay Time as a System Performance Benchmark, ([s.d.].....	20
Figura 19 - gráfico do tempo de reverberação (adaptado de Zainudin et al., (2018)).	21
Figura 20 - tempos de reverberação aconselhados, para $f=500\text{Hz}$ (Patrício, 2018).....	22
Figura 21 - ábaco de Dance e Shield (adaptado deDucourneau e Planeau, (2003).	24
Figura 22 - comparação de equações para obter TR (adaptado de Bistafa e Bradley, (2000).	26
Figura 23 - linha do tempo de principais fórmulas para calcular TR (adaptado de Neubauer e Kostek, 2001).....	27
Figura 24 - comparação de equações para obter TR (adaptado de Zhou et al., (2021).	30
Figura 25 - valores de STI em função de TR para salas de aula de 100m^3 e 300m^3 (Bistafa e Bradley, 2000)	31
Figura 26 - Vantagens e desvantagens listadas por profissionais ao usarem softwares integrados de simulação acústica (Harvey, 2021)	34
Figura 27 - preferência de software BIM segundo a fase de projeto (adaptado de Jeong, 2022).	35
Figura 28 – resumo geral de modelos geométricos e de onda (Vorländer, 2013)	36
Figura 29 - intervalo de tolerância para o tempo de reverberação requerido (adaptado de Nocke, 2018)	46
Figura 30 - planta do campus do ISEP (ISEP - Instituto Superior de Engenharia do Porto, [s.d.].....	47
Figura 31 - localização e aspeto visual da sala C301 (autor).	48
Figura 32 - localização e aspeto visual da sala C302 (autor).	49
Figura 33 - elementos componentes do modelo BIM da sala C301 (autor).....	50
Figura 34 - modelo BIM da sala C301 (autor).	51
Figura 35 - estrutura da construção do experimento (autor).	53
Figura 36 - interface de programação visual Dynamo utilizada no experimento (autor).	54

Figura 37 - resultado do tempo de reverberação exportado do REVIT por programação visual para planilha do MS Excel (autor).....	54
Figura 38 - dados de área e de coeficiente de absorção sonora de uma mesa acessíveis no "gêmeo digital" online.....	55
Figura 39 - estágios de maturidade BIM (adaptado de ISO 19650-1, 2018).....	56
Figura 40 - análise descritiva e comparativa - modelagens da sala C301 (autor)	57
Figura 41 - comparação entre modelo computacional e matemático da sala C301 (autor).....	60
Figura 42 - Regressão linear para sala C301 (autor)	63
Figura 43 - regressão quadrática para sala C301 (autor).....	65
Figura 44 - alteração percentual do TR segundo incremento de alunos para a sala C301 (autor)	67
Figura 45 - Resposta da variável TR a ocupação média da sala C301 (autor).....	67
Figura 46 - análise descritiva e comparativa - modelagens da sala C302 (autor)	69
Figura 47 - comparação entre modelo computacional e matemático da sala C302 (autor).....	71
Figura 48 - Regressão linear para sala C302 (autor)	72
Figura 49 - regressão quadrática para sala C302 (autor).....	74
Figura 50 - alteração percentual do TR segundo incremento de alunos para a sala C302 (autor)	76
Figura 51 - Resposta da variável TR a ocupação média da sala C302 (autor).....	76
Figura 52 - comparação dos TRs coletados e modelados para ambas as salas (autor).....	77
Figura 53 - ajuste dos dados modelados entre as salas após retirada do duto na sala C302 (autor).	78
Figura 54 - sequência de testes da fase de validação.....	79

Lista de Tabelas

Tabela 1 - funcionamento da escala decibel (Peters, Smith e Hollins, 2013).....	9
Tabela 2 - classificação dos ruídos consoante sua origem (Noceti Filho, 2018).....	17
Tabela 3 - características dos sinais de ruídos branco e rosa (*) a forma de onda corresponde à função Densidade Espectral de Potência (adaptada de Noceti Filho, 2018).....	18
Tabela 4 - tempo de reverberação para salas de aula (RRAE, 2008).....	39
Tabela 5 - referências francesas para o tempo de reverberação em locais de ensino (Dec. 25/04/2003).	41
Tabela 6 - referências suecas para o tempo de reverberação em instalações de ensino (SS 25268).....	42
Tabela 7 - referências do Reino Unido para tempo de reverberação (BB 93).....	43
Tabela 8 - referências americanas para o tempo de reverberação (ANSI S12.60-2002).....	44
Tabela 9 - testes Shapiro-Wilk e Shapiro Francia para a sala C301 (autor).....	58
Tabela 10 - teste de Spearman para a sala C301 (autor).....	62
Tabela 11 - testes de heterocedasticidade de Breusch-Pagan e de White para a sala C301 (autor).....	66
Tabela 12 - testes Shapiro-Wilk e Shapiro Francia para a sala C302 (autor).....	70
Tabela 13 - teste de Spearman para a sala C302 (autor).....	72
Tabela 14 - testes de heterocedasticidade de Breusch-Pagan e de White para a sala C302 (autor).....	75

Acrónimos e Símbolos

Lista de Acrónimos

BIM	<i>Building Information Modelling</i> (modelagem de informação da construção)
CAD	<i>Computer Aided Design</i> (desenho/projecto auxiliado por computador)
dB	decibel
dBA	decibel ponderado segundo a curva A
Hz	hertz
ISO	International Organization for Standardization
NP	Norma Portuguesa
RRAE	Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (decreto-lei 129/2002)
RGR	Regulamento Geral do Ruído (decreto-lei 96/2008)
TR	Tempo de Reverberação

Lista de Símbolos

α	Coefficiente de absorção sonora
ρ	Coefficiente de correlação de Spearman

1 Introdução

1.1 Considerações iniciais

A acústica é área de intersecção entre vários ramos da construção: engenharia civil e arquitetura (e.g.: isolamento e condicionamento acústico); acústica ambiental (e.g.: mapas de ruído), eletroacústica; caracterização de materiais; instalações (e.g.: AVAC); segurança e higiene no trabalho, etc.¹ São portanto relevantes a existência de problemas relativos à qualidade acústica dos ambientes construídos e a conseqüente necessidade de criarem-se modelos computacionais que permitam prever o comportamento acústico das edificações². Neste sentido, faz-se sentir, em especial na última década, uma crescente pressão nos processos de projecto pela inclusão do conforto ambiental e acústico como premissa³.

Avanços têm sido obtidos em estabelecer relação entre métodos preditivos e o processo projectual, estabelecendo-se a metodologia BIM (do inglês modelagem da informação da construção) como plataforma eficaz para auxiliar na tomada de decisão⁴. No entanto, na indústria AEC (arquitetura, engenharia e construção), para projetar, analisar, manter e intervir, observa-se uma lacuna em relação à padronização de métodos e análise de resultados e à integração direta entre a análise de desempenho acústico e a metodologia BIM⁵. Neste sentido, a customização de software e a integração de análise de performance, já comum em algumas engenharias, ainda está em desenvolvimento para projectos de acústica, o que se reflete na literatura ainda a se consolidar e com resultados limitados⁶.

Nas análises acústicas, destaca-se o tempo de reverberação como um dos principais parâmetros, sendo a fórmula de Sabine um dos mais importantes métodos utilizados para a sua determinação.

1.2 Problema de pesquisa

A fórmula de Sabine implementada em modelos BIM de salas de aula universitária representa

¹ Pardo-Quiles, Rodriguez e Rodriguez-Rodriguez, (2020)

² Muhammad, Heimes e Vorländer, (2021)

³ Silva et al., (2017)

⁴ Loreto, Di et al., (2023)

⁵ Sá et al., (2022)

⁶ Tan et al., (2017)

adequadamente o tempo de reverberação de forma útil à análise projectual?

1.3 Objetivos de pesquisa

O objetivo geral deste trabalho é:

- a) Pesquisar a aplicação prática da modelagem BIM para a análise do desempenho acústico em salas de aula universitárias, por meio de estimação do tempo de reverberação;

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- i. Realizar revisão da literatura acerca da análise do desempenho acústico de salas de aula, verificando o estado da arte em relação à modelagem BIM e identificando lacunas quanto ao uso deste tipo de modelo em análises de desempenho acústico;
- ii. Apresentar os diferentes métodos de análise de desempenho acústico;
- iii. Consolidar um banco de dados a partir da literatura para alimentar e ajudar a delimitar o modelo;
- iv. Discutir a aplicabilidade da metodologia BIM quanto à análise do desempenho acústico através da implementação de estimação do tempo de reverberação com base na fórmula de Sabine;
- v. Demonstrar a aplicabilidade da metodologia BIM para melhoria do desempenho acústico de salas de aula.

2 Estado da arte | generalidades

2.1 Generalidades

As condições acústicas do espaço construído possuem impacto relevante no conforto ambiental⁷, assim como, em ambiente laboral, estão ligadas à satisfação e produtividade dos recursos humanos, e, em ambientes de ensino, à cognição dos estudantes – ou seja, de forma geral, pode-se afirmar que o desempenho acústico é importante para a performance das construções.

Além destes fatores, e tendo em atenção que as pessoas estão na maior parte do tempo dentro de ambientes construídos, a qualidade acústica também está relacionada a aspectos da saúde diretamente englobados no conforto ambiental, ou especificamente na chamada Qualidade Ambiental Interior (do inglês, IEQ)⁸.

2.2 Propriedades das ondas

2.2.1 Propriedades básicas das ondas

A considerar ondas como um fenômeno periódico de transmissão de energia, é comum estudar certas variáveis que as definem, apesar de serem tridimensionais, como determinadas segundo uma representação planificada, sendo um modelo de curva sinusóide, em função de sua simplicidade, suficiente para ilustrá-las.

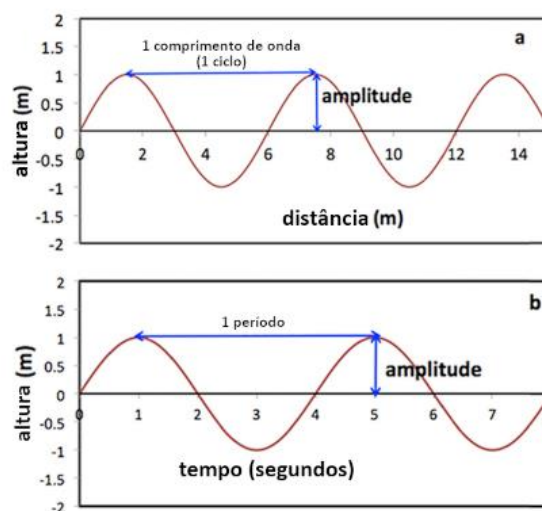
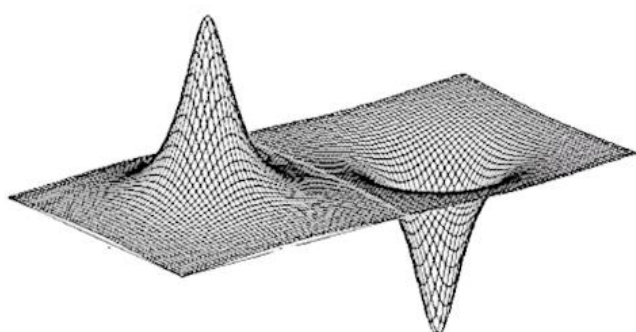


Figura 1 - características de uma onda (adaptado de Photinos, 2021).

Além das grandezas descritas na figura 1 (período T , comprimento de onda λ , amplitude A), denomina-

⁷ Chen et al., (2019)

⁸ Zhang, Mui e Wong, (2023)

se fase à distância em projeção no eixo horizontal entre um determinado ponto tomado e o início do gráfico, e denomina-se frequência ao número de oscilações em determinado intervalo de tempo (corresponde ao inverso do período e tem por unidade Hz). Importante frisar que as ondas sonoras são classificadas como ondas mecânicas, uma vez que dependem de um meio físico para se propagarem.

2.2.2 Interferência entre ondas

Ondas presentes em um mesmo meio apresentarão interação mútua, sendo interferência o encontro entre duas ou mais ondas sonoras; aplica-se a rigor o princípio da superposição, segundo o qual ocorre a soma vetorial dos deslocamentos individuais de partículas relativos a cada onda, sendo a onda resultante em geral diferente das originais; trata-se de um fenômeno no qual assumem central importância a amplitude, a frequência e a fase. É possível intensificar, atenuar ou cancelar um som, além de alterar ou enfatizar certos aspectos (e.g.: através da modulação de batimentos), em um processo que se encontra resumido de forma simplificada na figura 2⁹.

Cabe salientar que a energia incorporada em uma onda é diretamente proporcional ao quadrado de sua amplitude e ao quadrado de sua frequência angular, sendo estes parâmetros utilizáveis para distinguir entre sons suaves e mais altos (maior intensidade, portanto maior energia).

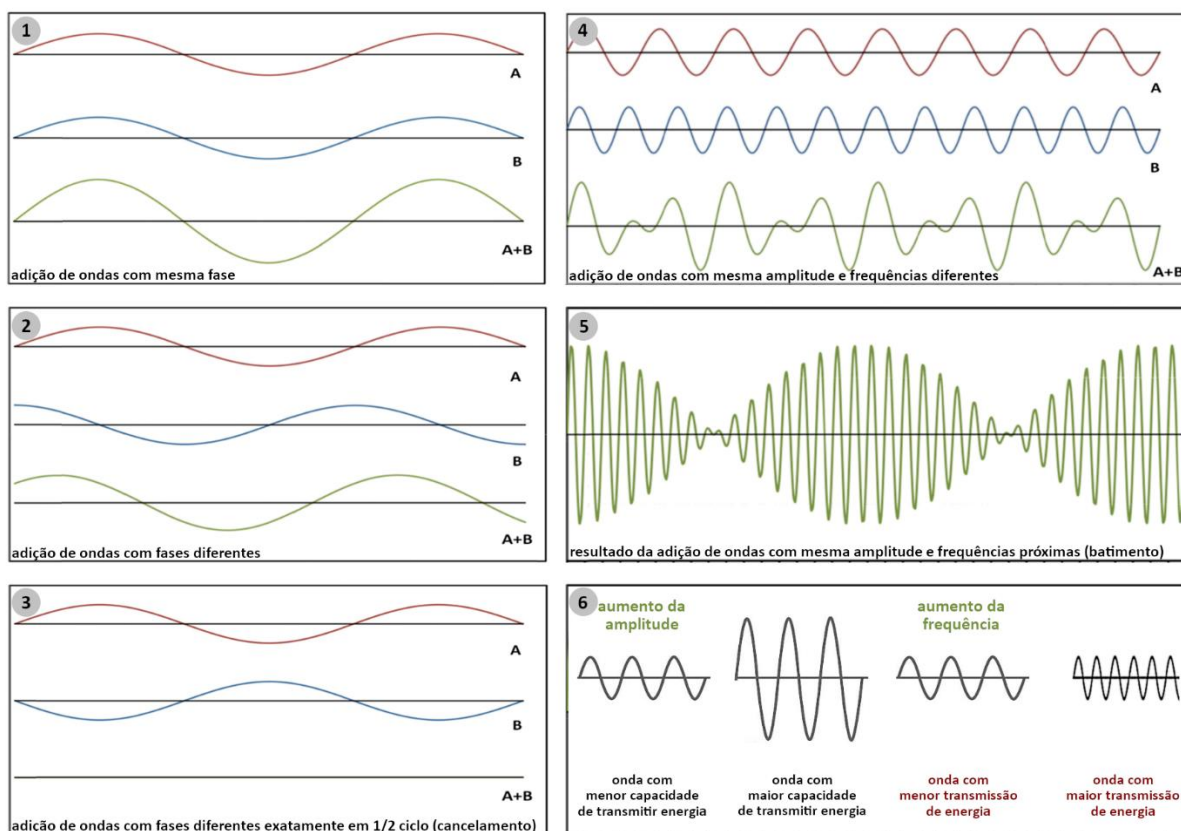


Figura 2 - interferência entre ondas (adaptado de Photinos, 2021).

⁹ Photinos, (2021)

2.3 Fundamentos do som

Define-se som como fenômeno de variação da pressão em um dado ambiente, derivada da transmissão de energia cinética mediante choque de moléculas componentes deste meio, a originar um movimento vibratório, em uma perturbação resultante que gera as referidas alterações de pressão, por sua vez captadas pelo sistema auditivo. É um fenômeno descrito por modelo ondulatório (ondas de compressão), sendo a propagação do som representada por raios, linhas normais à superfície da onda gerada¹⁰. Como onda, o som é portanto definível fundamentalmente por parâmetros como frequência, amplitude, comprimento de onda e fase, e é suscetível ao fenômeno da interferência, quando ocorrer superposição.

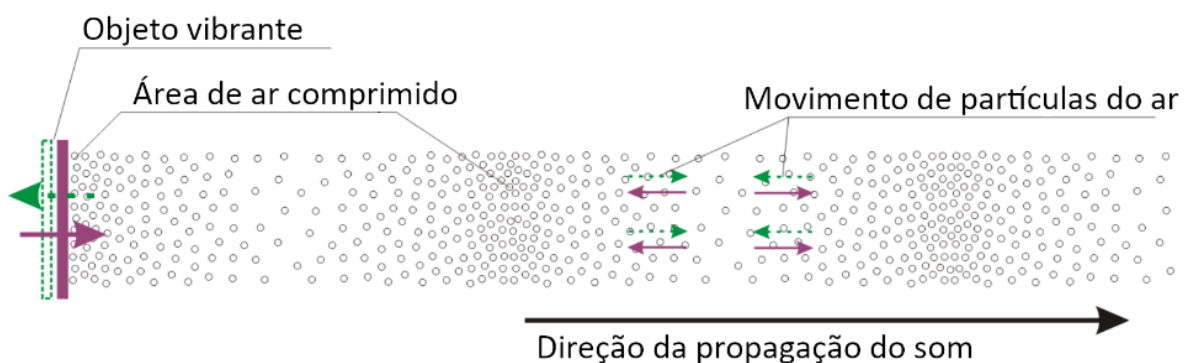


Figura 3 - o fenômeno do som no ar (Principles of assessment, ([s.d.]

No que concerne à natureza ondulatória do som, assinalam-se dois modelos matemáticos de aproximação de seu comportamento, aqui apresentados apenas conceitualmente: o som como manifestação de ondas limitadas a um plano e o som como manifestação de ondas esféricas, definidas tridimensionalmente.

O modelo de ondas planas limita-se a situações específicas, como deslocamento do som em dutos de diâmetro reduzido, nomeadamente menor que o comprimento de onda em causa¹¹; pode ser simulado mediante o uso de um diapasão (que gera ondas sonoras pela alternância entre compressão e rarefação do ar circundante) como visto na figura 4; ao vibrar de forma periódica com velocidade constante, estabelece um movimento harmônico, tendo por curva representativa uma senóide, cuja constância implica em ausência de dissipação energética.

O modelo de ondas esféricas, por sua vez, considera que a frente de onda – pontos em mesma fase de onda – conforma uma calota esférica pulsante (ao contrário do modelo anterior, que a considera um plano). Neste caso, considera-se que a amplitude diminui com o aumento da distância da fonte sonora

¹⁰ Patrício, (2018)

¹¹ Bistafa, (2011)

(raio da esfera), o que incorre em dissipação energética.

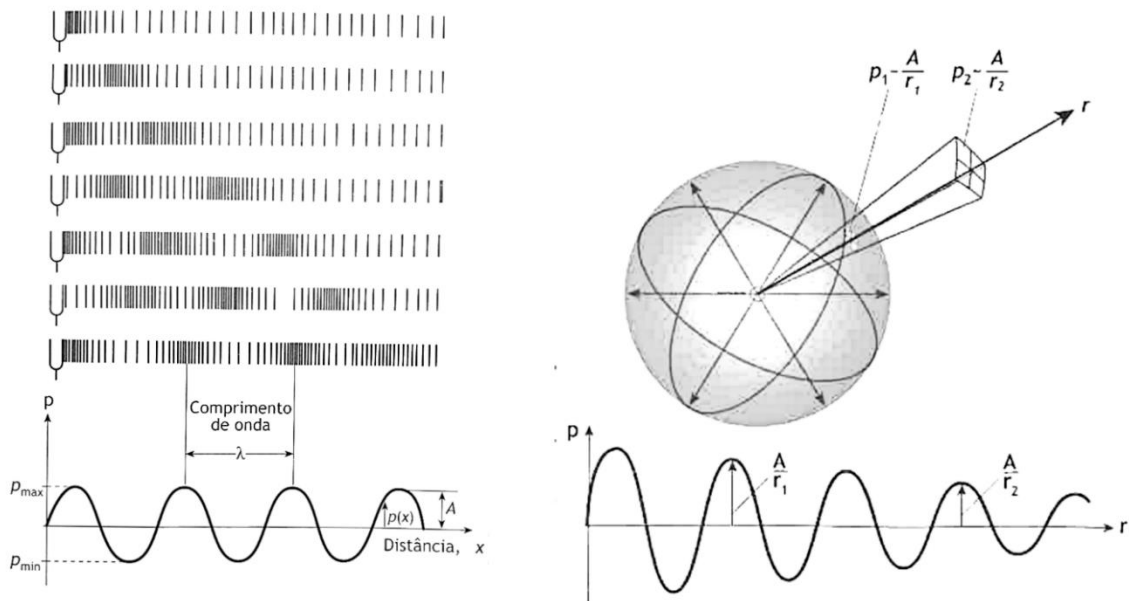


Figura 4 - modelos de ondas plana e esférica (adaptada de Bistafa, 2011).

Na região próxima da fonte sonora, o som propaga-se de forma esférica, comportando-se como uma esfera pulsante, que gera frentes de onda em várias direções. No entanto, como ilustra a figura 5, ao analisarem-se as ondas sonoras em regiões distantes da fonte sonora, pode-se simplificar o modelo, uma vez que as frentes de onda comportam-se segundo uma propagação linear. Esta simplificação dá origem a alguns modelos utilizados, definidos segundo “raios”, em inglês os “*ray tracing models*”¹².

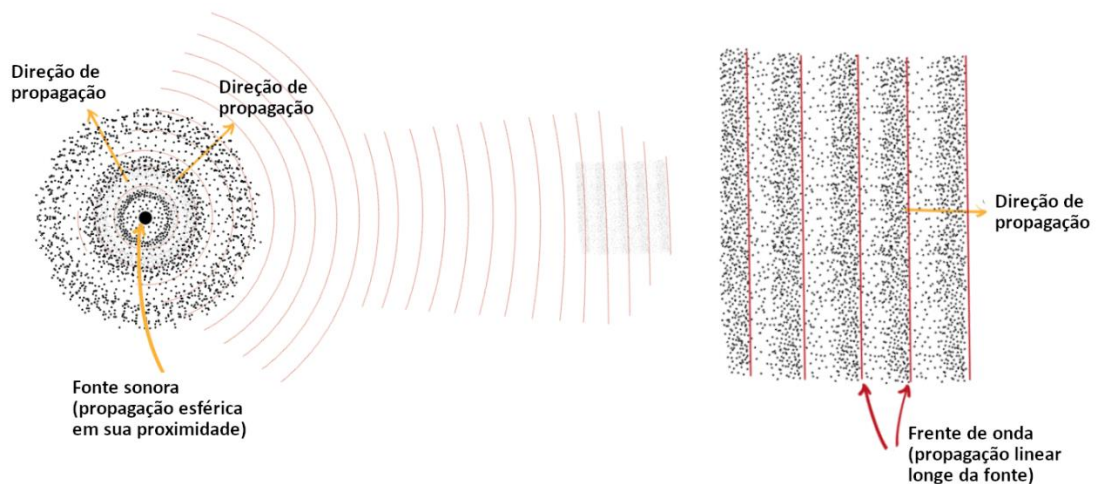


Figura 5 - comportamento das ondas sonoras (adaptado de Crescendo, (2024)).

¹² Pardo-Quiles, Rodriguez e Rodriguez-Rodriguez, (2020)

2.3.1 Variáveis fundamentais

É importante estabelecer, sobre o fenômeno sonoro, algumas variáveis importantes a serem utilizadas:

- a) Pressão sonora: correntemente mensurada em Pascal (Pa), está relacionada à percepção subjetiva do som, em sua intensidade. Sendo o meio o ar, pode ser medida diretamente com um microfone.
- b) Variação da pressão: a considerar-se o principal meio como o ar, tem-se que o ouvido humano é capaz de detetar sons referentes a variações dentro do intervalo compreendido entre 0,00002 Pa (denominado limiar da audição) e 20 Pa (denominado limiar da dor), definindo larga abrangência, que dificulta cálculos diretos.
- c) Frequência sonora: grandeza advinda da natureza ondulatória do som, é uma das formas de diferenciar-se uma fonte sonora. No caso humano, e sendo o meio o ar, a captação sonora ocorre em frequências situadas no intervalo entre 20Hz a 20kHz, estando portanto os infrassons e ultrassons definidos pelas ondas sonoras que extrapolam tais limites médios. Esta gama audível é por sua vez dividida em dez oitavas (intervalo obtido ao estabelecerem-se os valores da frequência do som nos valores extremos como possuindo a razão 2:1, ou seja, a maior frequência é o dobro da menor). A identificação de tais intervalos ocorre pela frequência central nominal da banda obtida¹³. Especificamente na acústica de edifícios, por sua vez, o espectro de interesse situa-se comumente entre 100Hz e 5kHz.
- d) Potência sonora: parâmetro que caracteriza a onda sonora, trata-se da medida da energia associada ao fenômeno sonoro, por unidade de tempo (em geral mensurada em Watt), a indicar a capacidade de uma fonte sonora em gerar som. No caso do modelo de ondas esféricas, é regida pela lei do inverso do quadrado da distância;
- e) Intensidade sonora: valor médio, por tempo, da transmissão de energia sonora ocorrida através de uma unidade de superfície de referência, com orientação normal à direção de propagação da onda (em geral mensurada em Watt/m²). Relaciona-se, portanto, diretamente com a potência sonora;

¹³ Patrício, (2018)

f) Nível de pressão sonora: desenvolvido de forma a exprimir de forma objetiva a percepção da intensidade sonora pelo sistema auditivo humano, consiste na comparação entre pressões sonoras distintas. De forma a corrigir a dificuldade inerente ao largo intervalo de pressões sonoras audíveis, utiliza-se aqui uma relação logarítmica – a unidade primordial de medida é o bel, sendo no entanto mais utilizado seu décimo, o decibel (dB), definido como a mínima variação de pressão sonora detetável pelo sistema auditivo humano¹⁴; na verdade, no entanto, utiliza-se a rigor uma forma corrigida do decibel, ajustada de acordo com a sensibilidade da acústica humana. A correção é executada segundo a “curva A”¹⁵, resultando portanto o “decibel A”, dB(A)¹⁶, como ilustrado na figura 6.

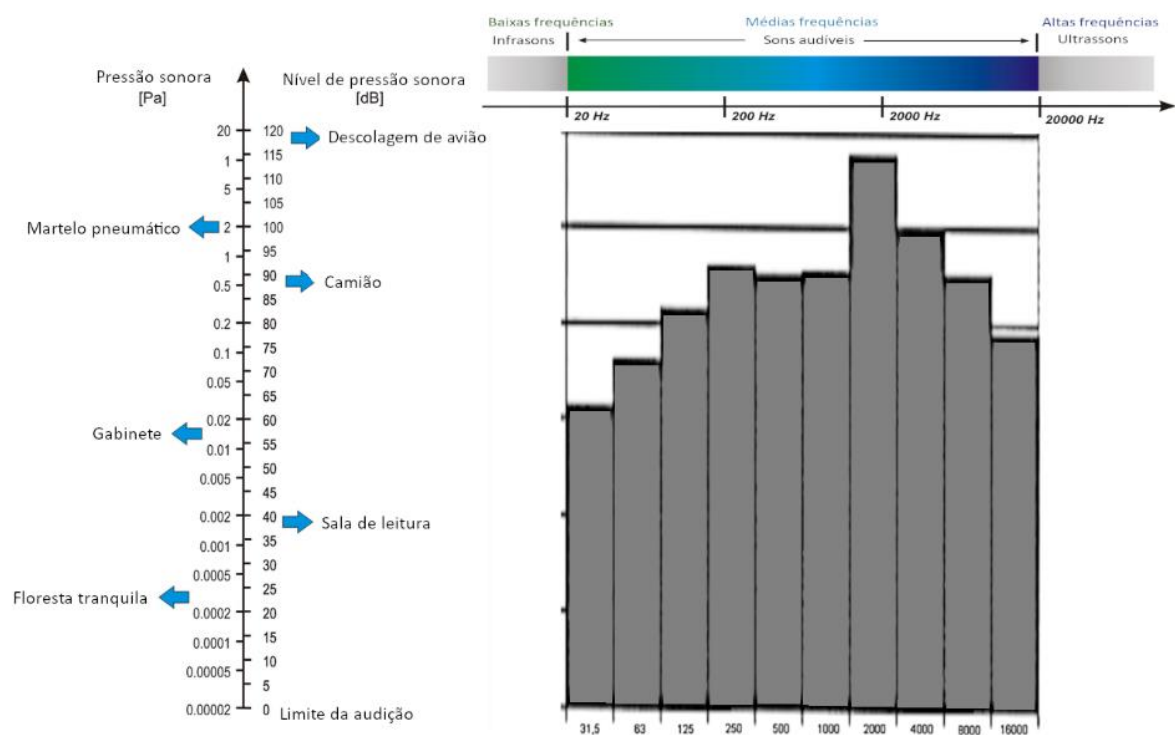


Figura 6 - relação entre pressão sonora, nível de pressão sonora, frequência sonora e oitavas (adaptada de CIOP - Central Institute for Labour Protection, ([s.d.])).

2.3.2 A escala decibel

A escala decibel é uma escala logarítmica utilizada para comparar, entre outras grandezas, intensidades sonoras (e.g.: I_1 e I_2) – no entanto, uma vez que a pressão sonora é uma variável mais relevante que a intensidade sonora, é oportuno relacioná-las (para pressões p_1 e p_2):

$$N = 10 \log(I_2/I_1) = 10 \log(p_2/p_1)^2 = 20 \log(p_2/p_1) \quad (1)$$

¹⁴ Bistafa, (2011)

¹⁵ Redon, ([s.d.])

¹⁶ APA, ([s.d.])

Da equação, define-se portanto um decibel como a diferença da sensação auditiva percebida pelo sistema auditivo humano, quando a intensidade do som aumenta 26%. A acuidade auditiva humana permite a detecção de variações de 0,5 dB¹⁷.

Tabela 1 - funcionamento da escala decibel (Peters, Smith e Hollins, 2013)

ratio de Intensidades Sonoras (I_2/I_1)	Diferença no Nível de Intensidade Sonora
1	0 dB
2	3 dB
3	4.8 ≈ 5 dB
4	6 dB
5	7 dB
6	7.8 ≈ 8 dB
7	8.5 dB
8	9 dB
9	9.5 dB
10 = 10¹	10 dB
100 = 10²	20 dB
1000 = 10³	30 dB
10000 = 10⁴	40 dB
100000 = 10⁵	50 dB
1000000 = 10⁶	60 dB

Da tabela 1, depende-se que podem-se realizar operações entre as colunas, como calcular o *ratio* correspondente a uma diferença de 19 dB (10 + 9), por exemplo, que é 80 (10x8).

Além da conveniência de sua amplitude e dos valores em si, que permitem operações simplificadas (embora por vezes contraintuitivas, como ao dobrar-se a intensidade sonora em um ambiente, que corresponde a somar 3dB ao seu nível de intensidade sonora, como em 60 dB + 3dB = 63dB), a escala decibel é utilizada por ser também a percepção auditiva humana um fenômeno exprimível em escala logarítmica¹⁸.

Por outro lado, em função da relação quadrática entre a intensidade sonora e a amplitude das ondas, ao tomar-se um exemplo de superposição com interferência construtiva e somarem-se duas ondas coerentes, ou seja, com mesma fase e frequência, o acréscimo será de 6 dB, e não de 3 dB¹⁹.

¹⁷ Costa, (2003)

¹⁸ Peters, Smith e Hollins, (2013)

¹⁹ Vorländer, (2020)

2.4 O sistema auditivo

O sistema auditivo humano divide-se em: ouvido externo, médio e interno, e conexão com o cérebro.

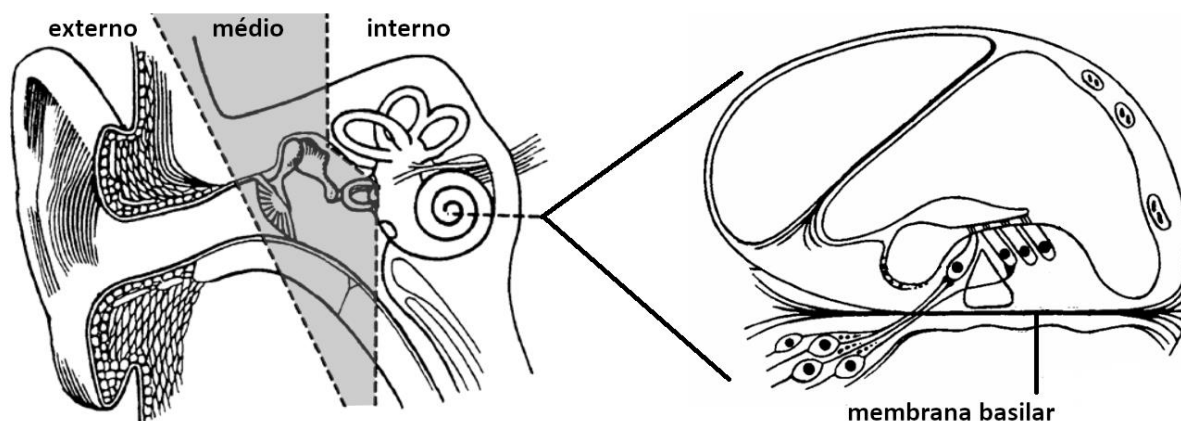


Figura 7 - sistema auditivo humano (adaptado de Jacobsen et al., 2008).

A geração e recepção do som segue uma sequência lógica, definida por:

- geração do som;
- propagação e recepção pelo ouvido externo, levando às estruturas vibratórias no ouvido médio;
- transmissão das vibrações ao ouvido interno, mediante a membrana basilar na cóclea;
- codificação do som e sua transmissão ao sistema nervoso central²⁰.

Ter-se-á como foco, a favor da didática, o ouvido interno: estrutura espiral helicoidal, abriga uma estrutura específica, a membrana basilar, que atua como um analisador de frequência: uma vez exposto o ouvido a um som, esta membrana mover-se-á segundo um padrão, cuja posição na membrana (definida em relação a uma estrutura particular, a janela oval) é específica para cada frequência sonora captada. Há, portanto, diferenciação dos sons e diferença na sua captação e conseqüente percepção²¹.

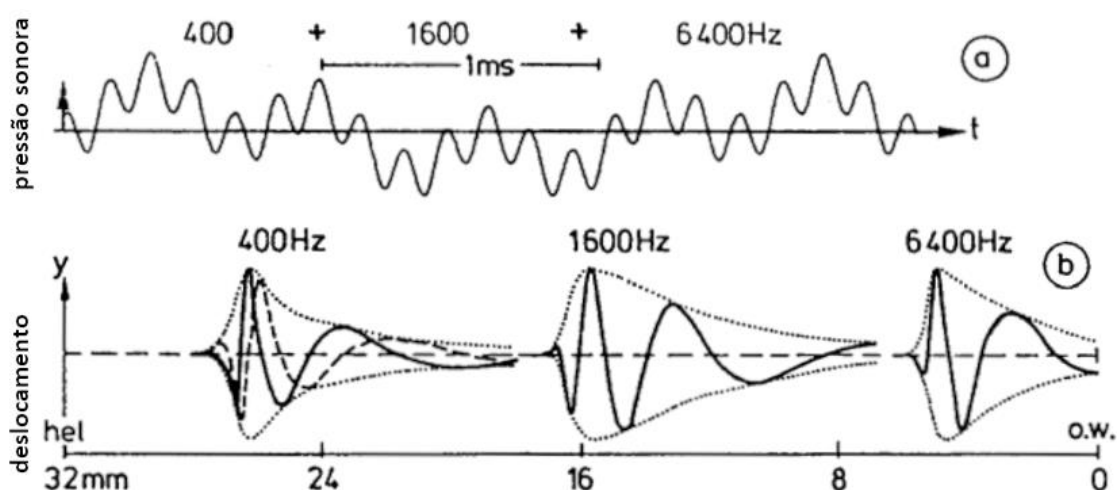


Figura 8 - movimento da membrana basilar(Jacobsen et al., 2008).

²⁰ Bistafa, (2011)

²¹ Jacobsen et al., (2008)

2.5 Percepção do som

2.5.1 Conceitos e termos relevantes

Além das variáveis, e de forma a dar-lhes significado prático, definem-se os seguintes conceitos:

- a) Nível de audibilidade: medida aproximada de mensuração da intensidade dos sons, tenta levar em consideração sua subjetividade. Possui como referencial o nível sonoro de 1000Hz, a partir do qual traçaram-se curvas isotônicas (de igual nível de audibilidade), e sua unidade é o *fone*.

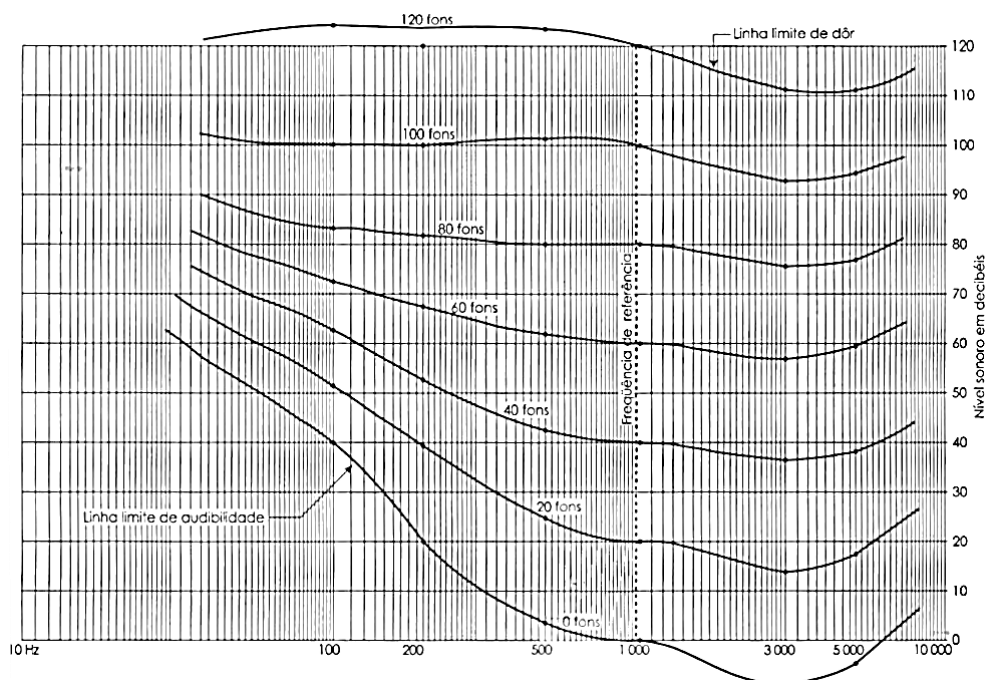


Figura 9 - curvas isotônicas ou curvas de Fletcher-Munson (Costa, 2003).

- b) Inteligibilidade de fala: medida da efetividade da compreensão do discurso, pode ser determinada de forma subjetiva, com grupos de pessoas, ou de forma preditiva, baseada em parâmetros físicos, ou ainda de forma objetiva, através da mensuração em testes.
- c) Índice de transmissão de fala (do inglês STI): medida objetiva da inteligibilidade de fala, avalia, para certas bandas de frequência, a *ratio* sinal-ruído, referente a sinal de frequência modulada correspondente à voz (podem-se testar até 14 sinais em até 7 bandas de oitava). O cálculo leva em consideração, entre outros fatores, a reverberação – seus valores variam de 0 a 1²².

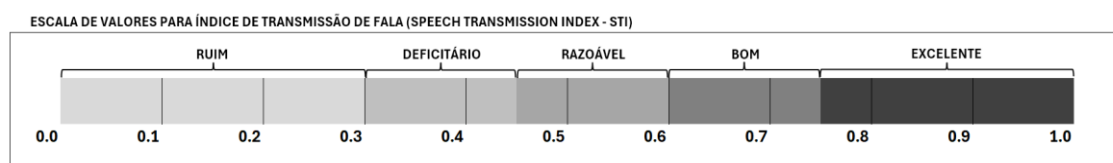


Figura 10 - valores assumidos por STI e seu significado.

²² Steeneken e Houtgast, (2002)

2.5.2 Curvas de ponderação

A audição humana é definida por limites: desde o limite ou limiar absoluto, menor nível de energia capaz de sensibilizar o sistema auditivo e ser compreendido como som, até o limiar de dor, maior nível de energia, para além do qual há degradação física do sistema auditivo.

No entanto, como exposto anteriormente, entre os valores limiares da percepção humana aos sons a receção de sons não se dá de forma homogênea – apresenta variação, sendo necessário adequar as leituras mediante ponderação que corresponda à sensibilidade, de forma a assegurar que o som seja classificado dentro de um intervalo tido como aceitável²³.

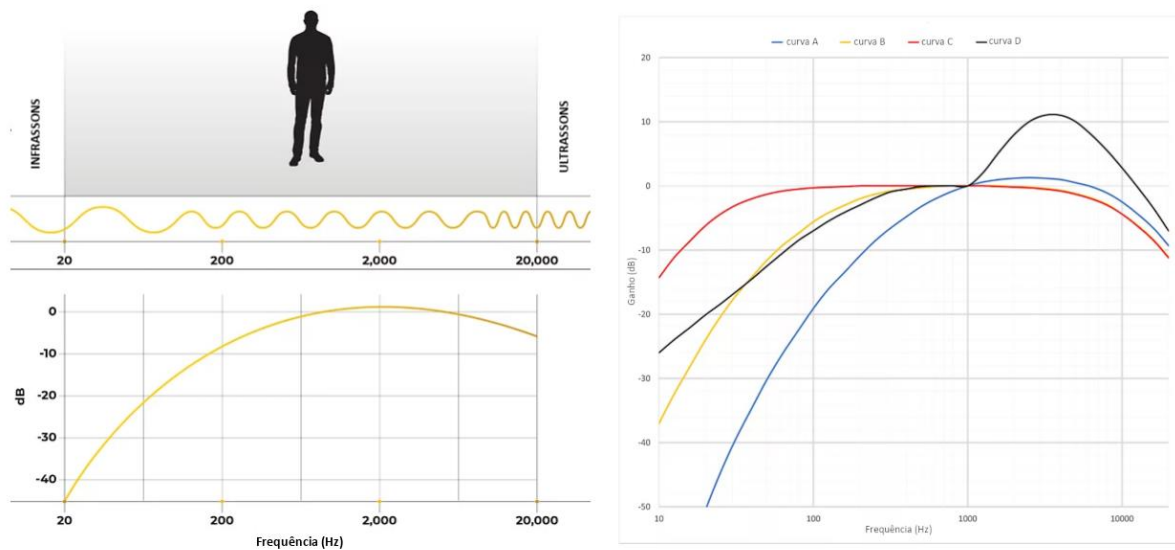


Figura 11 - curvas de ponderação (adaptado de Ansys, [s.d.]

Estabeleceram-se portanto filtros, graficamente expressos por curvas de ponderação²⁴ (ver figura 11):

- Curva A: retrata a sensibilidade humana, usa-se para avaliar acústica ambiente e é dela extraída a escala medida em dB(A);
- Curva B: corresponde a sons razoavelmente altos, usa-se para medir ruído interior de veículos;
- Curva C: corresponde a sons muito altos, usa-se para medir ruído de banda larga;
- Curva D: usa-se para medir ruído de aeronaves;
- Curva G: usa-se para medir ruídos na faixa de infra-som.

2.6 Fenômenos ondulatórios do som

As ondas sonoras comportam-se de formas diferentes de acordo com os materiais com os quais entram em contacto, sendo alguns dos principais comportamentos estudados, no contexto da atenuação sonora

²³ Carvalho, (2015)

²⁴ Redon, ([s.d.]

e melhoria da acústica dos ambientes construídos, explicados a seguir.

2.6.1 Reflexão sonora

Ao chocar-se com uma superfície física de massa significativa, que resiste ao impacto, a onda sonora sofre uma reação física, sendo projetada de volta, no fenômeno ao qual chamamos reflexão, similar a um ricochete; em condições ideais, nas quais este fenômeno denomina-se reflexão especular, o ângulo de entrada da onda incidente é igual ao ângulo de saída da onda refletida – caso contrário, face a superfícies irregulares, por exemplo, o ângulo pode variar bastante, a caracterizar-se então a reflexão difusa.

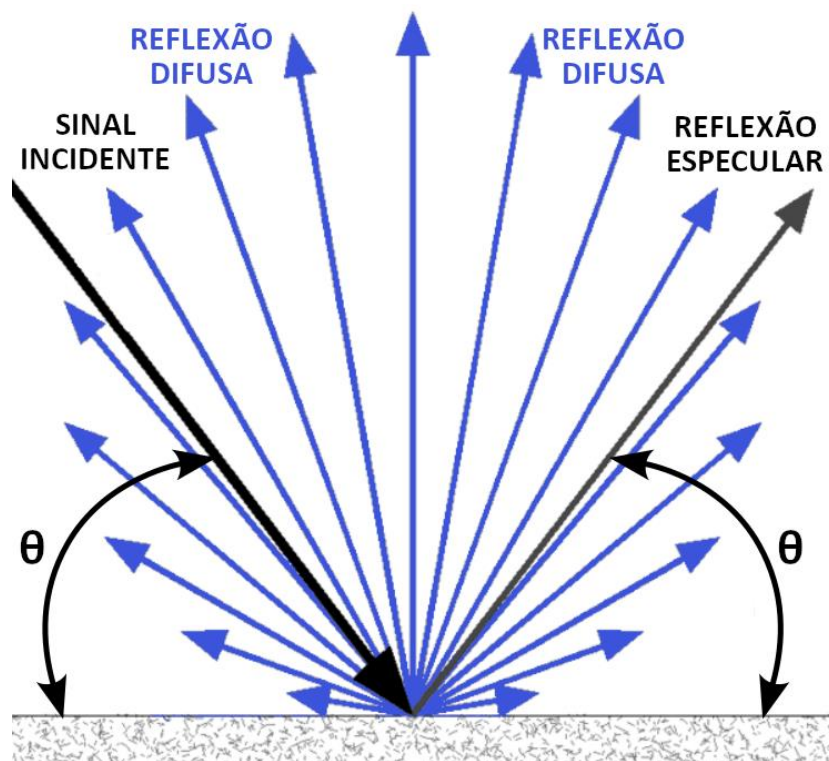


Figura 12 - fenômeno da reflexão sonora (adaptado de Gianni, 2010).

Trata-se de considerar o comportamento da onda sonora, aqui definida como um raio, similar ao da luz. Ocorre tipicamente em superfícies lisas e rígidas, como paredes de tijolos ou lajes de betão, e a onda refletida pode gerar um eco ou uma reverberação, a depender da distância do emissor à superfície, entre outros fatores.

2.6.2 Difusão sonora

Ao atingir uma superfície irregular ou não rígida, como espuma ou carpete, as ondas sonoras são dispersadas, distribuindo-se de forma irregular, tendo seu padrão vibratório alterado e diminuído, e por consequência dissipando parte de sua energia cinética no processo. O coeficiente de difusão é um

parâmetro que quantifica este fenômeno de forma individualizada para cada material, levando em consideração a direção da reflexão difusa; seu valor varia de 0 (menos dispersão do som ocorre, sendo ele refletido em uma mesma direção) a 1 (maior dispersão do som ocorre, reduzindo-se eco e reverberação, por exemplo). Sua obtenção dá-se segundo a norma AES-4id-2001(s2008). É possível, também, a ocorrência de difusão em certas superfícies lisas, que apresentem absorção sonora variável, como painéis difusores de Schoeder²⁵.

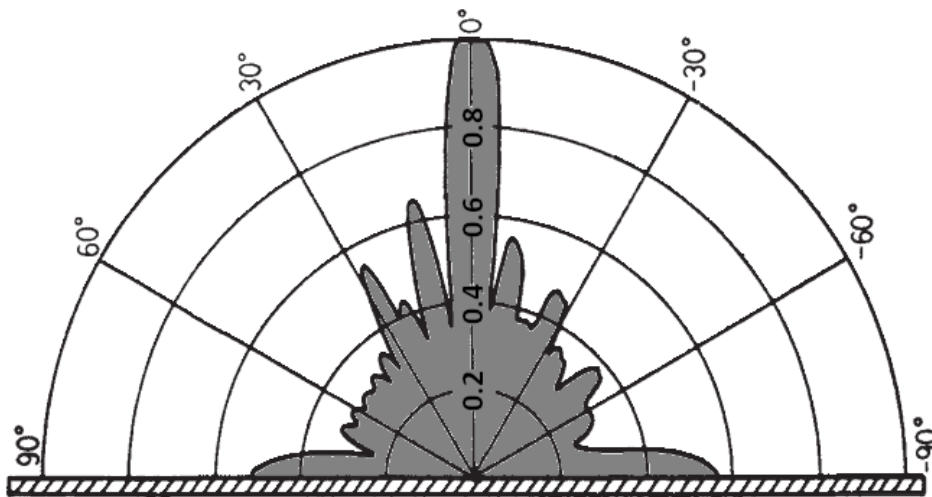


Figura 13 - distribuição direcional de som após dispersão (Kuttruff, 2000).

2.6.3 Espalhamento sonoro

Na reflexão difusa, quando as irregularidades da superfície são de ordem de grandeza maior que o comprimento da onda sonora, esta é refletida em todas as direções, de forma a causar o seu espalhamento. Tal fenômeno pode ser expresso pelo coeficiente de espalhamento, que expressa a quantidade de energia sonora espalhada (*ratio* entre energia refletida de forma não especular e o total de energia refletida), sem no entanto referenciar sua direção. Sua obtenção dá-se segundo a norma ISO 17497-1(2004)²⁶.

2.6.4 Absorção sonora

A energia cinética de uma onda sonora que se dissipa ao chocar-se com uma superfície é na verdade transformada em uma pequena quantidade de energia térmica, absorvida pelo meio envolvente e pela

²⁵ Patrício, (2018)

²⁶ Ramires, (2011)

superfície. Há, portanto, absorção da energia da onda, que pode ser maior ou menor a depender do material com o qual se choca. O coeficiente de absorção sonora, α , é um parâmetro que quantifica este fenômeno de forma individualizada para cada material; seu valor *a priori* varia de 0 (nenhuma absorção ocorre) a 1 (o som incidente é completamente absorvido, perdendo a totalidade de sua energia) e sua determinação envolve o uso de uma curva de referência e posterior ponderação, classificando-se os materiais em classes de A (máxima absorção) a F (reflexão)²⁷. Este fenômeno pode, ainda, ser afetado pela humidade e temperaturas ambientes. Assim como a difusão, a absorção sonora é um parâmetro utilizável na melhoria das características acústicas de ambientes construídos, com recursos como sistemas ressonantes (painéis ressonantes e ressoadores de Helmholtz)²⁸.

2.6.5 Transmissão sonora

Ocorre quando há transferência de ondas sonoras de um material a outro, ou de um material a outro meio, como visto na figura 14. Depende, por sua vez, da impedância dos materiais envolvidos (oposição que oferecem à passagem de ondas sonoras, combinação de sua capacidade de dissipação acústica e sua capacidade de armazenar energia acústica)²⁹.

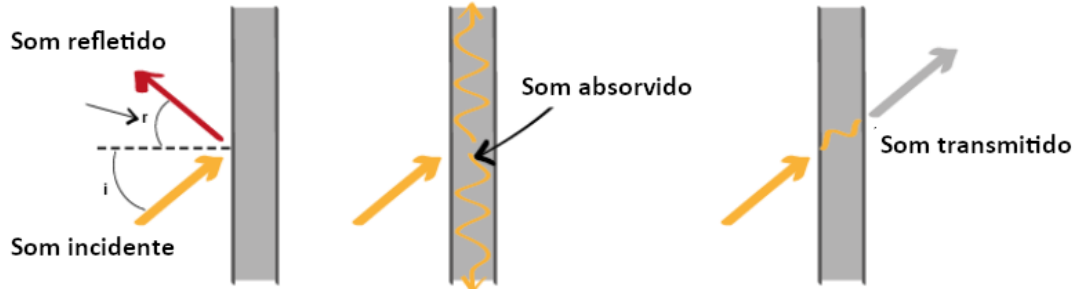


Figura 14 - fenômenos de interação do som com materiais(Crescendo, 2024).

2.6.6 Difração sonora

Refere-se também à interação entre ondas e objetos rígidos, que podem por elas ser contornados, estando, entre outros fatores, relacionada diretamente à eficácia de barreiras acústicas. Define-se pela relação entre a dimensão do obstáculo (D) e o comprimento de onda do som (λ) – a depender da relação, bem como do obstáculo ser inerte ou ele próprio vibrar, as ondas sonoras podem ou não contorná-lo³⁰.

²⁷ International Organization for Standardization (ISO), (1997)

²⁸ Patrício, (2018)

²⁹ VRASQA, (2021)

³⁰ Peters, Smith e Hollins, (2013)

É observado em frestas de janelas, nas quais o som oriundo do exterior propaga-se uniformemente em todas as direções, a partir do outro lado da abertura (ambiente interno)³¹.

2.7 Som e ruído

A análise harmônica³² permite a distinção entre sons, considerados mais agradáveis e compostos pela superposição de uma nota fundamental e suas harmônicas de ordens diversas, e entre ruídos, cujos componentes possuem frequências diferentes entre si, em um conjunto que se mostra tão mais desagradável quanto maior for seu número e maior for tal dissonância, como mostra a figura 15.

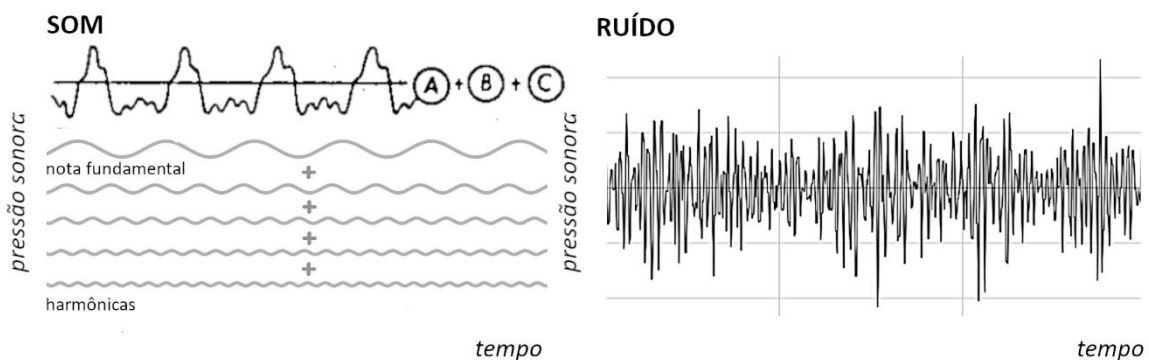


Figura 15 - distinção entre som e ruído (adaptado de Amaral, 1968)

É importante assinalar-se o caráter subjetivo da distinção entre som e ruído; este último por vezes pode ter sua leitura espectral de difícil distinção de uma música, por exemplo³³. O estudo e classificação de ruídos advém também de fatores pragmáticos, pois eles estão entre os principais fatores de degradação da qualidade acústica de espaços construídos, nomeadamente ambientes de aprendizado³⁴.

Ruídos podem ser classificados por sua origem, em naturais e artificiais. A adotar-se o conceito de ruído como um sinal que se configura em interferência a diminuir a inteligibilidade de uma informação, pode-se chegar à conclusão de tratar-se este de um fenômeno acústico danoso e indesejado; tal interpretação no entanto não é de todo verdadeira, e analisá-lo como uma manifestação ondulatória e em termos de seu caráter estocástico é mais útil.

Em ambientes de aprendizado como salas de aula, a presença de condições acústicas adversas, entre as quais destacam-se em relevância os ruídos, exige maior esforço por parte dos alunos, a comprometer sua performance, bem como a dos professores³⁵.

³¹ Costa, (2003)

³² Amaral, (1968)

³³ Bobran e Bobran, (1990)

³⁴ Lubisich Nelson et al., (2008)

³⁵ Mogas Recalde, Palau e Márquez, (2021)

Tabela 2 - classificação dos ruídos consoante sua origem (Noceti Filho, 2018)

Origem	Tipos de ruídos	Tipos de sinais
Artificiais	Ruídos de Interferência	Aleatórios ou determinísticos
Naturais	Ruído galáctico Ruído atmosférico Ruídos inerentes a elementos passivos e ativos	Aleatórios

2.7.1 Ruídos segundo sua transmissão

Em acústica aplicada às edificações, distinguem-se os ruídos entre os de condução aérea, em que o meio de transmissão das ondas sonoras é apenas o ar, desde a fonte sonora até o recetor – o que implica que, ao atingirem uma superfície, tais sons terão parcelas de sua energia divididas entre aquelas que são absorvidas, as que são refletidas e as que são transmitidas a espaços contíguos. Outra categoria é a dos chamados sons de percussão, nos quais há solicitação mecânica, quando da produção do som, sobre os componentes físicos da edificação, que atuarão também como meio, transmitindo o som aos demais elementos construtivos a que estejam ligados. Distinguem-se portanto ruídos de vozes (aéreos), por exemplo, de ruídos ocasionados pelo bater de portas (percussão), como mostra a figura 16.

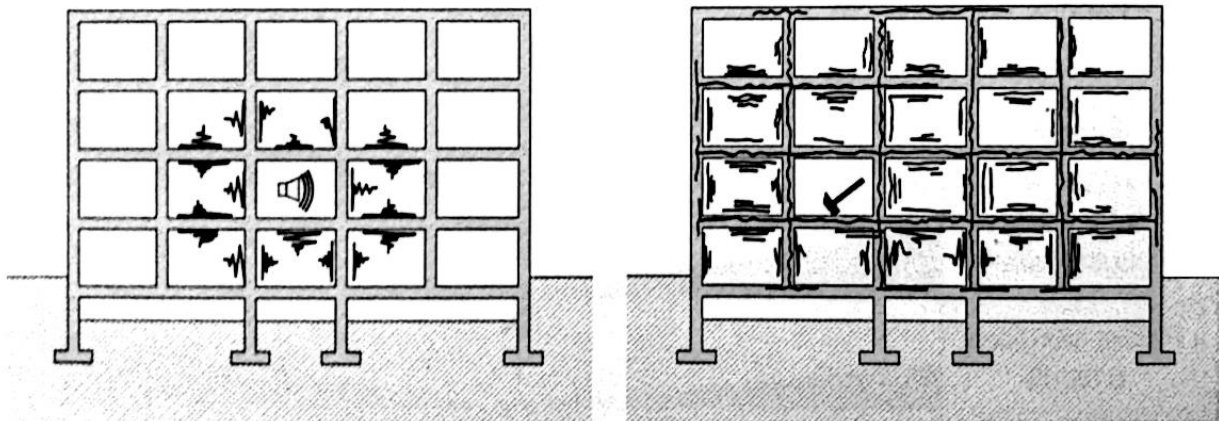


Figura 16 - transmissão de ruídos aéreos e de percussão (Freitas, (2012)

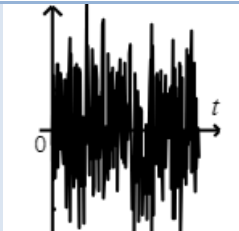
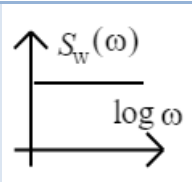
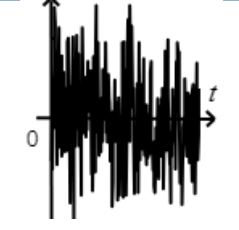
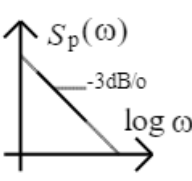
A transmissão de ambos os ruídos pode dar-se por via direta ou por transmissão marginal, sendo a aérea medida em decibéis, enquanto a mensuração dos ruídos de percussão pode dar-se *in situ* ou experimentalmente, alternativa na qual não se contabiliza a transmissão marginal, ou ainda, mediante modelos preditivos³⁶.

³⁶ Carvalho, (2015)

2.7.2 Ruídos segundo a distribuição de suas frequências

Utilizando o conceito de sinestesia³⁷, cores (eg.: marrom, cinza, azul) são associadas a alguns tipos de ruídos de acordo com a distribuição de suas frequências, sendo do interesse deste trabalho os assim chamados ruído branco e ruído rosa; ambos não podem ser caracterizados em função do tempo, portanto, mas sim pela frequência, e ocorrem ao longo de toda as frequências audíveis (entre 20Hz e 20kHz). Diferenciam-se na forma desta distribuição, homogênea no ruído branco (analogamente ao espectro de luz branca); já o ruído rosa, por ter densidade espectral de potência proporcional ao inverso da frequência, apresenta maior potência em frequências baixas (na mesma analogia, corresponde a uma maior presença do espectro de luz vermelha), e se apresenta como mais grave³⁸. Ruídos brancos apresentam a mesma energia em todas as frequências, enquanto que ruídos rosa têm energia igual por oitava, e sua intensidade sonora decai à taxa aproximada de 3dB por oitava.

Tabela 3 - características dos sinais de ruídos branco e rosa (*) a forma de onda corresponde à função Densidade Espectral de Potência (adaptada de Noceti Filho, 2018).

Sinais	Forma da função no tempo (para $t \geq 0$) (*)	Forma da função na frequência (para $\omega \geq 0$)	Bandas ou frequência de medida
Ruído Branco			Bandas de largura constante
Ruído Rosa			Bandas de largura variável, por exemplo (1/3) de oitava

2.7.3 Tipos de ruído – classificação geral

Por fim, de acordo com aspetos práticos, classificam-se ainda os sons e ruídos em³⁹:

- Som direto: chega diretamente ao recetor de uma fonte, sem sofrer reflexão;
- Som ambiente: composição do som advindo de várias fontes próximas e distantes associadas a um determinado ambiente construído;

³⁷ Rosenhouse, (2012)

³⁸ Noceti Filho, (2018)

³⁹ Grosveld, (2015)

- c) Ruído de fundo: ruído de todas as fontes não relacionadas a um som específico que seja o foco de estudo em um dado espaço;
- d) Som difuso – Som em um ambiente cuja intensidade é a mesma em todas as direções e em todos os pontos.

2.7.4 Aplicação

Em acústica de edificações, podem-se utilizar equipamentos denominados geradores de ruídos para variadas finalidades:

- a) Mascaramento de sinais: situação na qual a introdução de um ruído no sistema tem por objetivo diminuir a inteligibilidade de sons ou ruídos indesejáveis (como a fala em determinados gabinetes, ou ruídos de equipamentos); paradoxalmente, o aumento dos ruídos cria a ilusão de sua diminuição, a iludir a audição humana portanto. Define-se um limite específico para o mascaramento, alternativa ao limite absoluto. Embora o ruído branco seja amplamente usado no mascaramento, não são sinônimos, sendo outros ruídos usados para este fim.
- b) Medidas de áudio em ambientes: o ruído rosa, em função de sua distribuição de frequências em oitavas, aproxima-se razoavelmente da percepção sonora por nosso sistema auditivo, motivo pelo qual é usado para testar a performance acústica de espaços construídos, a simular sons ambientes⁴⁰.
- c) Testes de equipamento: o ruído branco é usado para testar a sensibilidade de microfones em frequências específicas⁴¹, ao passo que o ruído rosa testa a efetividade em cancelamento de ruído de fundo de um determinado equipamento⁴².

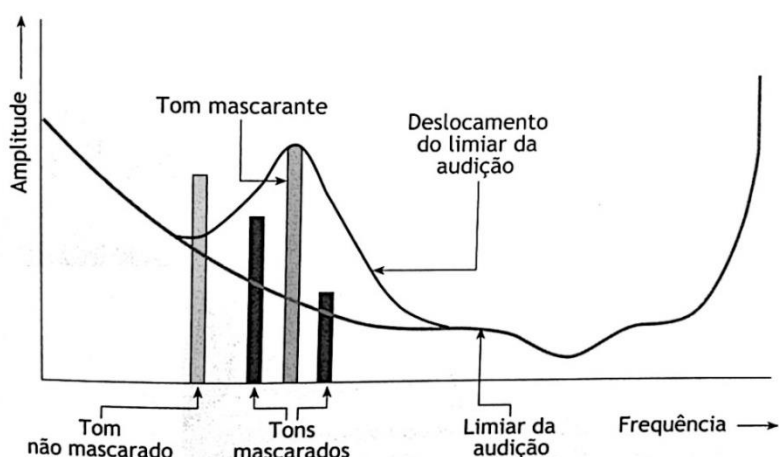


Figura 17 - mecanismo de mascaramento ilustrado pela introdução de um tom puro (Bistafa, 2011).

⁴⁰ Rosenhouse, (2012)

⁴¹ Electronics, ([s.d.])

⁴² Electronics, ([s.d.])

2.8 Tempo de Reverberação

2.8.1 O fenômeno da reverberação

Um som emitido dentro de um ambiente fechado sofre reflexão ao atingir superfícies como paredes e pisos, por exemplo. Esta reflexão causa, para o recetor, uma percepção de ter este som uma maior duração, persistindo e ressoando depois da interrupção da fonte sonora⁴³, o que gera interferência na compreensão da informação. Uma reverberação é percebida quando a onda sonora refletida atinge o recetor em menos de 0,1 segundo após a onda sonora original – tempos maiores são em geral percebidos como ecos e associados a superfícies mais distantes que as de ambientes internos médios ou pequenos.

Denomina-se portanto reverberação ao fenômeno de percepção sonora direta simultaneamente à percepção de reflexões sonoras tardias e repetidas, determinando o decaimento de uma transmissão sonora. Esse decaimento, uma vez medido em função do tempo, pode a princípio mostrar-se graficamente linear – porém, por tratar-se o nível sonoro de uma medida em decibéis, portanto em escala logarítmica, tem-se que a taxa de decaimento é de facto exponencial.

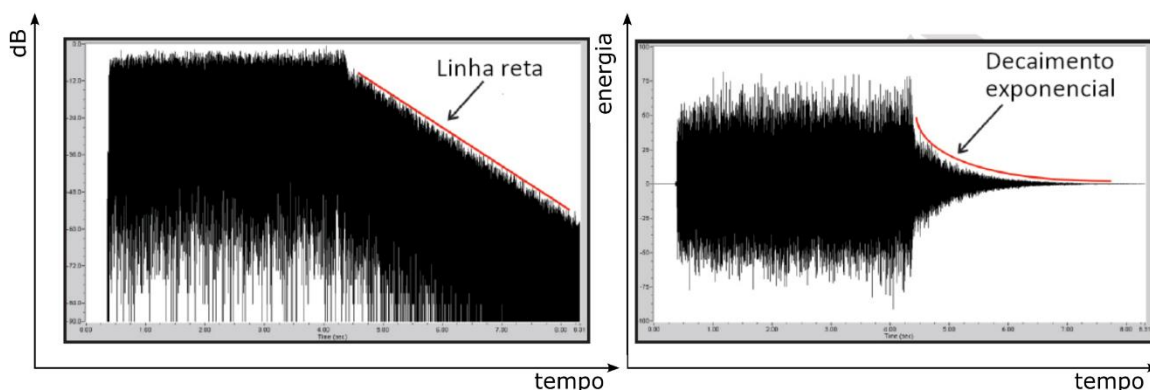


Figura 18 - decaimento exponencial da energia sonora devido à reverberação (adaptado de Brown e Mapp, (2010))

A posição de audição, ou seja, o ponto no ambiente em que o recetor está localizado em relação ao emissor e aos obstáculos refletores, pode ter portanto sua qualidade acústica avaliada levando-se em consideração a relação entre as energias do som direto e de suas reflexões iniciais e tardias⁴⁴. Também são importantes na reverberação o volume do ambiente, a posição relativa de suas superfícies refletoras (sua geometria portanto) e o comportamento acústico dos materiais que o compõem (quanto à reflexão e absorção do som).

A reflexão sonora, no entanto, não é necessariamente deletéria à qualidade acústica de um ambiente

⁴³ Grosveld, (2015)

⁴⁴BAUNETZWISSEN, ([s.d.])

construído; se, por um lado, reverberação excessiva interfere com a comunicação oral, afetando o aprendizado em salas de aula⁴⁵, por outro lado reflexões que atinjam o ouvinte rapidamente, em cerca de 40 ms desde a emissão do som, não serão percebidas como interferências, mas como amplificações do sinal original, a contribuir para a inteligibilidade; por outro lado, uma total ausência de reflexões causaria uma diminuição excessiva do sinal emitido, o que gera desconforto – além disso, na ausência de reverberação, o ruído de fundo atua de forma a reduzir a inteligibilidade⁴⁶. É importante, portanto, mensurar e controlar o tempo do processo de reverberação, que se configura em parâmetro largamente utilizado para analisar a performance acústica⁴⁷.

2.8.2 Definição do tempo de reverberação (TR) e fórmula de Sabine

Define-se tempo de reverberação como o intervalo de tempo que decorre até que a energia emitida por uma fonte sonora (em ambiente controlado) caia para um milionésimo após a fonte ser desligada. Em escala logarítmica, este fenômeno apresenta-se como uma queda no nível sonoro da ordem de 60dB⁴⁸, valor TR(60), ilustrado na figura 19, que foi definido por Sabine – porém, hoje há outras alternativas, utilizadas para compensar o mascaramento causado pela presença de ruído de fundo: TR(15), TR(20), TR(30), sendo TR(20) a mais utilizada dentre elas⁴⁹.

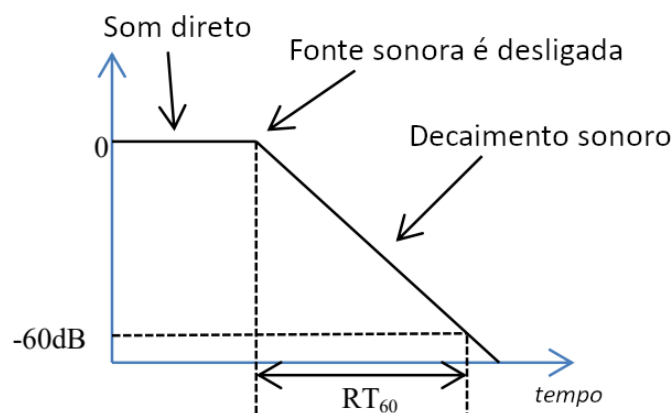


Figura 19 - gráfico do tempo de reverberação (adaptado de Zainudin et al., (2018)).

Importante salientar que presume-se ser suficiente considerar a propagação da energia sonora para descrever as características acústicas de um ambiente, o que se baseia em assumir-se que as suas dimensões sejam grandes o bastante em relação ao comprimento de onda considerado, tendo-se como referência a frequência-limiar de Schoreder. A partir deste raciocínio, adota-se como parâmetro para

⁴⁵ Pinho et al., (2016)

⁴⁶ Hodgson e Nosal, (2002)

⁴⁷ Nijs e Rychtáriková, (2011)

⁴⁸ Bobran e Bobran, (1990)

⁴⁹ Mogas-Recalde, Palau e Márquez, (2021)

analisar a qualidade acústica o tempo de reverberação⁵⁰.

A teoria de reverberação de Sabine, por ele estabelecida no início do século XX, é base da abordagem estatística em acústica ambiente e presume que o tempo de reverberação é a característica acústica mais significativa de uma dada sala; desenvolvida com base em estudos com duas salas de aula, propõe uma fórmula empírica para cálculo do TR:

$$TR = 55,3 \left(\frac{V}{cA} \right) = 0,161 \left(\frac{V}{A} \right) \quad (2)$$

Esta equação presume a existência de uma distribuição homogênea da energia sonora no ambiente⁵¹; nela, TR é expresso em segundos, V corresponde ao volume (m³) do ambiente construído em estudo, A corresponde à capacidade de absorção total (m²) dos limites do ambiente e 0,161 é uma constante que depende da velocidade do som c (admitida como 345,6 m/s).

Algum cuidado deve ser tomado com a variável A, uma vez que a composição de superfícies componentes de uma sala ou ambiente construído em geral não é uniforme e pode variar, em função desde da presença de diferentes elementos com geometrias e características de absorção sonora, até à taxa de ocupação, posto que a quantidade de pessoas e a forma como se utiliza o ambiente construído (conforme mostra a figura 20) também conferem complexidade ao conjunto.

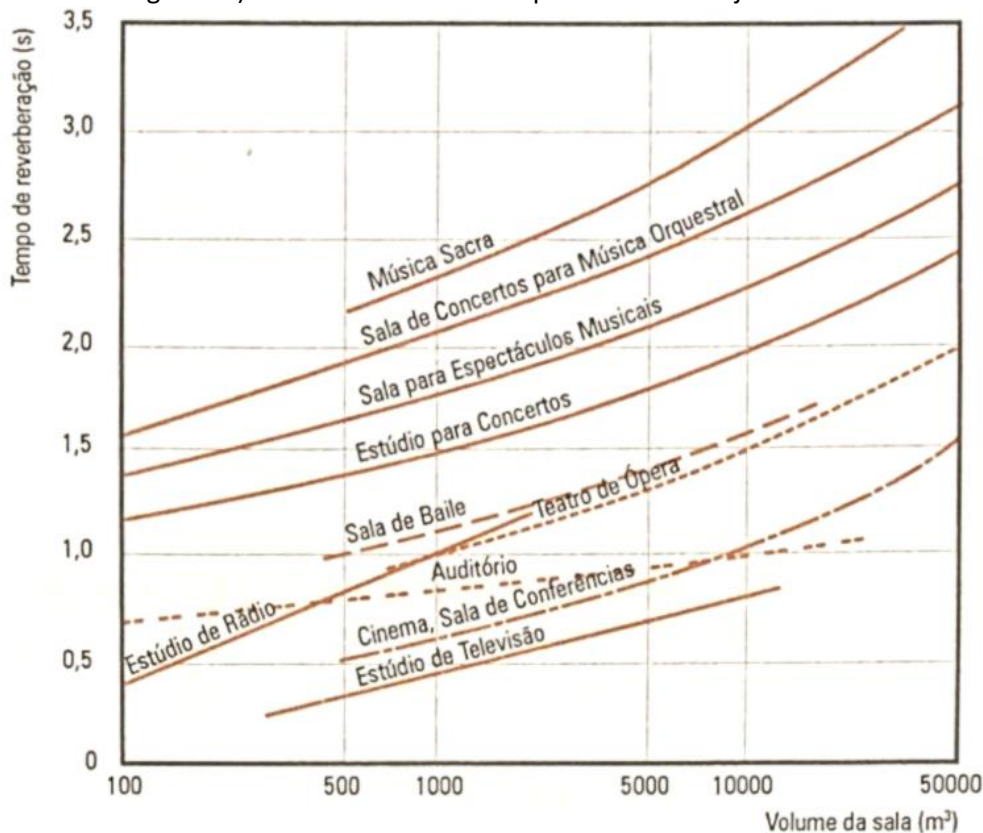


Figura 20 - tempos de reverberação aconselhados, para f=500Hz (Patrício, 2018).

⁵⁰ Neubauer e Kostek, (2001)

⁵¹ Neubauer e Kostek, (2001)

O cálculo da absorção sonora total deve ser, portanto, discretizado em função das respectivas absorções de seu materiais componentes (coeficiente de absorção sonora, α); tal correção é realizada mediante a equação:

$$A = \sum_{i=1}^n \alpha_i \times S_i \quad (3)$$

,onde α é adimensional e S é mensurado em metros quadrados (m^2).

Em espaços maiores, o próprio trajeto das ondas sonoras pode configurar incremento de absorção ao ambiente, reduzindo portanto o tempo de reverberação - em espaços menores tal efeito de absorção do ar pode ser portanto desprezado⁵².

2.9 Modelos matemáticos - comparação de equações

2.9.1 Coeficientes de absorção sonora

O coeficiente de absorção sonora define o quão efetiva é a absorção da energia sonora provinda de um sinal incidente por parte de um determinado material; é obtido mediante testes específicos, em geral realizados em câmaras reverberantes de acordo com a norma ISO 354 (embora também possa ser calculado pelo método do tubo de impedância), que geram um campo sonoro difuso⁵³ (no qual a energia sonora é homogeneamente distribuída e seu fluxo é o mesmo em todas as direções). A grosso modo, pode-se denotar por:

$$\alpha_i \propto I_{ab}/I_{inc} \quad (4)$$

,onde α_i é o coeficiente de absorção sonora de um dado material i , sendo diretamente proporcional ao quociente entre I_{ab} , a intensidade sonora absorvida, e I_{inc} , a intensidade sonora do sinal incidente⁵⁴.

Este coeficiente deve ser ponderado para superfícies em ambientes construídos, assumindo o valor $\bar{\alpha}$. Há vários métodos utilizados para a obtenção de $\bar{\alpha}$:

a) $\bar{\alpha}$ segundo Sabine (α_{Sab}):

$$\alpha_{Sab} = \frac{1}{S} \sum_i \alpha_i S_i \quad (5)$$

,onde S é a área total de uma dada superfície, S_i é a área superficial referente a um dado material i e α_i

⁵² Silva, (2022)

⁵³ Robin et al., (2014)

⁵⁴ Costa, (2003)

é o coeficiente de absorção sonora deste dado material específico.

b) $\bar{\alpha}$ segundo Eyring (α_{Eyr}):

$$\alpha_{Eyr} = -\ln(1 - \alpha_{Sab}) \quad (6)$$

A considerar que a energia do campo sonoro é reduzida a $(1-\alpha)$ a cada reflexão⁵⁵, de forma exponencialmente cumulativa, esta equação representa um aperfeiçoamento de α_{Sab} .

c) $\bar{\alpha}$ segundo Millington (α_{Mil}):

$$\alpha_{Mil} = -\frac{1}{S} \sum_i S_i \ln(1 - \alpha_i) \quad (7)$$

Trata-se de um aperfeiçoamento de α_{Eyr} para situações em que a presença de materiais altamente absorventes geravam um valor de α_{Eyr} maior de 1. Enquanto α_{Sab} é determinado através de uma média aritmética, α_{Mil} recorre a uma média geométrica⁵⁶.

d) $\bar{\alpha}$ segundo Dance e Shield:

Uma vez que α_{Mil} apresenta uma limitação para valores de α_i iguais ou próximos a 1, Dance e Shield propuseram um ábaco para diminuir valores de coeficientes de Sabine considerados elevados⁵⁷.

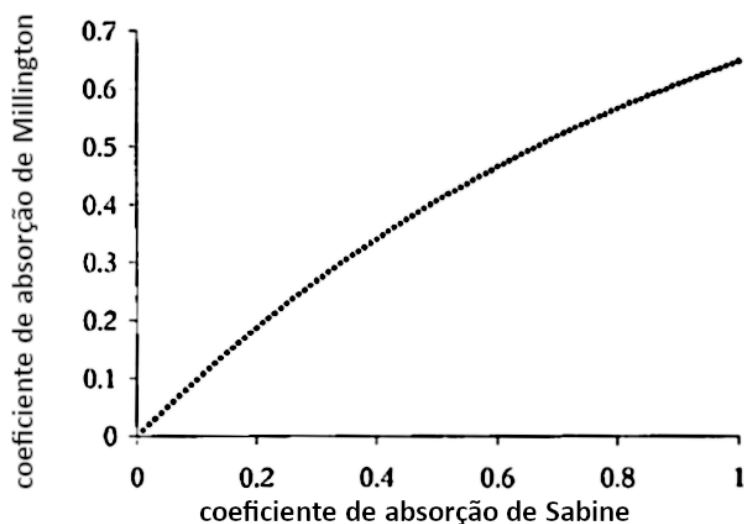


Figura 21 - ábaco de Dance e Shield (adaptado de Ducourneau e Planeau, (2003).

⁵⁵ Hupalo, (2017)

⁵⁶ Nowoświat e Olechowska, (2016)

⁵⁷ Ducourneau e Planeau, (2003)

e) $\bar{\alpha}$ segundo Cremer e Miller (α_{Cre}):

$$\alpha_{Cre} = \frac{1}{S} \sum_i S_i \left[-\ln \left(1 - \frac{1}{S_i} \sum_j \alpha_{ij} S_{ij} \right) \right] \quad (8)$$

Trata-se de uma abordagem em que as superfícies são subdivididas (em S_{ij}), considerando-se serem as áreas obtidas irradiadas uniformemente pelas ondas acústicas. Caso as principais superfícies do ambientes possuam coeficientes de absorção sonora uniformes, α_{Cre} tende a assumir o valor de α_{Mil} .

f) $\bar{\alpha}$ segundo Kuttruf (α_{Kut}):

$$\alpha_{Kut} = \ln \left(\frac{1}{\bar{\rho}} \right) + \ln \left(1 + \frac{\sum_n \rho_n (\rho_n - \bar{\rho}) S_n^2}{(\bar{\rho} S)^2 - \sum_n \rho_n^2 S_n^2} \right) \quad (9)$$

Trata-se de uma correção de α_{Eyr} para salas com paredes difusoras, que leva em consideração a influência da absorção de uma absorção superficial não uniforme (na superfície denotada por S); introduz o fator $\bar{\rho} = 1 - \bar{\alpha}_n$, coeficiente médio de reflexão de uma dada área superficial S_n ⁵⁸.

g) $\bar{\alpha}$ segundo Fitzroy (α_{Fit}):

$$\alpha_{Fit} = -S \left[\frac{S_x}{\ln(1 - \bar{\alpha}_x)} + \frac{S_y}{\ln(1 - \bar{\alpha}_y)} + \frac{S_z}{\ln(1 - \bar{\alpha}_z)} \right]^{-1} \quad (10)$$

Trata-se de cálculo segundo as três dimensões de uma sala cujas paredes opostas tenham coeficientes de absorção similares, com vistas a compensar a variação observada com α_{Sab} e α_{Eyr} em salas com distribuição sonora não uniforme.

h) $\bar{\alpha}$ segundo Arau-Puchades (α_{AraP}):

$$\alpha_{AraP} = [-\ln(1 - \bar{\alpha}_x)]^{-\frac{S_x}{S}} [-\ln(1 - \bar{\alpha}_y)]^{-\frac{S_y}{S}} [-\ln(1 - \bar{\alpha}_z)]^{-\frac{S_z}{S}} \quad (11)$$

Trata-se de um aperfeiçoamento de α_{Eyr} para a situação específica de auditórios, teatros e estúdios de filmagem, mediante sua ponderação nas três dimensões.

i) $\bar{\alpha}$ segundo Zhou (α_{Zhou}):

$$\bar{\alpha}_i = \alpha_i (e^{-mL_i} - BR_{ie}); (i = x, y, z) \quad (12)$$

⁵⁸ Neubauer, (2001)

Onde m é a constante de atenuação do ar, mL_x , mL_y e mL_z são as absorções do ar em caminhos livres das ondas, referentes às dimensões da sala, e BR_{xe} , BR_{ye} e BR_{ze} são os valores médios das absorções sonoras laterais. Os valores de α_x , α_y e α_z são obtidos em câmaras de reverberação e representam ponderação dos coeficientes dos materiais componentes das superfícies perpendiculares à respectiva dimensão da sala⁵⁹.

Trata-se de um modelo para salas retangulares com distribuição de absorção não-uniforme.

Mediante simulação computacional, observou-se que, para salas de aula, os modelos para cálculo do coeficiente de absorção de Sabine, Eyring e Millington (e por conseguinte Cremer e Miller) chegaram a valores praticamente idênticos⁶⁰. Importante frisar que, para salas retangulares, é possível estudar sistematicamente a relação entre o tempo de reverberação e o volume do ambiente, facilitando o estudo comparativo de performance acústica das diversas fórmulas⁶¹.

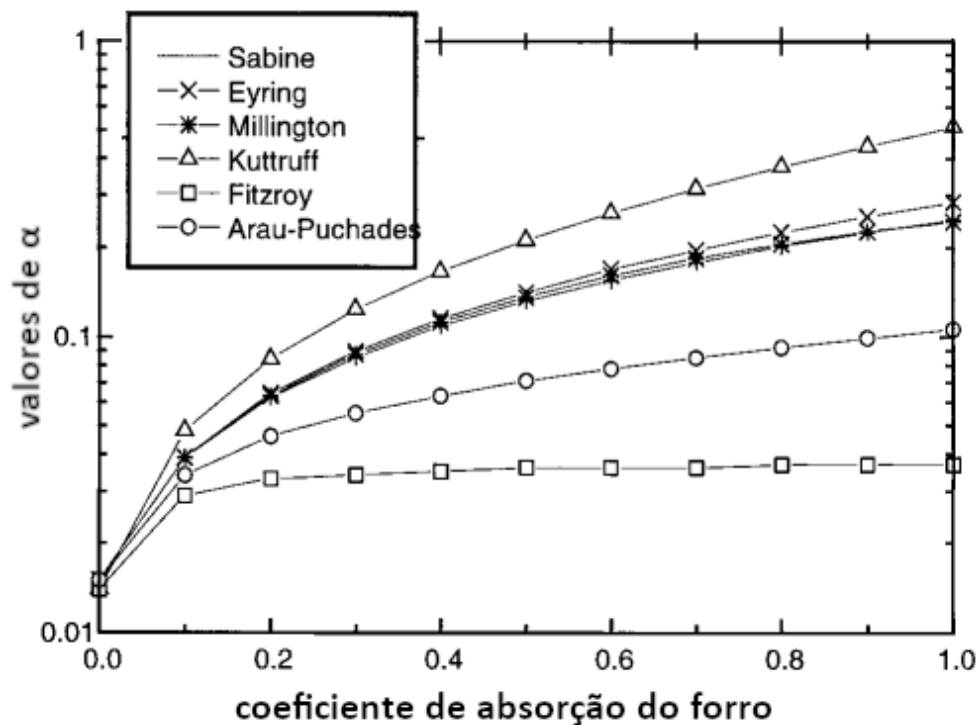


Figura 22 - comparação de equações para obter TR (adaptado de Bistafa e Bradley, (2000).

2.9.2 Comparação das Fórmulas para cálculo do Tempo de Reverberação

Apresenta-se, na figura 23, histórico comparativo das principais equações para cálculo do tempo de reverberação.

⁵⁹ Zhou et al., (2021)

⁶⁰ Bistafa e Bradley, (2000)

⁶¹ Neubauer e Kostek, (2001)

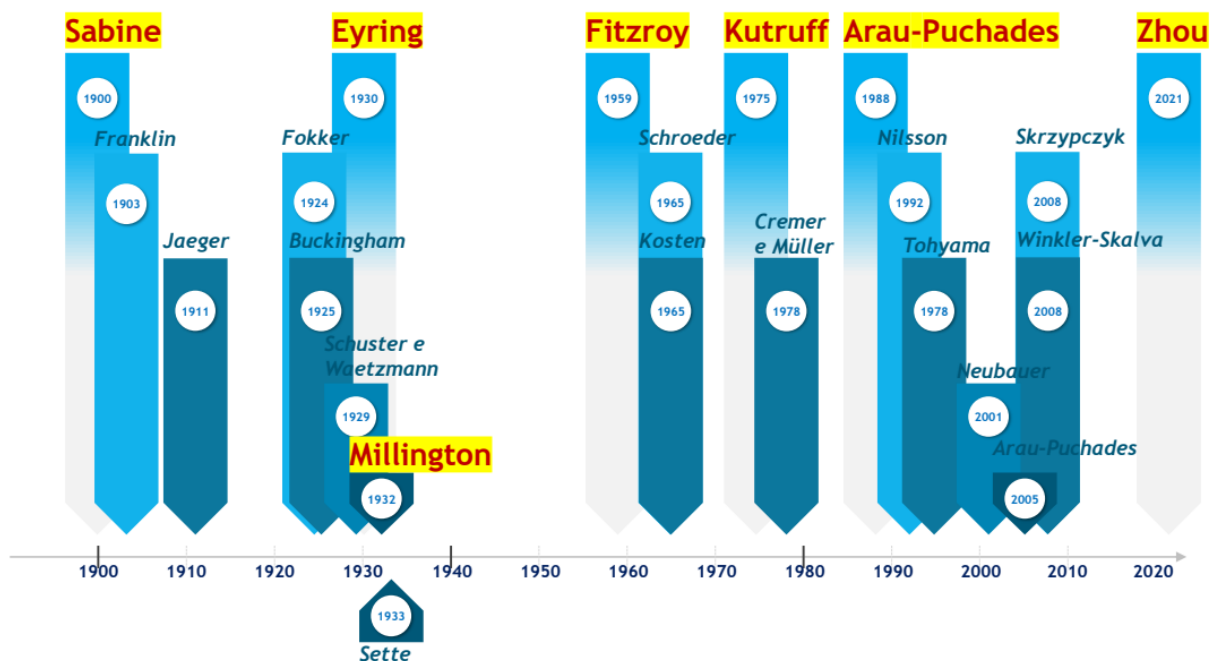


Figura 23 - linha do tempo de principais fórmulas para calcular TR (adaptado de Neubauer e Kostek, 2001).

Enunciamos a fórmula de Sabine, válida para campos sonoros difusos, situações em que não haverá superfícies muito mais absorventes que as demais no recinto (ou seja, $\Delta\alpha$ não excederá 0,4)⁶²:

$$TR_{60} = 0,161 \left(\frac{V}{\sum_i S_i \alpha_i} \right) \quad (13)$$

Eyring descobriu que, na presença de grande absorção na sala, a fórmula de Sabine poderia se beneficiar de uma revisão – o que ele propôs, com uma nova fórmula, presumindo ser o ambiente retangular (baseada no percurso médio entre as reflexões sonoras, esta equação, assim como a fórmula de Sabine, presume a existência de um campo sonoro difuso e não diferencia seus resultados em função da localização do material absorvente):

$$TR_{60} = \frac{0,161V}{-\text{Sln}(1 - \bar{\alpha})} \quad (14)$$

Knudsen propôs um aprimoramento à fórmula de Eyring, ao levar em consideração o isolamento acústico do próprio ar, expresso através da constante m de atenuação do ar:

$$TR_{60} = \frac{0,161V}{S\bar{\alpha} + 4mV} \quad (15)$$

⁶² Hupalo, (2017)

Em seguida, tem-se a derivação de Millington e Sette, cuja diferença reside na ponderação do coeficiente de absorção acústica:

$$TR_{60} = \frac{0,161V}{-\sum_i S_i \ln(1 - \alpha_i)} \quad (16)$$

Fitzroy, levando em consideração as características geométricas do ambiente, com diferenças segundo os eixos tridimensionais:

$$TR_{60} = 0,161 \left(\frac{V}{S^2} \right) \left[\frac{-S_x}{\ln(1 - \bar{\alpha}_x)} + \frac{-S_y}{\ln(1 - \bar{\alpha}_y)} + \frac{-S_z}{\ln(1 - \bar{\alpha}_z)} \right] \quad (17)$$

Kuttruff sugeriu uma distribuição estatística do som⁶³, introduzindo uma correção para a equação de Eyring; este modelo diferencia os tempos de reverberação de acordo com a localização do material absorvente⁶⁴:

$$TR_{60} = \frac{0,161V}{S[-\ln(1 - \bar{\alpha})] + \frac{\sum_i \rho_i (\rho_i - \bar{\rho}) S_i^2}{(\bar{\rho}S)^2 - \sum_i \rho_i^2 S_i^2}} \quad (18)$$

Caso se leve em consideração a atenuação causada pelo ar, tem-se:

$$TR_{60} = \frac{0,161V}{S[-\ln(1 - \bar{\alpha})] + \frac{\sum_i \rho_i (\rho_i - \bar{\rho}) S_i^2}{(\bar{\rho}S)^2 - \sum_i \rho_i^2 S_i^2} + 4mV} \quad (19)$$

Esta fórmula pode ser aplicada quando houver $i-1$ superfícies com coeficientes de absorção sonora próximos, e uma superfície, nomeadamente a i -ésima, com um coeficiente diferente⁶⁵.

Arau introduziu uma fórmula que leva em consideração uma distribuição assimétrica de absorção, assumindo ser a decaída da reverberação um processo hiperbólico; essencialmente sua equação presume ser o tempo de reverberação de um dado ambiente a média ponderada pelas respectivas áreas superficiais, a tomarem-se os tempos de reverberação segundo as três dimensões ortogonais:

$$TR_{60} = \left[\frac{0,161V}{-S \cdot \ln(1 - \bar{\alpha}_x) + 4mV} \right]^{-\frac{S_x}{S}} \left[\frac{0,161V}{-S \cdot \ln(1 - \bar{\alpha}_y) + 4mV} \right]^{-\frac{S_y}{S}} \left[\frac{0,161V}{-S \cdot \ln(1 - \bar{\alpha}_z) + 4mV} \right]^{-\frac{S_z}{S}} \quad (20)$$

⁶³ Nowoświat e Olechowska, (2016)

⁶⁴ Olechowska et al., (2018)

⁶⁵ Neubauer, (2001)

A norma EN 12354-6 apresenta, em seu anexo D, equações para cálculo do tempo de reverberação em salas com absorção não-homogênea, de acordo com a frequência⁶⁶:

$$TR_{60} = 0,161 \left(\frac{V}{4} \right) \left(\frac{1}{A_x} + \frac{1}{A_y} + \frac{1}{A_z} + \frac{1}{A} \right) \geq T_{\text{Sabine}} \text{ para } f \geq f_t = \left(\frac{8,7c}{V^{\frac{1}{3}}} \right) \quad (21)$$

$$TR_{60} = 0,161 \left(\frac{V}{A_{xyzd}} \right) \text{ para } f < f_t = \left(\frac{8,7c}{V^{\frac{1}{3}}} \right) \quad (22)$$

onde A_x , A_y , e A_z são as áreas efetivas de absorção sonora para cada campo sonoro incidente, A_d é a área efetiva de absorção sonora para o campo sonoro difuso e A_{xyzd} é a área efetiva de absorção sonora para todo o campo de baixas frequências⁶⁷. O limite entre altas e baixas frequências é definida pela frequência de transição, f_t ⁶⁸.

Por fim, Zhou propôs, em 2021, um modelo para cálculo do tempo de reverberação em salas retangulares com campos sonoros não difusos, levando em consideração as três dimensões da sala e os coeficientes de difusão, além dos de absorção:

$$\alpha_{ie} = \alpha_i (e^{-mL_i} - BR_i); (i = x, y, z) \quad (23)$$

Os coeficientes α_x , α_y , e α_z são medidos em câmaras de reverberação e são valores ponderados pelas superfícies e materiais perpendiculares à respectiva dimensão.

A absorção sonora lateral é descrita pelos parâmetros BR_i , diretamente proporcionais à distância entre duas paredes paralelas e inversamente proporcionais à distância entre paredes contíguas, à frequência e ao coeficiente de absorção de cada par de paredes. Seu valor é limitado, não podendo exceder ao valor médio da absorção sonora da sala em análise.

A decadência do som na sala é dividida em quatro componentes: x, y, z e uma decadência relativa ao campo sonoro difuso. O modelo leva também em consideração a absorção pelo ar e os coeficientes de espalhamento.

Este estudo observou no entanto que, para campos difusos, seus resultados aproximaram-se dos obtidos pela fórmula de Eyring. Também importante foi a comparação entre os diversos modelos apresentados⁶⁹.

⁶⁶ BS EN 12354-6, (2004)

⁶⁷ Granzotto et al., (2022)

⁶⁸ Rosão e Conceição, (2013)

⁶⁹ Zhou et al., (2021)

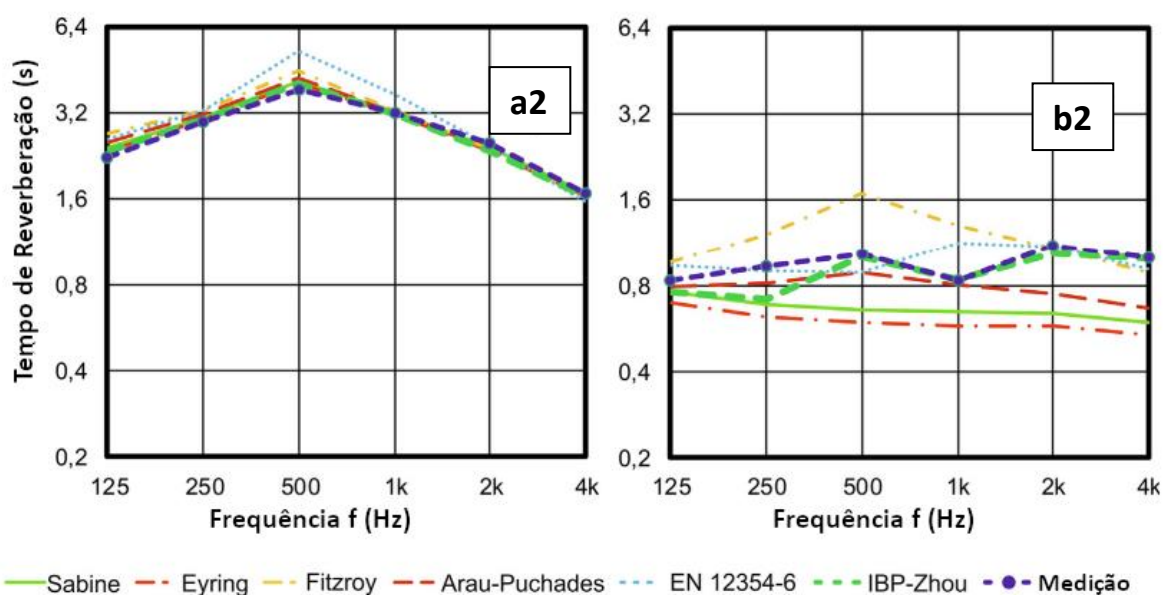


Figura 24 - comparação de equações para obter TR (adaptado de Zhou et al., (2021)).

Tal comparação foi realizada, como indicado na figura 24, para uma sala de aula sem móveis (a) e para uma sala de aula com móveis e com forro acústico (b), tendo como referência medição do TR *in loco*. A primeira conformação apresentou tempos de reverberação mais longos e com resultados similares em todos os modelos. A segunda conformação, por sua vez, apresenta variações, em função do campo não ser mais difuso (devido ao forro acústico) e ao efeito do mobiliário, que produz espalhamento das ondas sonoras.

Por fim, cabe ressaltar que as equações mais utilizadas na análise da performance acústica de recintos têm sido a fórmula de Sabine e a fórmula de Eyring⁷⁰.

2.10 Tempo de reverberação ótimo e inteligibilidade

Fatores como tamanho e forma (regular ou irregular) de uma sala, bem como presença percentual de superfícies com materiais absorventes, afetam a acústica e são detetáveis pela mensuração do tempo

⁷⁰ Tan et al., (2017)

de reverberação⁷¹. Em relação a pesquisas de acústica no campo das construções, a reverberação destaca-se na literatura científica como o parâmetro mais estudado, sendo portanto o fator de maior destaque, de maior relevância quanto à qualidade acústica do ambiente de salas de aula, onde possui um efeito direto na inteligibilidade do discurso⁷².

Como exposto, a escolha do volume de um ambiente construído, bem como de materiais de acordo com seus coeficientes de absorção e suas superfícies, determinam o tempo de reverberação. A depender do uso pretendido, haverá um tempo de reverberação definido como ótimo, previsto em regulamentação específica; os cálculos devem portanto obedecer ao que se configura então como um intervalo de aceitação⁷³.

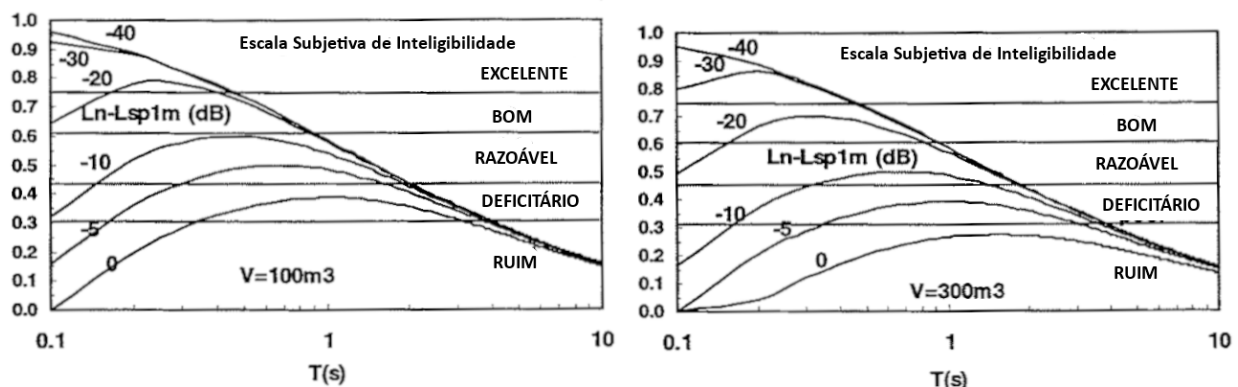


Figura 25 - valores de STI em função de TR para salas de aula de 100m³ e 300m³ (Bistafa e Bradley, 2000)

O tempo de reverberação está ligado de forma inversamente proporcional à inteligibilidade da fala, e pode ser a ela relacionado mediante o uso do STI e com um parâmetro, como o *ratio* ruído-sinal (SNR, do inglês *signal-to-noise ratio*), entre o ruído ambiente e o nível sonoro da fonte (orador, no caso de uma sala de aula)⁷⁴, fator este diretamente proporcional à inteligibilidade⁷⁵ (figura 25). Maiores valores de reverberação podem ser benéficos no caso de tratar-se de música, por exemplo, e o valor nulo não necessariamente é ideal para a fala, gerando desconforto e sonolência⁷⁶. Embora outros fatores, como em especial o ruído de fundo, possam ter implicações no STI, o tempo de reverberação é considerado o principal parâmetro a influenciá-lo⁷⁷, e é portanto o mais presente na literatura.

Geralmente, descreve-se o tempo de reverberação em relação às frequências de 500 Hz, 1000 Hz e 2000 Hz, tendo-se como resultado uma descrição satisfatória das características acústicas dos ambientes, embora investigação em mais bandas de frequência seja aconselhável.

⁷¹ Hodgson e Nosal, (2002)

⁷² Mogas Recalde, Palau e Márquez, (2021)

⁷³ Jacobsen et al., (2008)

⁷⁴ Bistafa e Bradley, (2000)

⁷⁵ Hodgson e Nosal, (2002)

⁷⁶ Silva, (2013)

⁷⁷ Gómez Escobar e Barrigón Morillas, (2015)

2.11 Relevância da Acústica em Salas de Aula

2.11.1 Relevâncias fundamentais

Salas de aula, por definição, são espaços em que a acústica possui importância basilar para o eficaz cumprimento de seu propósito. A transmissão de informação na forma de sinais sonoros entre oradores e ouvintes será, portanto, analisada em função dos principais parâmetros que a definem e influenciam. Sobrepondo-se ao sinal direto, o som reverberante provoca um efeito de mascaramento, e tende a prejudicar a percepção de consoantes, através do prolongamento da energia espectral dos sons vocálicos, que sobrepõem-se às consoantes subsequentes. É possível mesmo que as pausas entre palavras e frases sejam preenchidas, o que gera prejuízo na comunicação em ambientes de estudo. Soma-se a estes dados o facto de a acústica de salas de aula tipicamente acentuar sons de baixa frequência, que correspondem às frequências da maior parte das vogais na fala⁷⁸; identificaram-se também como as mais importantes fontes de ruído em salas de aula exatamente as baixas frequências, não raro associadas a sistemas de AVAC⁷⁹.

Em relação à distância entre professor (orador) e aluno (ouvinte), é um fator importante para a inteligibilidade do som, influenciando na relação entre chegada do sinal direto e sinal refletido. Para determiná-la, estabeleceu-se o parâmetro Distância Crítica, que é definido como o ponto de uma sala no qual os níveis da fonte sonora e do som reverberante são iguais – dado pela fórmula⁸⁰:

$$D_c = 0.20 \times \sqrt{VQ/nRT} \quad (24)$$

,onde: D_c – distância crítica;

V – volume da sala (m^3);

Q – fator de diretividade da fonte (e.g.: voz humana tem $Q = 2.5$);

n – número de fontes sonoras;

RT – tempo de reverberação.

Em uma sala de aula de dimensões comuns, com um tempo de reverberação considerado razoável dentro da média, a distância crítica entre professor e aluno fica entre 3 e 4 metros.

No que remete ao projeto do ambiente construído, vários elementos participam na composição do que seria um tempo de reverberação ideal previsto para uma sala, para a obtenção do qual estima-se a inteligibilidade de fala com base em um coeficiente de absorção médio, na distância entre orador e ouvinte, e no parâmetro SNR. (NIJS, 2011)

⁷⁸ Mogas-Recalde, Palau e Márquez, (2021)

⁷⁹ Nelson et al., (2008)

⁸⁰ Crandell e Smaldino, (2000)

2.11.2 Relevância para alunos e professores

Denomina-se efeito Lombard à tendência que o orador terá, face a um ruído de fundo, a elevar o nível de sua voz, de forma a ter mais percepção da mesma e, desta forma, compreender que atinge os ouvintes, na prática uma compensação do SNR. Trata-se de comportamento já classificado há mais de um século e que, se corresponde primordialmente ao papel do professor, dando ênfase a seu esforço vocal, quando praticado pelos alunos, tende a gerar um outro efeito, o efeito café.

Compreende-se o efeito café como a tendência, dentro de um espaço reverberante, do ruído “reproduzir-se”, com a competição entre várias pessoas pelo SNR, em esforços individuais que elevam o ruído de fundo, um efeito prejudicial em especial em salas de aula, nas quais é fundamental que a acústica atenda às necessidades de aprendizagem⁸¹. Saliente-se que o efeito café retroalimenta o efeito Lombard, seu gerador, ao intensificar o ruído de fundo que afeta o discurso do professor. A reverberação é compreendida como um parâmetro crucial, pois agrava o ruído de fundo, cuja solução potencialmente à dela relaciona-se, portanto.

Em salas de aula que apresentam maior tempo de reverberação, observou-se maior lentidão no processo de aprendizado, em função de haver prejuízo na inteligibilidade da fala⁸², sendo, como já afirmado, o tempo de reverberação e a relação entre a fala do professor e o ruído de fundo (SNR) os mais importantes parâmetros para determinar a inteligibilidade⁸³ - para ilustrar como este parâmetro funciona, se o sinal da fala do professor tiver 75 dB e o ruído de fundo tiver 65 dB, ter-se-á um SNR de +10 dB.

Professores expostos a salas de aula com tempo de reverberação alto assinalaram, em adição ao prejuízo em sua função direta, fadiga, tensão, e mesmo degradação em suas relações sociais, observando-se maior competitividade e desconforto⁸⁴.

2.12 Simulação Acústica e BIM

2.12.1 Generalidades

Este trabalho visa a contribuir para fazer face à lacuna existente na implementação de análises de performance acústica incorporada à metodologia BIM.

⁸¹ Whitlock e Dodd, (2006)

⁸² Nijs e Rychtáriková, (2011)

⁸³ Pinho et al., (2016)

⁸⁴ Mogas-Recalde, Palau e Márquez, (2021)

Podemos definir BIM (do inglês: Modelagem de Informações da Edificação) como um método que consiste no “uso compartilhado de representação digital de um ativo construído”⁸⁵ em uma série de procedimentos e técnicas concatenados de forma a conformar uma abordagem em projeto que agrega metadados inseridos a modelos e, mediante análise específica, fornece de forma automatizada, com possibilidade de recurso à assimilação de algoritmos sofisticados e de inteligência artificial⁸⁶, informações com vista a apoio à decisão referente a gestão e coordenação nas diversas fases do ciclo de vida do bem construído, definidas mediante o estabelecimento de níveis de prototipagem e de apresentação, produzindo para tanto documentação técnica específica.

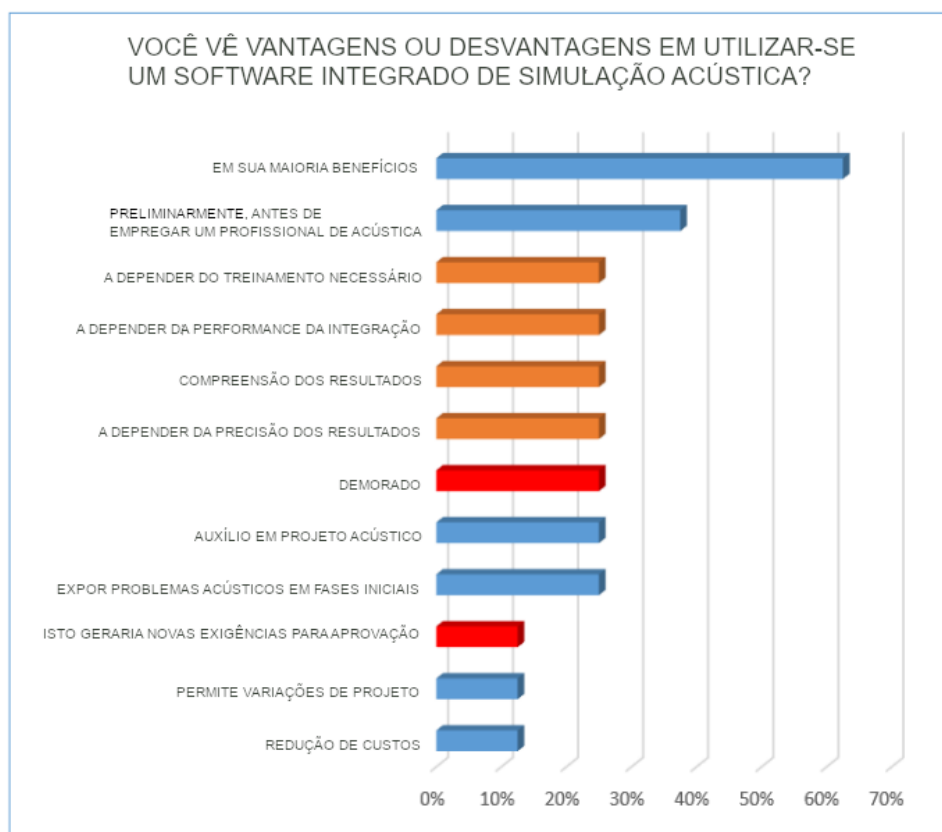


Figura 26 - Vantagens e desvantagens listadas por profissionais ao usarem *softwares* integrados de simulação acústica (Harvey, 2021)

No contexto de projetos da indústria AEC (Arquitetura, Engenharia e Construção), é patente a praticidade, para os profissionais envolvidos⁸⁷, de se disporem, em fase preliminar de projeto, informações acerca do desempenho acústico da edificação de compreensão direta, sem a necessidade de aprofundamento, de forma a evitar excessiva complexidade (figura 26); embora alguns avanços já tenham sido implementados de forma a demonstrar ser possível estabelecer análises acústicas, através

⁸⁵ ISO 19650-1, (2018)

⁸⁶ Rane, (2023)

⁸⁷ Harvey, (2021)

de um fluxo de trabalho BIM ou Open BIM⁸⁸, mostraram-se em sua maioria de abordagens que atuam de forma anexa aos *softwares* de projeto.

Há uma extensa gama de programas computacionais de modelagem BIM disponíveis no mercado (figura 27), estando a abordagem da qualidade acústica e seus parâmetros ainda em desenvolvimento. A utilização de simulações varia também de acordo com a fase do projeto e seu amadurecimento⁸⁹.

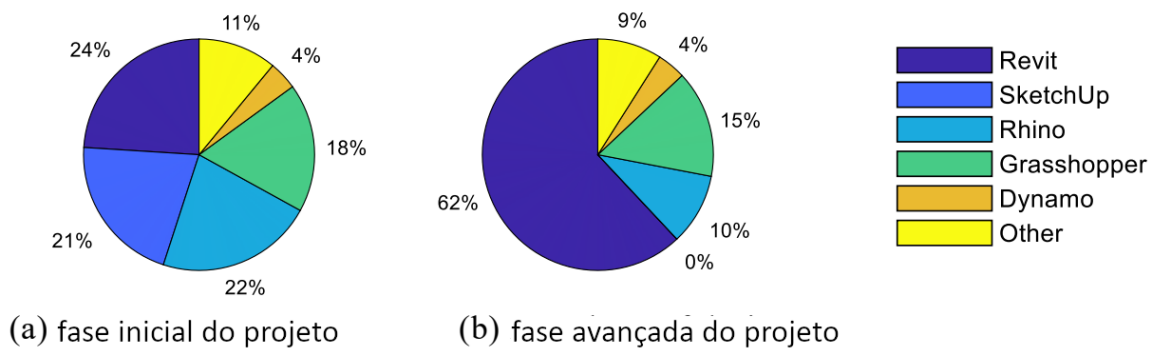


Figura 27 - preferência de software BIM segundo a fase de projeto (adaptado de Jeong, 2022).

A criação de modelos possibilita aceder a parâmetros de acústica que caracterizam a construção, sendo mesmo possível simular o som de ambientes e ouvi-lo (uma técnica chamada auralização⁹⁰).

No entanto a interoperabilidade entre *softwares* BIM e *softwares* específicos de acústica é limitada e apresenta-se como um obstáculo no campo da simulação acústica no contexto da indústria AEC⁹¹. Neste sentido, soluções como a implementação de um algoritmo para introduzir dados mostraram-se capazes de apresentar resultados indicativos da relevância de obter-se tal integração; no contexto de tratamento de poluição sonora, foi possível obter mapas de ruído para apoio a projeto⁹².

2.12.2 Modelos computacionais

O primeiro modelo computacional de acústica foi desenvolvido em 1962, sendo logo seguido por outros; à época, os algoritmos destas simulações baseavam-se em acústica geométrica, que depende de serem as dimensões do recinto grandes em relação ao comprimento de onda do som em análise, portanto mais aptos a analisar ambientes maiores ou a sons com frequências maiores – seguiram-se a eles modelos baseados em ondas, mais adequados a recintos médios ou pequenos, porém com maior custo computacional⁹³.

⁸⁸ Montenegro, Agnolin e Ducruet, (2021)

⁸⁹ Jeong, (2022)

⁹⁰ Vorländer, (2020)

⁹¹ Lee e Nik-Bakht, (2020)

⁹² Butorina et al., (2019)

⁹³ Vorländer, (2013)

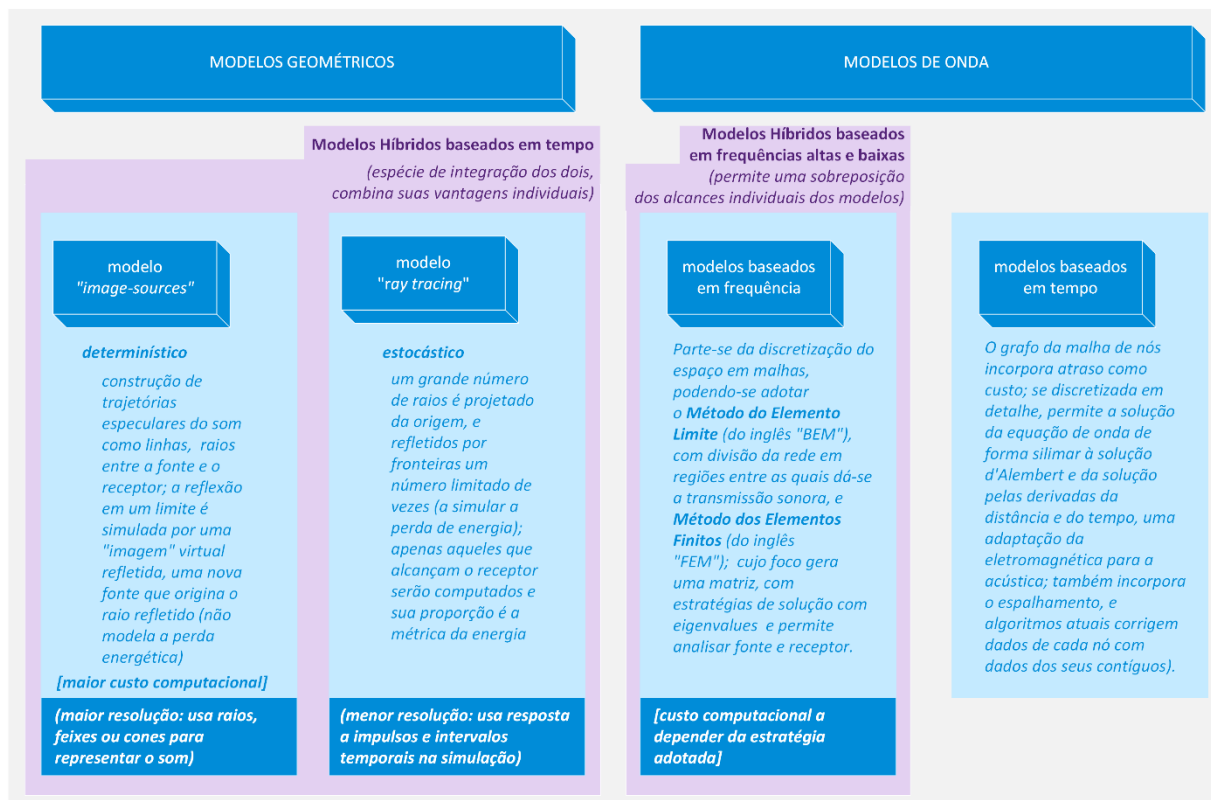


Figura 28 – resumo geral de modelos geométricos e de onda (Vorländer, 2013)

Há portanto variações: podem-se usar modelos baseados em partículas, raios (ou traçado de raios⁹⁴), feixes ou cones; além disso, certos aspectos da geometria, como superfícies côncavas ou convexas, podem beneficiar os resultados obtidos por modelos de ondas em detrimento de modelos geométricos, enquanto outros, como a rugosidade das superfícies, podem levar à adaptação de modelos geométricos, incorporando coeficientes de espalhamento. Há ainda a possibilidade de adaptações de modelos geométricos com coeficientes de difusão, e métodos de superfície aplicados à transferência de energia acústica, como a radiosidade⁹⁵ (figura 28).

O uso de inteligência artificial como ferramenta de otimização de modelos de análise acústica tem gerado resultados, como no uso da fórmula de Sabine e de FEM para construção de banco de dados para criação de modelo de rede neural para predição do tempo de reverberação em salas de aula⁹⁶. Outra experiência usou *software* de ray-tracing nas bandas de frequência de 500, 1000 e 2000 Hz em uma sala de aula para construir um modelo em MATLAB de rede neuronal de predição de tempo de reverberação, com recurso a método dos mínimos quadrados e a regressão linear para testar a acurácia⁹⁷.

Há várias soluções autônomas de *softwares* para análise acústica: COMSOL, ODEON, Catt-Acoustic,

⁹⁴ Menegotto e Torres, (2019)

⁹⁵ Savioja e Svensson, (2015)

⁹⁶ Yahya et al., (2011)

⁹⁷ Zainudin et al., (2018)

EASE, SoundPLAN, BRASS, INSUL, AcouBAT, RAYNOISE, dentre outros, além de soluções open source, como Wayverb⁹⁸. Já em relação ao uso de modelos BIM para análise da performance acústica de recintos, há estratégias de usar ficheiros intermediários com metadados (eg.: IFC) para processamento nesses *softwares* autônomos; alternativamente, algumas experiências têm utilizado fontes externas de bancos de dados (eg.: coeficientes de absorção sonora), como OpenMAT ou mesmo MSEXcel, ou recorrido a desenvolver outros recursos externos de processamento destes dados, como rotinas *python* em VisualStudio e processamento em MATLAB – embora recursos internos tenham sido desenvolvidos, como processamento em C# ou *python* através da própria API do *software* BIM ou com recurso a programação visual, também embutido no *software* BIM, além da adaptação de pacotes de design generativo para finalidades de análise acústica⁹⁹. O uso de determinadas equações de predição do tempo de reverberação para a análise, extraíndo parâmetros da geometria dos modelos, tem permeado grande número destas experiências.

No que concerne à metodologia BIM, quanto aos dados a serem extraídos, é importante o papel do nível de detalhe do modelo (do inglês “LOD”), na medida em que os resultados da análise podem incorporar erros em função de uma construção inapropriada – um nível de detalhe excessivamente baixo pode deixar de agregar dados relevantes e um nível de detalhe excessivamente alto pode levar a excessivo custo computacional, ambas as situações com o potencial de comprometer o experimento¹⁰⁰.

2.13 Normas e Legislação

2.13.1 Legislação - Portugal

A paulatina adoção de um paradigma do desempenho das edificações impôs o crescente emprego de parâmetros de controlo às construções, limitados por diversos instrumentos normativos. O ano de 1983 marca a promulgação do Decreto Legislativo 22, na Região Autónoma dos Açores, primeiro texto legislativo de Portugal relacionado à acústica – a versar sobre “ruídos e sons evitáveis”, determinadas relações de vizinhança e respetivas licenças públicas¹⁰¹.

O primeiro documento legal sobre acústica com abrangência sobre todo o país surgiu em 1987: o Decreto-Lei 251/87, “Regulamento Geral sobre o Ruído”; versando sobre “prevenção e combate ao ruído”¹⁰², foi alterado e complementado pelo Decreto-Lei 292/89¹⁰³, posteriormente revisado pelo

⁹⁸ Thomas, (2016)

⁹⁹ Goldstein et al., (2020)

¹⁰⁰ Vorländer, (2013)

¹⁰¹ DL 22/83/A, (1983)

¹⁰² DL 251, (1987)

¹⁰³ DL 292, (1989)

Decreto-Lei 292/2000¹⁰⁴ e substituído pelo Decreto-Lei 9/2007, em vigor. Entre outros pontos, determina a criação de mapas de ruído municipais, estabelece valores limite de exposição, classifica actividades ruidosas e prevê sanções. Define como “zona sensível” a “área definida em plano municipal de ordenamento do território como vocacionada para escolas ou usos similares”, e como “zona urbana consolidada” a “zona sensível com ocupação estável em termos de edificação”¹⁰⁵.

No ano de 2002 é promulgado o Decreto-Lei 129/2002, Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios, que regula a qualidade acústica¹⁰⁶, tendo sido alterado pelo Decreto-Lei 96/2008, de forma a recepcionar a Directiva n.º 2002/49/CE¹⁰⁷, do Parlamento Europeu e do Conselho, e a compatibilizá-lo com o já citado Regulamento Geral sobre o Ruído, RGR. Em seu artigo 2.º, define tempo de reverberação e, em seu artigo 7.º, dispõe acerca de edifícios escolares e similares, e de investigação. Sobre o tempo de reverberação, assinala-se a definição de T_0 (índice 0): “tempo de reverberação de referência”¹⁰⁸.

Em 2006, Portugal recepciona a norma do Parlamento Europeu Directiva 2003/10/CE¹⁰⁹, hoje já substituída, que versava sobre segurança e saúde de trabalhadores expostos a ruído, através do Decreto-Lei 182/2006, em vigor, que estabelece valores-limite de exposição, avaliação de riscos, procedimentos para medição do ruído, entre outros¹¹⁰.

No ano 2009, promulgou-se a Lei 102/2009, que trata da segurança e da saúde do trabalho, complementando pontualmente situações relacionadas ao ruído¹¹¹.

Para o presente trabalho analisam-se alguns artigos do RRAE de 2008. De início, analisa-se o seu artigo 2º, que estabelece definições:

T_0 é o tempo de reverberação de referência, em segundos; para compartimentos de habitação ou com dimensões comparáveis, $T_0 = 0,5s$; para compartimentos em que haja tempo de reverberação atribuível em projecto, o valor de referência a considerar será o do respectivo tempo de dimensionamento.

A utilização de um tempo de reverberação de referência exige a utilização do modelo de Sabine de necessariamente usufruir de um campo sonoro difuso no compartimento, algo não realista ao tratar-se de compartimentos normalmente mobilados¹¹². Aplica-se no cálculo do isolamento sonoro a sons de

¹⁰⁴ DL 292, (2000)

¹⁰⁵ DL 9, (2007)

¹⁰⁶ DL 129, (2002)

¹⁰⁷ Directiva 2002/49/CE, (2002)

¹⁰⁸ DL 96, (2008)

¹⁰⁹ DIRECTIVA 2003/10/CE, (2003)

¹¹⁰ DL 182, (2006)

¹¹¹ Lei 102, (2009)

¹¹² Patrício, (2018)

condução aérea, padronizado.

A seguir, analisa-se uma porção do artigo 7º do RRAE de 2008, que versa sobre edifícios escolares e similares e de investigação:

1 - Os edifícios escolares e similares, de investigação e de leitura estão sujeitos aos seguintes requisitos acústicos:

d) No interior dos locais que constam no quadro III do anexo ao presente regulamento, considerados mobilados normalmente e sem ocupação, o tempo de reverberação, T , correspondente à média aritmética dos valores obtidos para as bandas de oitavas centradas nas frequências de 500 Hz, 1000 Hz e 2000 Hz, deverá satisfazer as condições indicadas no referido quadro;

Tabela 4 - tempo de reverberação para salas de aula (RRAE, 2008).

Locais	Tempo de reverberação (500 Hz – 2kHz)
Salas de aula, bibliotecas, salas polivalentes e refeitórios	$T \leq 0,15V^{\frac{1}{3}}$ [s]

5 - O edifício, ou qualquer das suas partes, é considerado conforme aos requisitos acústicos aplicáveis, quando, cumulativamente:

d) O valor obtido para o tempo de reverberação, T , diminuído do fator l no valor de 25% do limite regulamentar, satisfaça o limite regulamentar.

Por ter relevância ao focar na importância de recintos dedicados à oratória, analisa-se a seguir, em parte, o artigo 10º-A do RRAE de 2008, que versa sobre auditórios e salas:

1 - Os recintos cuja principal valência corresponda a actividades assentes na oratória, nomeadamente de auditórios, salas de conferência e salas polivalentes, e nas salas de cinema, estão sujeitos aos seguintes requisitos:

a) Tempo de reverberação médio, T , nas bandas de oitava centradas nas frequências de 500 Hz, 1000 Hz e 2000 Hz, a considerar para estes recintos, quando mobilados normalmente e sem ocupação, deve satisfazer ao seguinte:

i) $T \leq 0,12V^{\frac{1}{3}}$, se $V < 250m^3$

ii) $T \leq 0,32V^{\frac{1}{3}} + 0,17\log V$, se $250 \leq V < 9000m^3$

iii) $T \leq 0,05V^{\frac{1}{3}}$, se $V \geq 9000m^3$

,onde V é o volume do recinto, em metros cúbicos.

b) O projecto de condicionamento acústico destes espaços deve incluir um estudo específico

destinado a assegurar uma característica de reverberação adequada no restante espectro de frequências e uma boa inteligibilidade da palavra nos diversos locais do recinto.

7 - A determinação do tempo de reverberação, T , deve ser efectuada em conformidade com o disposto na normalização portuguesa aplicável ou, caso não exista, na normalização europeia ou internacional.

8 - Nas avaliações in situ destinadas a verificar o cumprimento dos requisitos acústicos dos edifícios deve ser tido em conta um fator de incerteza, I , associado à determinação das grandezas em causa.

9 - O edifício, ou qualquer das suas partes, é considerado conforme aos requisitos acústicos aplicáveis, quando, cumulativamente:

a) o valor obtido para o tempo de reverberação, T , diminuído do fator I no valor percentual do limite regulamentar, de acordo com o seguinte, satisfaça o limite regulamentar:

i) 25%, se $V < 250m^3$;

ii) 35%, se $250 \leq V < 9000m^3$;

iii) 40%, se $V \geq 9000m^3$;

Importante, portanto, assinalar que o RRAE estabelece o Tempo de Reverberação como parâmetro essencial para a análise acústicas de edifícios e recintos, e exige-se que os respetivos limites sejam respeitados, caso contrário procedendo-se ajustes aos projetos, para edifícios novos, ou introdução de medidas correctivas, para edifícios existentes¹¹³.

Por fim, o Regulamento Geral do Ruído, em seu artigo 32º, que versa sobre Normas Técnicas, estabelece:

1 - Sem prejuízo do disposto no artigo 3º do presente Regulamento, são aplicáveis as definições e procedimentos constantes da normalização portuguesa em matéria de acústica.

2 - Na ausência de normalização portuguesa, são utilizadas as definições e procedimentos constantes de normalização europeia ou internacional adoptada de acordo com a legislação vigente.

2.13.2 Legislação - outros países

Apresentam-se a seguir partes de legislação de outros países, nomeadamente aquelas relacionadas ao tempo de reverberação.

Em Espanha, o “*DB-HR Protección frente al ruido*” estabelece:

2.2 Valores-limite para o Tempo de Reverberação

¹¹³ Patrício, (2018)

No seu conjunto, os elementos construtivos, acabamentos superficiais e revestimentos que delimitam uma sala de aula ou de conferências, uma sala de jantar e um restaurante, terão absorção acústica suficiente de tal forma que:

a) O tempo de reverberação em salas de aula e salas de conferências vazias (sem ocupação e sem mobiliário), cujo volume seja inferior a 350 m^3 , não será superior a 0,7 s.

b) O tempo de reverberação nas salas de aula e salas de conferências vazias, mas incluindo o número total de assentos, cujo volume seja inferior a 350 m^3 , não será superior a 0,5 s.

Assinala-se também que o mesmo documento básico apresenta (em 3.2.2) como método para calcular o tempo de reverberação, a fórmula de Sabine, desprezando-se neste cálculo a contribuição da absorção do ar em recintos com volume inferior a 250 m^3 . Para normalização, utiliza-se a média dos valores correspondentes às bandas de frequência 500 Hz, 1000 Hz e 2000 Hz. Também é referido o uso do tempo de reverberação de referência, T_0 , a ser utilizado com o valor 0,5s em situações específicas que requeiram normalização em cálculos relacionados a ruído¹¹⁴.

Em França, o Decreto de 25 de abril de 2003 apresenta, em seu artigo 5º, uma tabela com valores-limite para o tempo de reverberação, aqui parcialmente reproduzida¹¹⁵:

Tabela 5 - referências francesas para o tempo de reverberação em locais de ensino (Dec. 25/04/2003).

Local	Tempo de Reverberação, TR (500 Hz – 2 kHz) [s]
<i>Infantários: salas de repouso, salas de exercício e salas de jogos; Locais de ensino, de música, de estudos, atividades práticas, restaurantes/cantinas e salas multiusos com $V \leq 250 \text{ m}^3$</i>	$0,4 \leq TR \leq 0,8$
<i>Locais de ensino, de música, de estudos, atividades práticas com $V > 250 \text{ m}^3$, exceto oficinas(*)</i>	$0,6 \leq TR \leq 1,2$
Salas multiusos com $V > 250 \text{ m}^3$ (**)	$0,6 \leq TR \leq 1,2$ (***)
Outros locais acessíveis aos alunos com $V > 250 \text{ m}^3$	$\leq 1,2$ se $250 \text{ m}^3 \leq V \leq 512 \text{ m}^3$ $\leq 0,15V^{\frac{1}{3}}$ se $V > 512 \text{ m}^3$

(*) Conforme o artigo 8º;

(**) Caso o restaurante/cantina seja usado como multiusos, valores a utilizar são os da sala de refeições;

¹¹⁴ DB HR, (2019)

¹¹⁵ Arrêté 25/04, (2003)

(***) É obrigatório um estudo particular para que a sala apresente uma boa inteligibilidade da fala;

A norma NF S 31-057 é indicada como padrão a utilizar na medição do tempo de reverberação de um recinto. Cita-se ainda a aplicação de um Tempo de Reverberação de Referência, com valor 0,5s, em determinados cálculos relativos a ruído.

2.13.3 Normas técnicas

Analisa-se a seguir algumas normas técnicas de acústica, nos pontos que abordem especificamente o tempo de reverberação.

Na Suécia a norma SS 25268 estabelece requisitos acústicos aplicáveis a edificações, com uma gradação definida de A (maior qualidade acústica) a D (menor qualidade acústica); no que se refere à classe C, de maior abrangência, analisam-se os valores-limites referentes ao tempo de reverberação¹¹⁶.

Tabela 6 - referências suecas para o tempo de reverberação em instalações de ensino (SS 25268).

Instalação	Local	Tempo de Reverberação, TR máximo (250 Hz - 4000 Hz) [s]
Ensino secundário e superior	Salas de aula	0,6
	Salas de música	0,8
	Escritórios, bibliotecas	0,6
	Corredores, entradas	0,8
	Escadarias	1,5

No Reino Unido, o *Building Bulletin 93* (BB 93), de referência obrigatória, “estabelece padrões mínimos de desempenho para a acústica dos edifícios escolares e descreve os meios normais de demonstração da conformidade com os regulamentos de construção”; listam-se a seguir os valores-limite de tempo de reverberação a utilizar, de acordo com a secção 1.5.2¹¹⁷:

¹¹⁶ Silva, (2013)

¹¹⁷ BB 93, (2015)

Tabela 7 - referências do Reino Unido para tempo de reverberação (BB 93).

Tipo de recinto	T_{mf} segundos	
	Nova construção	Renovação
Escola secundária:		
Sala de aula, Área de ensino geral, Sala de seminário, Sala de tutoria, Laboratório de línguas, Sala de estudo (estudo individual, recuperação, preparação de professores), Laboratório de ciências, Design e tecnologia: Resistência dos materiais, área de CAD/CAM, Electrónica/controlo, Têxteis, Alimentação, Gráficos, Área de design/recursos, Sala de informática, arte	≤ 0.8	≤ 1.0
Plano aberto:		
Área de ensino	≤ 0.5 [ver secção 1.8]	≤ 0.5 [ver secção 1.8]
Área de recursos/saída	≤ 1.2 [ver secção 1.8]	≤ 1.2 [ver secção 1.8]
Salas de leitura:		
Pequena (menos de 50 pessoas)	≤ 0.8	≤ 1.0
Grande (mais de 50 pessoas)	≤ 1.0	≤ 1.0
<p>Espaço de ensino destinado especificamente a estudantes com necessidades auditivas ou de comunicação especiais (ver Secção 0.4)</p> <p>T ≤ 0.4 média das bandas de oitava de 125 Hz a 4kHz e T ≤ 0.6 s em toda banda de oitava neste intervalo.²</p> <p>Biblioteca ≤ 1.0 ≤ 1.2</p> <p>Estúdio de teatro ≤ 1.0 ≤ 1.0</p> <p>Átrio, foyer, Hall de entrada, Espaço de circulação não usado para ensino ≤ 1.5 ≤ 2.0</p> <p>Auditório, Salão multiuso (teatro, educação física, apresentação audiovisual, assembleia, música ocasional) 0.8- 1.2¹ 0.8 - 1.5¹</p>		

¹O tempo de reverberação deve estar dentro da faixa indicada, incluindo os valores fornecidos

²Projetos acústicos são comumente necessários para tais salas e devem ser acordados entre um técnico de acústica e o corpo de clientes da escola. Consultar a secção 0.4.

Na Noruega, a norma NS 8175:2012 limita o tempo de reverberação de uma sala de aula, em segundos, a 20% de seu pé-direito, em metros (ou da média de alturas, caso haja variação), com um máximo admissível de 0,6s¹¹⁸.

¹¹⁸ Silva, (2013)

Nos Estados Unidos, a norma ANSI S12.60-2002 estabelece valores-limite para o tempo de reverberação; a tabela a seguir apresenta valores para salas desocupadas e mobiladas. Para salas ocupadas, deve-se diminuir tais números de 0,1 a 0,2s¹¹⁹.

Tabela 8 - referências americanas para o tempo de reverberação (ANSI S12.60-2002).

Espaço de aprendizagem¹	Nível máximo de ruído de fundo constante ponderado em média de uma hora^{2,3} (dB)	Tempo máximo de reverberação para níveis de pressão sonora em bandas de oitava com frequências médias de 500, 1000 e 2000 Hz
Espaço principal de aprendizagem com volume fechado < 283 m ³	35	0.6
Espaço principal de aprendizagem com volume fechado < 283 m ³ and ≤ 566 m ³	35	0.7
Espaço principal de aprendizagem com volume fechado > 566 m ³ e todos os espaços auxiliares de aprendizagem	40 ⁴	5

¹Consultar 3.1.1.1 e 3.1.1.2 para definições de espaços de aprendizagem principais e auxiliares

²Consultar 4.3.1 para limites de níveis de ruído de fundo instáveis (variantes no tempo).

³Consultar 4.3.2 para outros limites de ruído de fundo de serviços e utilidades prediais, incluindo níveis de ruído de fundo constantes ponderados C.

⁴ Quando os corredores forem usados exclusivamente para transporte de ocupantes dentro do edifício escolar e não ocorrem atividades de aprendizagem estruturadas, o limite do nível de ruído de fundo constante ponderado A poderá ser aumentado para 45 dB. A utilização de corredores para fins de aprendizagem formal deve ser evitada

⁵ consultar C3.3 no anexo C para recomendações sobre controle de reverberação nesses espaços

No Brasil, a norma NBR 12179:1992 apresenta as fórmulas de Sabine e de Eyring como método de cálculo do tempo de reverberação, esta última a ser empregada quando coeficiente de absorção sonora for maior que 0,30, além de tabelas com valores de coeficientes de absorção sonora para as bandas de 125, 250, 500, 1000, 2000 e 4000 Hz, e trazer um ábaco de tempo ótimo de reverberação de acordo com usos de recintos. Como critério de aceitação, determina uma divergência admissível de 10% entre o

¹¹⁹ ANSI S12.60, (2002)

tempo de reverberação medido e o tempo de reverberação ótimo previsto¹²⁰.

A norma brasileira NBR 15575 versa sobre desempenho das edificações habitacionais e divide-se em seis partes, das quais destacam-se: a 15575-1:2024, sobre requisitos gerais, que elenca definições e métodos para avaliar o desempenho acústico¹²¹, a 15575-3:2021, que versa sobre requisitos para sistemas de piso e, em seu anexo E, apresenta critérios e níveis de desempenho para ruídos aéreos e de impacto¹²², a 15575-4:2021, que versa sobre vedações verticais internas e externas, trazendo em seu anexo F a análise do desempenho acústico, nomeadamente quanto a ruídos aéreos¹²³, a 15575-5:2021, que versa sobre sistemas de coberturas e, em seu anexo I, apresenta tabelas com recomendações para nível de desempenho e métodos de estimativa do isolamento a ruído aéreo¹²⁴, e por fim a 15575-6:2021, que versa sobre sistemas hidrossanitários, e traz em seu anexo B critérios, métodos e parâmetros de avaliação do desempenho acústico¹²⁵.

Dignas de nota ainda as normas NBR 10151:2020, que versa sobre medição e avaliação de níveis de pressão sonora, a NBR 10152:2020, que traz tabelas com valores de referência para avaliação, estudo e projeto, e as integrantes da NBR 16425, que versam sobre níveis de pressão sonora provenientes de sistemas de transportes e estão parcialmente em desenvolvimento, com algumas já publicadas.

Por fim, a norma ISO 10052:2021, que versa sobre ruídos aéreos e de impacto e apresenta método de medição, utiliza como parâmetro o índice de reverberação, K, expresso em dB e definido por:

$$K = 10 \log \left(\frac{TR}{T_0} \right) \quad (25)$$

A norma ISO 10052:2021 apresenta ainda duas tabelas para aplicação do referido índice, definidas de acordo com uso, volume, estarem os recintos mobilados ou não, duas classificações apresentadas na própria norma e divididas pelas bandas sonoras 125, 250, 500, 1000 e 2000 Hz¹²⁶.

Por fim, as seis normas 12354 do *British Standards Institution*, BSI, versam sobre acústica:

- Parte 1: Isolamento acústico aéreo entre salas
- Parte 2: Isolamento acústico de impacto entre salas
- Parte 3: Isolamento acústico aéreo contra som externo
- Parte 4: Transmissão do som interno para o exterior
- Parte 5: Níveis sonoros devido ao equipamento de serviço
- Parte 6: Absorção sonora em espaços fechados

¹²⁰ NBR 12179, (1992)

¹²¹ NBR 15575-1, (2024)

¹²² NBR 15575-3, (2021)

¹²³ NBR 15575-4, (2021)

¹²⁴ NBR 15575-5, (2021)

¹²⁵ NBR 15575-6, (2021)

¹²⁶ ISO 10052, (2021)

Dentre elas, a já citada BS EN 12354-6:2003 traz um modelo matemático do tempo de reverberação, também já apresentado, em seu anexo D¹²⁷, possuindo caráter apenas informativo. Estas normas são adotadas por: Áustria, Bélgica, República Checa, Dinamarca, Finlândia, França, Alemanha, Grécia, Hungria, Islândia, Irlanda, Itália, Luxemburgo, Malta, Países Baixos, Noruega, Portugal, Eslováquia, Espanha, Suécia, Suíça e Reino Unido.

A norma DIN 18041:2016 estabelece categorias de ambientes de acordo com o uso pretendido (salas de aulas pertencem à categoria A3). Traz ainda equações para calcular o tempo de reverberação requerido (T_{req}), adaptadas a cada categoria e um procedimento de conversão do TR medido em salas desocupadas para comparação com salas ocupadas¹²⁸. De singular importância¹²⁹ é a determinação de um intervalo de tolerância para o tempo de reverberação, através dos parâmetros supracitados.

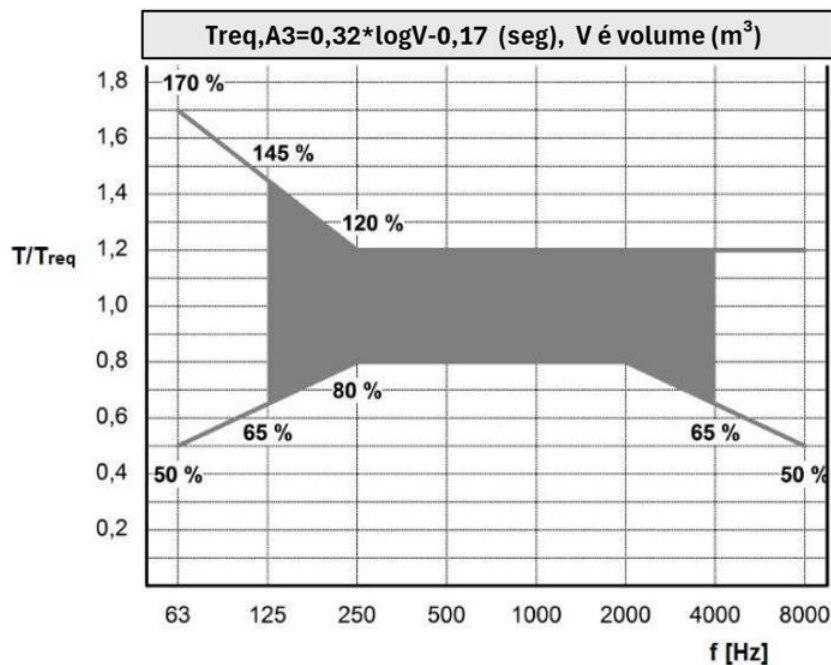


Figura 29 - intervalo de tolerância para o tempo de reverberação requerido (adaptado de Nocke, 2018)

¹²⁷ BS EN 12354-6, (2004)

¹²⁸ Nocke, (2018)

¹²⁹ Beke, (2018)

3. Caso de Estudo

3.1 Análise de Edifícios e Salas de Aula

O Instituto Politécnico do Porto (IPP) agrega, dentre outros, o campus do Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP). A simulação em BIM de salas de aula para obtenção do tempo de reverberação teve como base o campus do ISEP, ilustrado na figura 30, escolhendo-se duas salas em formato de auditório e procedendo-se a escolha de acordo com os dados preexistentes de medição *in situ*¹³⁰. O prédio escolhido, portanto, foi o edifício C.

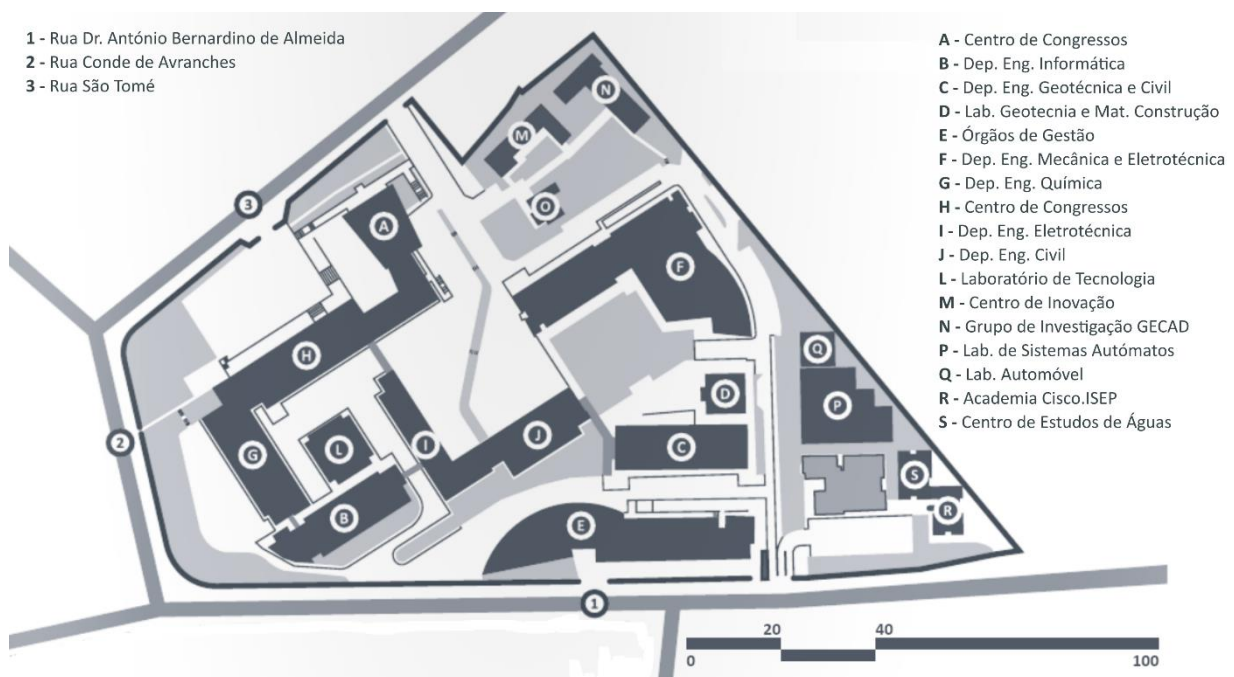


Figura 30 - planta do campus do ISEP (ISEP - Instituto Superior de Engenharia do Porto, [s.d.]).

As salas de aula são numeradas por três algarismos precedidos da letra indicativa dos respectivos edifícios, sendo o primeiro algarismo indicativo do piso em que se encontram. Escolheram-se as salas: C301 e C302 (formato de auditório).

3.1.1 Sala C301

Inserida no bloco C do ISEP, trata-se de sala em forma de auditório. Apresentam-se, abaixo, na figura 31, a sua implantação e características gerais.

¹³⁰ Hupalo, (2017)

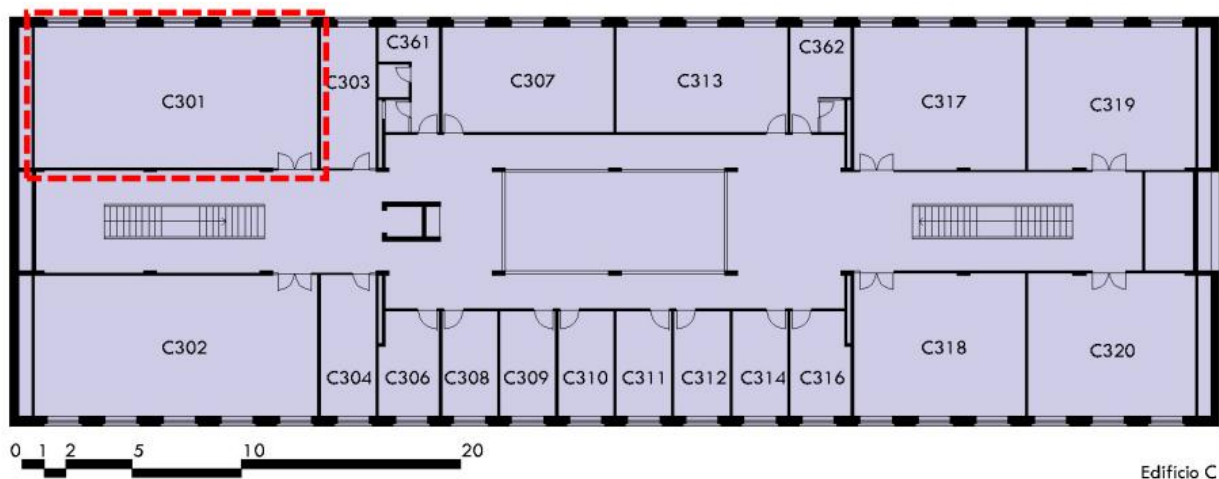


Figura 31 - localização e aspeto visual da sala C301 (autor).

Trata-se de uma sala com planta em formato regular, com geometria definida por ângulos ortogonais e cujos materiais são em quase sua totalidade reflexivos às ondas sonoras: pisos, porta e mobiliário de madeira com resina, paredes em alvenaria pintada, laje pintada aparente, janelas de vidro e PVC e estrutura aparente.

3.1.2 Sala C302

Inserida no bloco C do ISEP, trata-se de sala em forma de auditório, quase simétrica à anterior C301 e dela diferenciada por possuir um aparelho de TV, um duto de AVAC anexo a uma parede e grelhas de tamanhos diferentes, além de degraus de madeira anexos aos patamares, que incorporam tais grelhas, interrompendo uma delas.

Trata-se também de uma sala com planta em formato regular, com geometria definida por ângulos ortogonais e cujos materiais são em quase sua totalidade reflexivos às ondas sonoras, incluindo-se nesta descrição o metal do duto de AVAC e a superfície envidraçada da TV. Apresentam-se, a seguir, na figura 32, a sua implantação e características gerais.

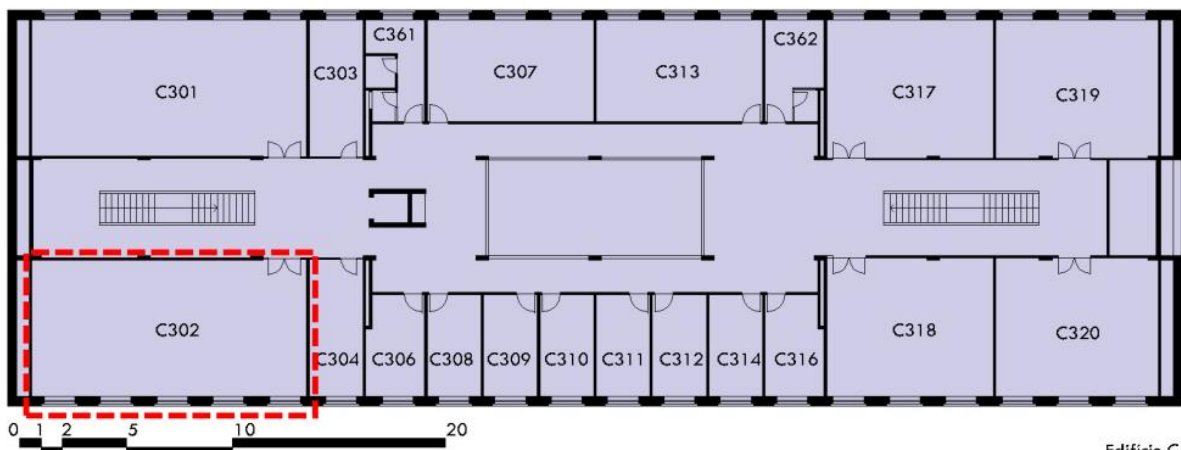


Figura 32 - localização e aspecto visual da sala C302 (autor).

3.2 Metodologia

O presente trabalho, de forma a responder ao problema de pesquisa e atingir os objetivos previamente elencados, simulou o tempo de reverberação para as duas salas, mediante emprego do *software* REVIT, escolha feita em função de sua maior adoção por profissionais de projetos relacionados à construção civil¹³¹ (bem como por haver o oportuno acesso a uma versão estudantil), e os submeteu a validação ao contrapô-los a dados existentes de medição *in situ* deste mesmo parâmetro.

3.2.1 Construção do Experimento

A partir de um desenho de pesquisa quantitativo¹³², traçou-se uma pesquisa experimental; adota-se, também, a abordagem de estudo de caso, focado nas já mencionadas salas do ISEP, utilizando-se simulação com validação através de dados observacionais previamente coletados por HUPALO (2017).

¹³¹ Abanda et al., (2015)

¹³² Creswell e Creswell, (2023)



Figura 33 - elementos componentes do modelo BIM da sala C301 (autor).

Procedeu-se à construção do modelo com vistas a calcular o tempo de reverberação, processo que ocorreu segundo etapas: a primeira consistiu em coleta de dados em uma única sala, nomeadamente a C301, e subsequente construção do modelo BIM. O modelo foi composto mediante a utilização de várias instâncias individuais (figura 33), referentes aos diversos objetos e componentes construtivos da sala; foram categorizados isoladamente (com recurso ao que se denomina por famílias no REVIT), e personalizados de forma a que possuíssem como parâmetros intrínsecos a área superficial (no caso de móveis e equipamentos, definida como a área projetada sobre a superfície sobre a qual estivessem assentes) e o coeficiente de absorção (obtidos em tabelas da literatura específica) individualizados. No entanto, nesta fase inicial, de forma expedita, nem todos os parâmetros do REVIT foram implementados, sendo algumas das áreas, bem como o volume da própria sala, obtidos com recurso ao *software* Autodesk AutoCAD (dados posteriormente confirmados no modelo BIM).

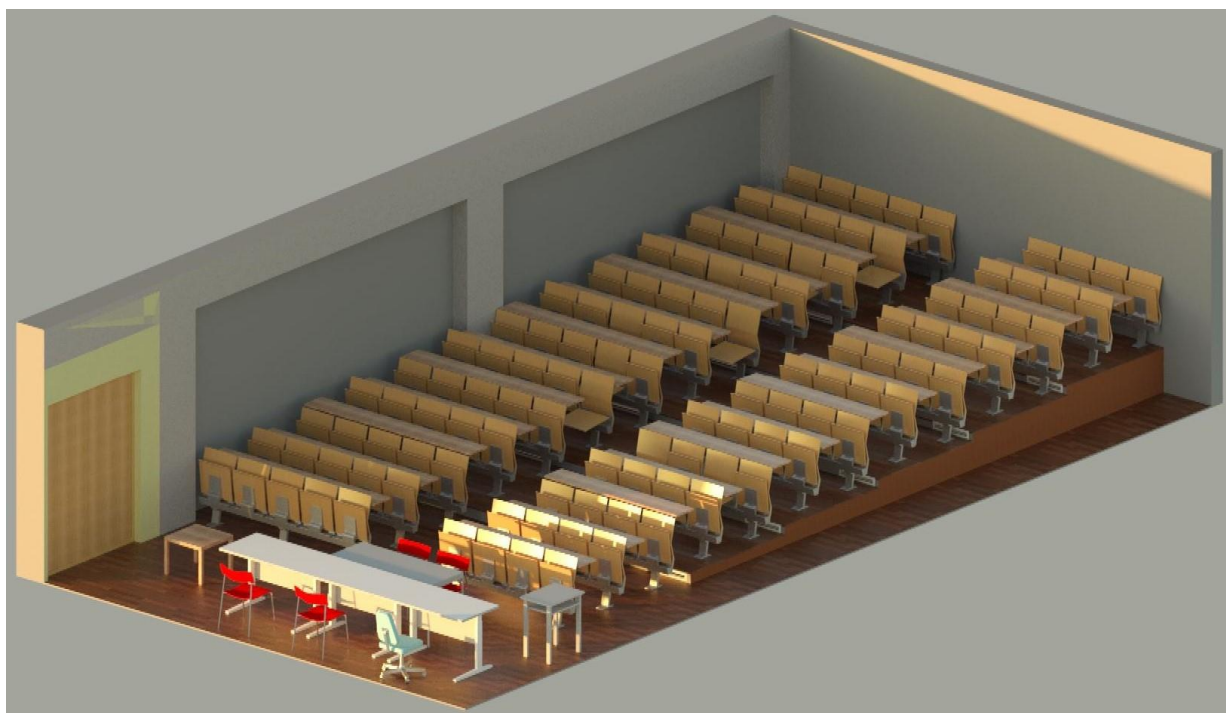


Figura 34 - modelo BIM da sala C301 (autor).

Tratou-se então de estabelecer um primeiro banco de dados de forma a subsidiar a próxima fase, que constituir-se-ia em análise prévia de viabilidade da própria conceção do modelo, de forma a perceber como melhor aliar o modelo matemático ao modelo computacional.

A segunda fase, portanto, foi um marco que, uma vez vencido, ensejou a implementação do modelo BIM propriamente dito (figura 34); baseou-se nos seguintes pontos-chave:

- Modelo matemático – fórmula de Sabine
 - Variável independente S – áreas superficiais dos elementos componentes de cada sala
 - Variável independente α – coeficientes de absorção sonora de cada sala
 - Considerar-se-á uma única variável independente, “unidade de absorção sonora”, gerada por $A = S \alpha$, para cada superfície componente da sala;
 - Variável independente V – volume de cada sala
 - Considerar-se-á V como uma constante para cada sala;
 - Variável dependente TR – tempo de reverberação
- Modelo computacional para testes prévios da equação de Sabine – MS Excel
- Modelo computacional 1 – construído em Autodesk REVIT
- Banco de dados específico – tabelas de coeficientes de absorção sonora
- Restrição – áreas de elementos a interagir sobre superfícies segundo suas projeções ortogonais (pois são assim construídas as tabelas de coeficientes de absorção sonora)

Esta segunda etapa consistiu em uma fase de pré-testes com vistas a analisar a conceção dos elementos reunidos de forma a extrair um valor de tempo de reverberação coerente com o valor disponível

segundo medição *in situ* realizada a contar com a sala ocupada por uma pessoa. Uma vez atingido um valor satisfatório, a conceção do experimento foi considerada viável e pôde-se prosseguir com a terceira etapa, que introduziu:

- Modelo computacional 2 – construído em *Dynamo* para REVIT

Dynamo é a uma interface de programação visual, utilizada para personalizar o fluxo de dados e informações do modelo BIM – a versão “para REVIT” é incorporada ao *software* da Autodesk, a ele especificamente aplicada¹³³.

É importante salientar que trata-se aqui de estudo com amostragem diminuta; portanto, espera-se que o valor obtido na segunda etapa comporte erro, até mesmo em função do carácter expedito da obtenção de alguns dados - tal componente de imperfeição é percebido como inerente a esta fase do método e não se espera que seja de ordem tal que comprometa os resultados finais¹³⁴ – a serem testados.

¹³³ AUTODESK, (2021)

¹³⁴ Creswell e Creswell, (2023)

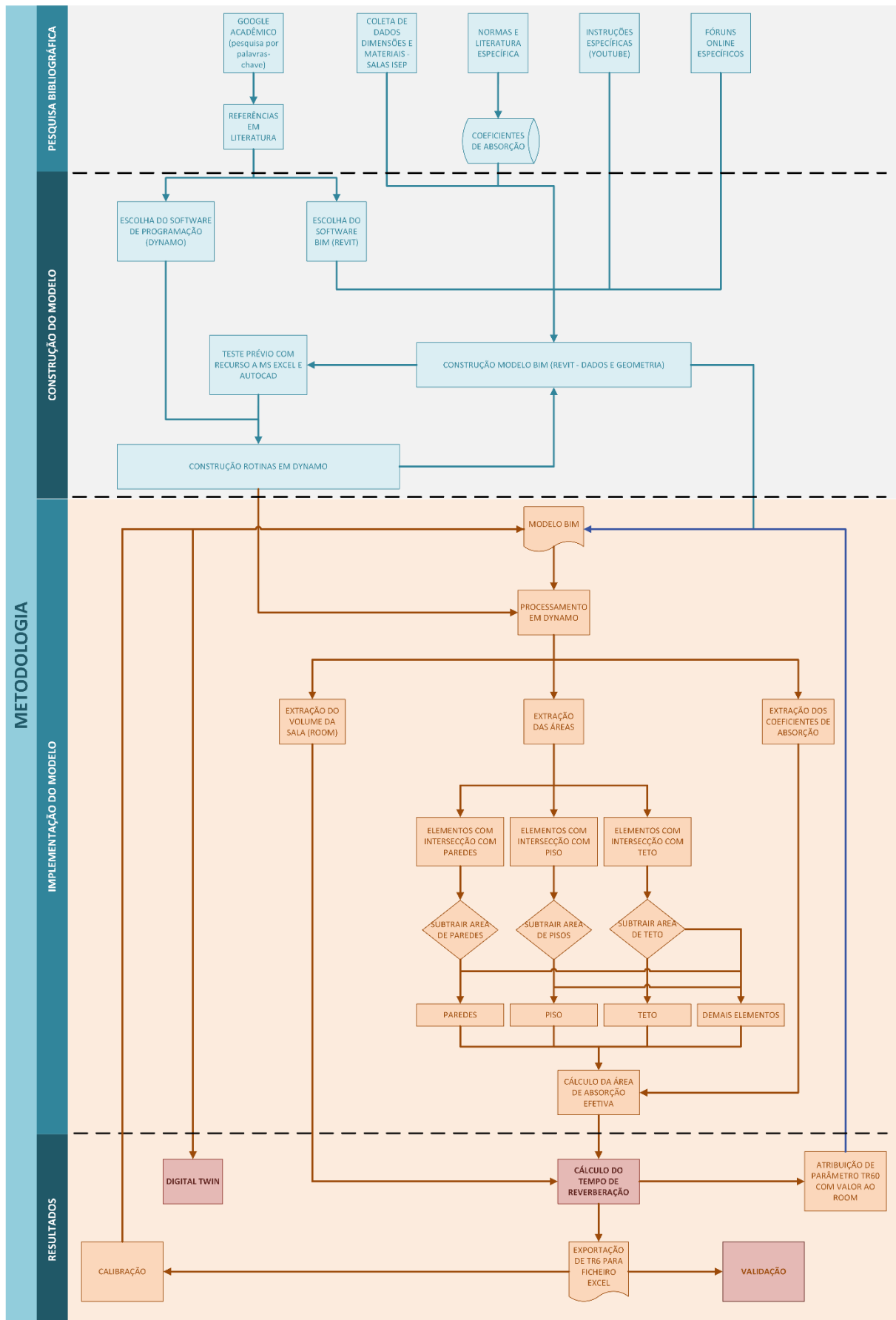


Figura 35 - estrutura da construção do experimento (autor).

Conforme descrito, a interface de programação visual *Dynamo* (figura 36) permitiu selecionarem-se os elementos individuais, adequar os valores de suas áreas segundo as interseções de suas projeções e, de posse dos valores de seus coeficientes de absorção (inseridos no modelo REVIT com recurso à criação de parâmetros de família), proceder ao cálculo do TR pela equação de Sabine.

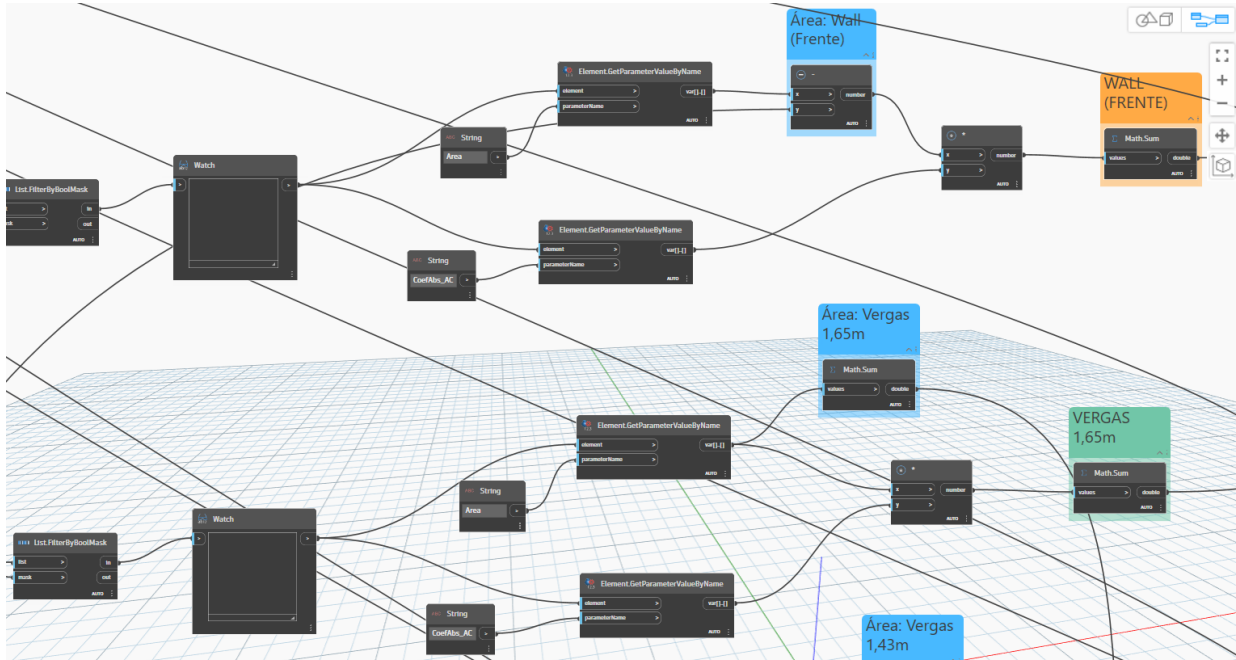


Figura 36 - interface de programação visual *Dynamo* utilizada no experimento (autor).

Em conclusão do processo de programação visual, o valor do tempo de reverberação gerado é exportado para um ficheiro MS Excel, *software* onde proceder-se-á a validação dos resultados.

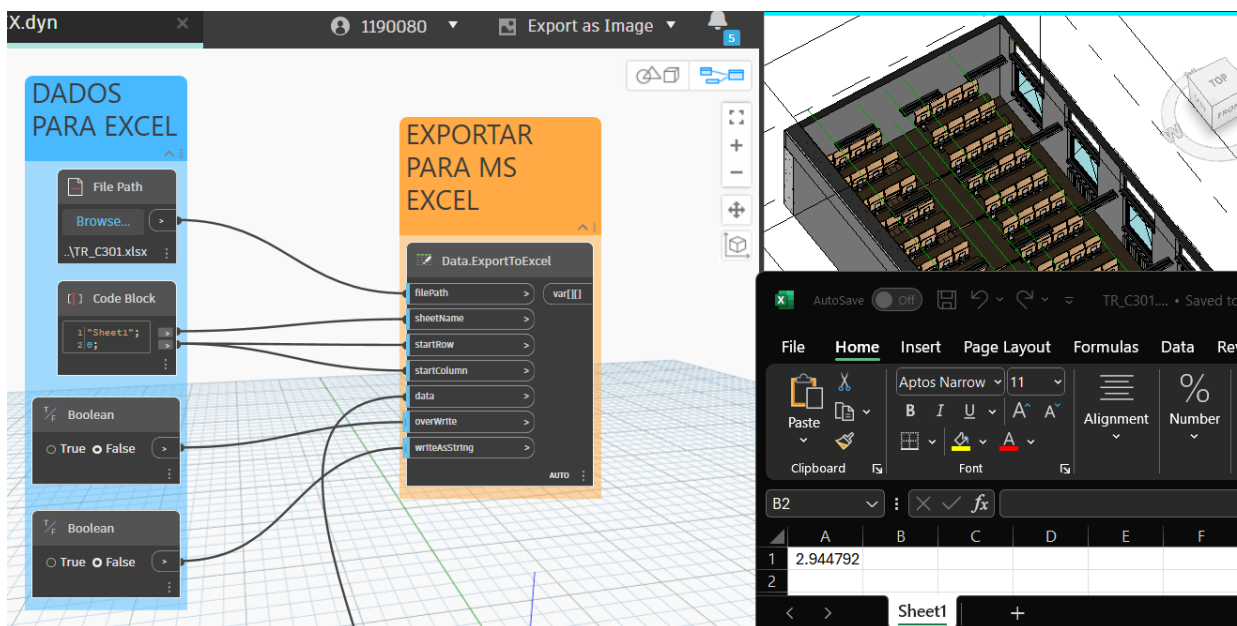


Figura 37 - resultado do tempo de reverberação exportado do REVIT por programação visual para planilha do MS Excel (autor).

Por fim, para demonstrar a utilidade do modelo BIM em ambiente colaborativo (no qual vários profissionais podem aceder aos dados e informações), criou-se um “gêmeo digital” (figura 38), cópia em servidor localizado em nuvem, pela plataforma Autodesk Construction Cloud – torna-se desta forma possível ler os dados de cada elemento de forma individualizada¹³⁵.

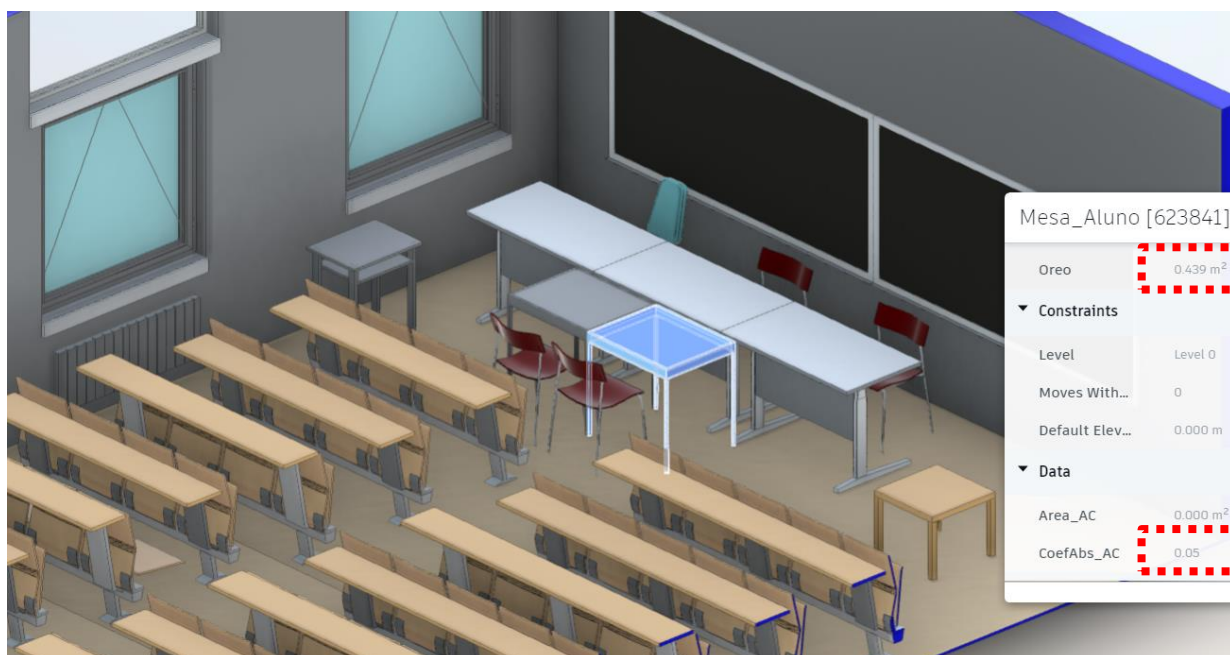


Figura 38 - dados de área e de coeficiente de absorção sonora de uma mesa acessíveis no "gêmeo digital" online.

Uma vez obtidos os resultados, serão analisados para validação em Excel e no programa MatLAB.

3.2.2 Definições do Modelo BIM

Concebido como ferramenta de apoio à tomada de decisão em projeto, o cálculo do tempo de reverberação encontra-se incluído no modelo BIM e define algumas de suas características. Do ponto de vista de desenvolvimento de geometrias (*Level of Geometry*, LOG), situa-se no nível LOG 300, no qual devem-se apresentar geometrias, formas e localizações exatas, bem como quantidades.

Tendo-se em foco, por outro lado, a classificação em função do estágio de desenvolvimento do projeto, pode-se classificar o presente modelo de diversas formas: na classificação estrita de arquitetura britânica (RIBA), sua utilização pode situá-lo tanto no estágio 2, como apoio ao projeto conceitual, ou no estágio 3, como apoio à coordenação espacial¹³⁶; na classificação como nível de detalhe (*Level of*

¹³⁵ AUTODESK, ([s.d.])

¹³⁶ RIBA, (2024)

Detail, LoD), definido apenas como nível de pormenor na apresentação do modelo, situa-se como LoD300, pelo rigor dimensional presente¹³⁷; na classificação segundo o nível de desenvolvimento (*Level of Development, LOD*), definido como quantidade de informação confiável, situa-se como LOD300, por apresentar quantidades de elementos exatas, localizações definidas, bem como pormenores geométricos¹³⁸; importante frisar que a definição de LOD incorpora tanto a definição de LOG quanto a da informação alfanumérica presente no modelo (*Level of Information, LOI*).

Cita-se aqui o conceito de nível de informação necessária (*Level of Information Need, LOIN*)¹³⁹, definido como aplicável a cada projeto de forma particular, de acordo com a definição de cenários e atores específicos, o que impede uma classificação específica para o modelo em estudo.

Por fim, do ponto de vista do nível de maturação de um processo de projeto BIM (figura 39), esta ferramenta de cálculo do tempo de reverberação aplica-se já a um modelo de fase inicial, classificável como Estágio 1, sendo porém utilizável ao longo dos demais estágios do projeto.

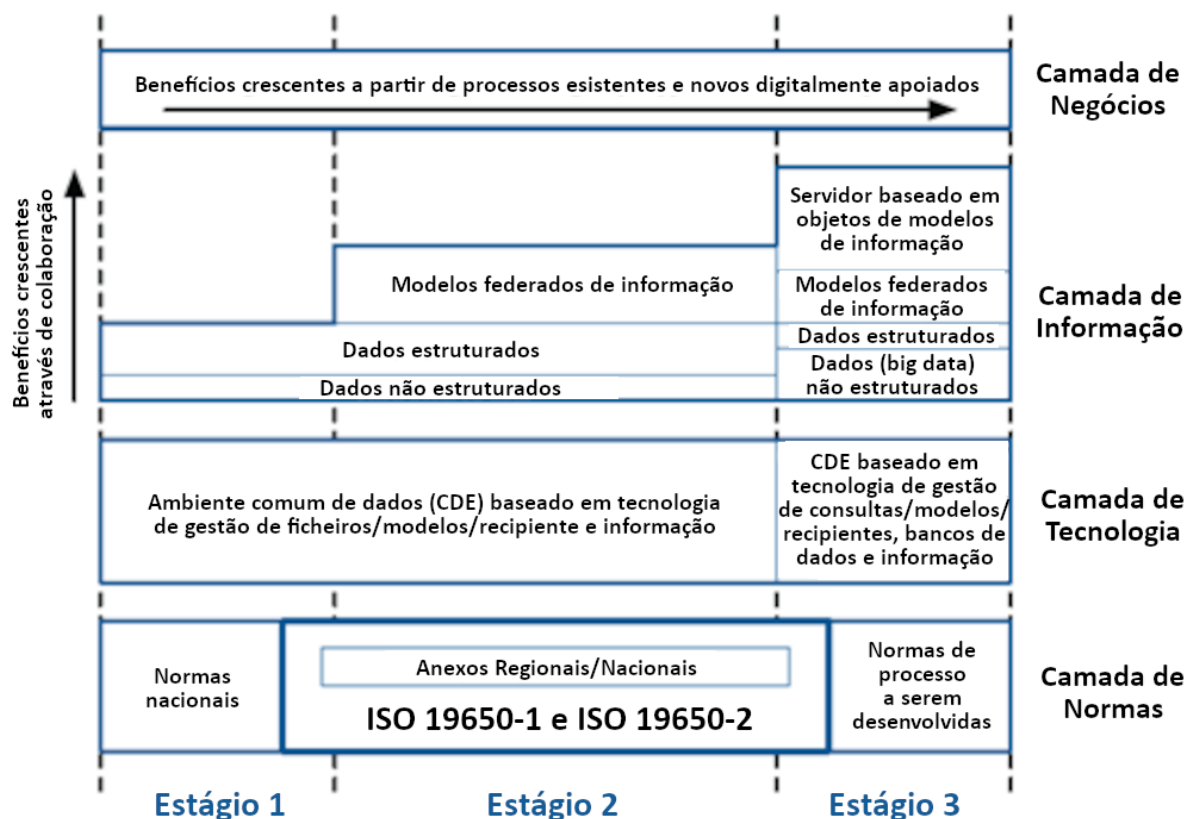


Figura 39 - estágios de maturidade BIM (adaptado de ISO 19650-1, 2018).

¹³⁷ Abualdenien e Borrmann, (2022)

¹³⁸ AUTODESK, ([s.d.])

¹³⁹ ISO 19650-1, (2018)

4 Resultados

4.1 Validação (etapa de testes 1) – sala C301

A análise de dados obtidos pelo modelo (conjunto aqui denominado BIM) deu-se no contexto de validação relativamente a dados preexistentes obtidos por medição em trabalho prévio, ao qual este dá continuidade, em pesquisa empreendida relativamente às salas de aula do ISEP (tal conjunto prévio de dados será aqui denominado HUPALO) e de comparação com dados igualmente preexistentes frutos de modelagem matemática no mesmo trabalho, baseada na equação de Sabine (conjunto aqui denominado SABINE). Como um primeiro passo (figura 40), portanto, realizou-se uma análise estatística descritiva destes três conjuntos e, mediante gráficos simples, sobrepuseram-se os dados obtidos por medição in loco com os simulados em REVIT e os calculados previamente pela equação de Sabine¹⁴⁰. Adicionalmente, foi calculado, segundo os critérios da norma DIN18041:2016, um intervalo de tolerância para o tempo de reverberação ideal da sala C301 – a concluir que os dados indicam que não se atingem os requisitos desejáveis de performance acústica (T_{req} encontrado e usado como referência para a construção do intervalo de aceitação foi 0,60s)¹⁴¹.

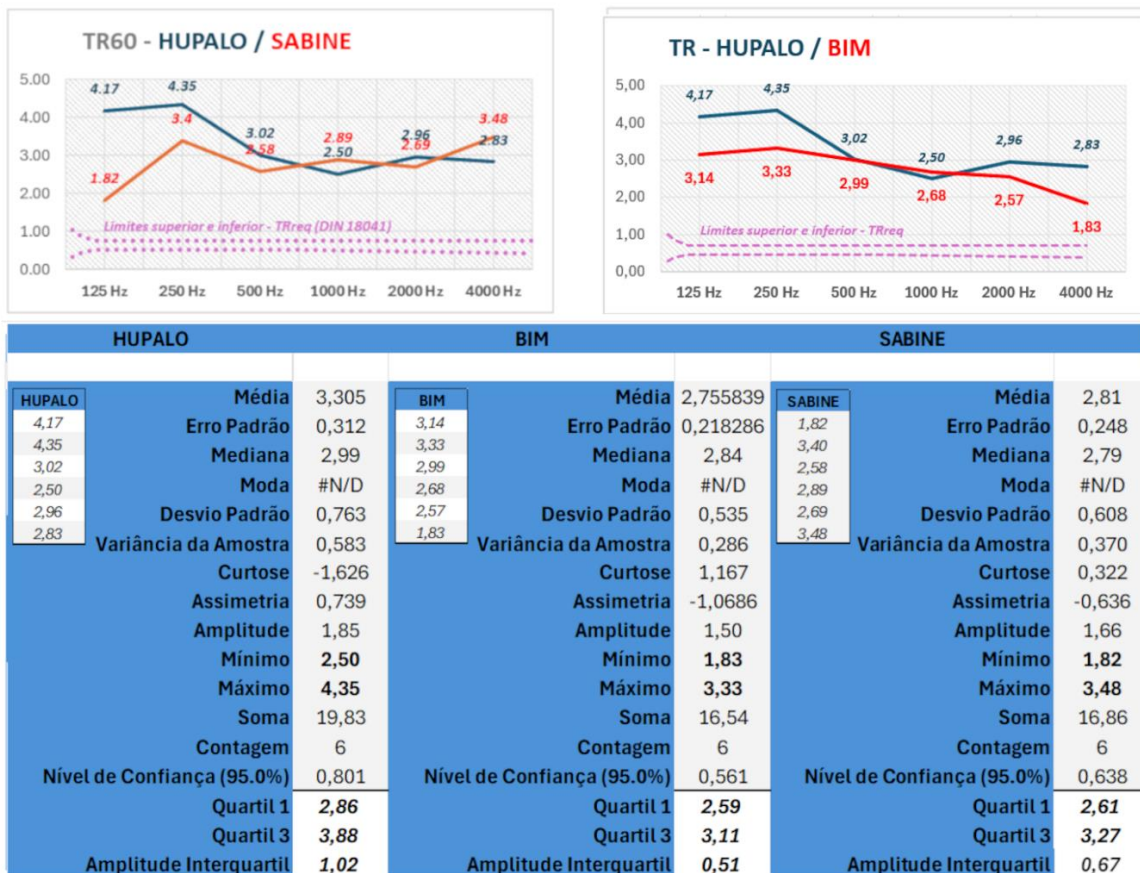


Figura 40 - análise descritiva e comparativa - modelagens da sala C301 (autor)

¹⁴¹ Nocke, (2018)

Embora uma à análise comparativa visual já seja possível, faz-se necessário validar os dados obtidos mediante simulação em REVIT face aos medidos *in loco*. Decidiu-se, portanto, testá-los de forma a determinar se podem ser considerados amostras provenientes da mesma população (definida como tempo de reverberação da sala C301, por banda de frequência). Tal hipótese teve como dificuldades o diminuto tamanho das amostras (n=6), a distribuição desconhecida da própria variável (não sendo possível, por exemplo, afirmar que ela segue uma distribuição normal, distribuição de Poisson, ou outra qualquer); desta forma, recorreu-se a testes de hipótese não paramétricos, que não exigem que as amostras venham de populações com distribuição normal (ou qualquer outra distribuição particular) – em outras palavras, testes livres de distribuição – no entanto, fazem-se necessárias evidências mais fortes, em especial em função de ter-se n=6 como tamanho amostral¹⁴²; assim, uma sequência de testes foi idealizada. Também em função das restrições intrínsecas às amostras, optou-se por não realizar teste de verossimilhança para validação.

Preliminarmente (tabela 9), após constatar-se a ausência de *outliers* nas amostras, foram realizados testes de normalidade, para embasar os argumentos supracitados: tanto a amostra HUPALO quanto a amostra BIM foram submetidas, no *software* MATLAB, aos testes Shapiro-Wilk e Shapiro-Francia¹⁴³.

Tabela 9 - testes Shapiro-Wilk e Shapiro Francia para a sala C301 (autor).

HUPALO <i>não há evidências suficientes para concluir que a amostra HUPALO não segue uma distribuição normal</i>				
Shapiro-Wilk	Observations	Skewness	Kurtosis	W
Var, 1	6	0,5393	1,5854	0,8469
Z	p-value	Nível significância		
1,0432	0,1484	0,05		
REVIT <i>não há evidências suficientes para concluir que a amostra REVIT não segue uma distribuição normal</i>				
Shapiro-Wilk	Observations	Skewness	Kurtosis	W
Var, 1	6	-0,7813	2,558	0,9281
Z	p-value	Nível significância		
-0,1642	0,5652	0,05		
HUPALO <i>não há evidências suficientes para concluir que a amostra HUPALO não segue uma distribuição normal</i>				
Shapiro-Francia	Observations	Skewness	Kurtosis	W
Var, 1	6	0,5393	1,5854	0,8616
Z	p-value	Nível significância		
0,9834	0,1627	0,05		
REVIT <i>não há evidências suficientes para concluir que a amostra REVIT não segue uma distribuição normal</i>				
Shapiro-Francia	Observations	Skewness	Kurtosis	W
Var, 1	6	-0,7813	2,558	0,9224
Z	p-value	Nível significância		
-0,0205	0,5082	0,05		

¹⁴² Triola, (2021)

¹⁴³ Dudley, (2015)

Embora não haja evidência suficiente para rejeitar a hipótese nula (H_0) de que os dados amostrais sejam normalmente distribuídos, uma vez que há sérias limitações a tais testes em função do tamanho amostral, opta-se por encararem-se os resultados com cautela e prosseguir-se com a hipótese de não se poder presumir normalidade.

A seguir, realizou-se também no *software* MATLAB, o teste de Kolmogorov-Smirnov¹⁴⁴ entre as amostras HUPALO e BIM; tal teste não parte de premissas quanto às distribuições das amostras, e tem como hipótese nula (H_0) que ambas provêm de populações com a mesma distribuição. Como resultado, para um nível de significância 0,05, obteve-se um valor-p de 0,8096, não sendo portanto possível rejeitar H_0 . Posteriormente, em relação às amostras HUPALO e BIM, procedeu-se no MATLAB ao teste de Wilcoxon Pareado com Correção de Continuidade¹⁴⁵; tal teste não parte da premissa de que as amostras provêm de populações com distribuição normal, utiliza-se de um ajuste para melhorar a precisão da aproximação, útil ao lidar-se com amostras pequenas, e tem por hipótese nula (H_0) que não há diferença significativa entre as distribuições de onde provêm as amostras do modelo de simulação BIM e as amostras reais de HUPALO. Como resultado, para um nível de significância 0,05, obteve-se um valor-p de 0,4848. Desta forma, não há evidência suficiente para rejeitar a hipótese nula (H_0).

Os resultados dos testes não-paramétricos já permitem avançar com a hipótese de que o modelo BIM conseguiu gerar dados coerentes em relação ao fenômeno do tempo de reverberação, como descrito pela equação de Sabine. No entanto, uma vez que obteve-se, no primeiro passo, certa ambiguidade quanto à distribuição normal das populações correspondentes às amostras, decidiu-se executar um teste simples de variância, no *software* MATLAB¹⁴⁶, mediante o teste não-paramétrico de Levene¹⁴⁷. Tal teste possui como hipótese nula (H_0) que as variâncias dos dados coletados e dos dados simulados são iguais (e as diferenças observadas entre os conjuntos podem ser devidas ao acaso). Como resultado, para um nível de significância 0,05, obteve-se um valor-p de 0,211, portanto não há evidência estatística suficiente para rejeitar a hipótese nula.

A seguir, com o mesmo objetivo, executou-se também no MATLAB o teste F ¹⁴⁸. Tal teste, paramétrico, possui as mesmas hipóteses que o teste de Levene, porém presume normalidade nas distribuições das quais provêm as amostras. Como resultado, para um nível de significância 0,05, obteve-se um valor-p de 0,4531, portanto não há evidência estatística suficiente para rejeitar a hipótese nula. Desta forma, esta primeira fase de testes dá indicação de que o modelo parece aproximar-se de forma satisfatória da amostra coletada, avançando-se portanto no sentido de validar o modelo computacional.

¹⁴⁴ Dudley, (2015)

¹⁴⁵ Dudley, (2015)

¹⁴⁶ MATHWORKS, ([s.d.])

¹⁴⁷ Cleves, (1996)

¹⁴⁸ Triola, (2021)

4.2 Análise dos resultados (etapa de testes 2) – sala C301

Uma vez considerando-se os valores obtidos coerentes face aos coletados, pôde-se avançar em análise comparativa, procedendo-se à comparação das métricas de desempenho do modelo computacional correspondente ao conjunto simulado BIM e dos dados obtidos mediante modelo matemático previamente desenvolvido, correspondente ao conjunto aqui denominado SABINE¹⁴⁹. O objetivo é comparar ambos os modelos quanto a sua capacidade de prever resultados do tempo de reverberação, frente aos dados coletados (ou seja, sua acurácia). Assim, a princípio plotou-se em gráfico o Erro Percentual Médio (EPM, do inglês *APE*, *Average Percentual Error*)¹⁵⁰ para ambos os modelos (figura 41).

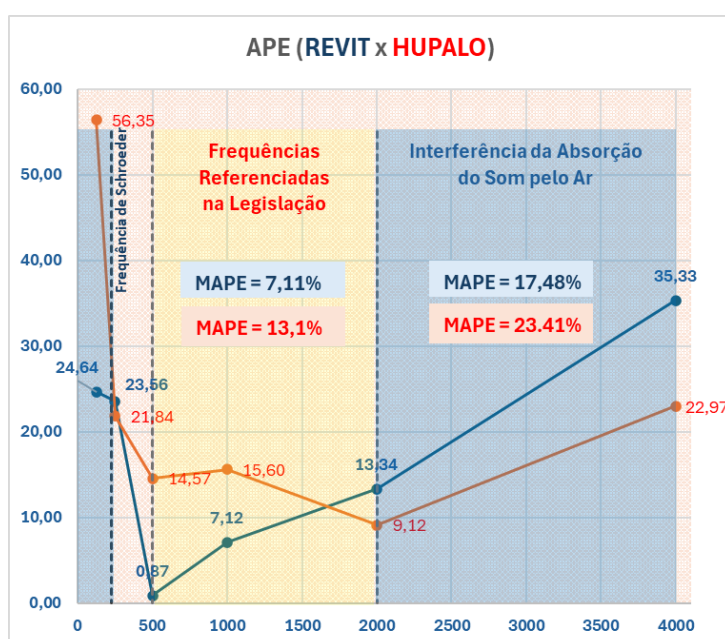


Figura 41 - comparação entre modelo computacional e matemático da sala C301 (autor).

O indicador APE é calculado pela fórmula:

$$APE = 100 \left| \frac{at - ft}{at} \right| \quad (26)$$

na qual at é o valor real (coletado) da variável e ft é o valor previsto pelo modelo analisado.

Para a análise comparativa, tomou-se como métrica de acurácia dos modelos o Erro Percentual Absoluto Médio (EPAM, do inglês *MAPE*, *Mean Absolute Percentage Error*), medida de precisão de previsões indicativa da média da magnitude dos erros (ou resíduos, diferença entre os valores previstos e os valores coletados) em termos percentuais¹⁵¹. O indicador MAPE pode ser calculado através da fórmula:

¹⁴⁹ Hupalo, (2017)

¹⁵⁰ Sefidian, (2022)

¹⁵¹ Hodson, (2022)

$$MAPE = 100 \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \left| \frac{At - Ft}{At} \right| \quad (27)$$

na qual A_t é o valor real (coletado) da variável e F_t é o valor previsto pelo modelo analisado e n é o número de elementos de cada amostra.

Para os cálculos, implementados no *software* Excel, dois cenários foram verificados: o da amplitude total de bandas de frequências, entre 125 Hz e 4000 Hz, e o demarcado pela maioria da legislação europeia e nomeadamente pela portuguesa, no Decreto-Lei n.º 96/2008, definido entre 500 Hz e 2000 Hz. Em ambos os casos, o modelo computacional atingiu redução do MAPE, indicando maior acurácia em relação ao modelo matemático. Interessante frisar que o intervalo definido pela legislação corresponde a taxas de erro médio percentual ainda menores.

A fim de contribuir para a compreensão dos valores obtidos em baixas frequências, assinalou-se ainda no gráfico a frequência de Schroeder, que delimita um limite abaixo do qual há interferência pelos modos acústicos, o que torna os resultados coletados menos confiáveis abaixo deste limite. A frequência de Schroeder foi calculada com a seguinte fórmula¹⁵²:

$$f_{sch} = 2000 \sqrt{\frac{T}{V}} \quad (28)$$

na qual T é o tempo de reverberação e V é o volume da sala (frequência obtida em Hz).

Para cálculo deste T específico, utilizou-se a fórmula do tempo de reverberação requerido (T_{req}) presente na norma DIN 18041:2016 a seguir, definida para salas do tipo A3 (educação):

$$T_{req, A3} = 0,32 * \log V - 0,17 \quad (29)$$

onde V é o volume da sala (tempo de reverberação obtido em s).

Os valores obtidos para TR comportaram-se, portanto, em relação ao erro absoluto médio percentual, de forma coerente com o descrito na literatura e na legislação (ao diferenciarem-se segundo o intervalo específico).

4.3 Validação (etapa de testes 3) – sala C301

A prosseguir com a validação do modelo, decidiu-se testar a relação dos resultados dele provenientes com seus *inputs*, ou seja, analisar a relação entre variáveis dependentes e variáveis independentes, de forma a perceber se a equação de Sabine estava corretamente incorporada para descrever o fenômeno do tempo de reverberação. Assim, decidiu-se por realizar em um primeiro momento um teste não paramétrico: o teste de Spearman, tendo-se como variável dependente o tempo de reverberação e

¹⁵² Shalkouhi, (2009)

escolhendo-se como variável independente a unidade de absorção sonora, definida como $A = S\alpha$; escolheu-se para este teste a parcela da unidade de absorção sonora relativa à presença de uma pessoa em uma cadeira de estudante, cuja área foi definida em literatura¹⁵³ e cujo coeficiente foi encontrado em tabela específica¹⁵⁴. O princípio é o mesmo existente para os demais elementos presentes na sala, sejam superfícies propriamente ditas ou projeções superficiais referentes a elementos como mesas, aquecedores – ou, neste caso, cadeiras ocupadas.

Com o objetivo de analisar como a variável dependente (*output*) se comporta em função de alterações na variável independente (*input*), e a levar-se em consideração que a sala possui capacidade para 117 alunos, calculou-se o valor do tempo de reverberação para sucessivos acréscimos de 10 alunos de forma escalonada, desde o valor mínimo, zero, até um máximo de 110 pessoas. Mediante o uso do *software* *Dynamo* incorporado ao REVIT, tais valores foram obtidos em conjuntos determinados pelas bandas de frequência, partindo-se de um mínimo de 125 Hz até atingir-se um máximo de 4000 Hz.

O teste de Spearman¹⁵⁵ mede a monotonicidade da relação, ou seja, se as variáveis tendem a aumentar ou diminuir juntas (tabela 10); é útil para amostras advindas de populações cuja distribuição não é conhecida e é robusto frente à presença de *outliers* (embora não seja este o caso). Sua hipótese nula (H_0) assume que não há associação monotônica entre as duas variáveis – o coeficiente de correlação de Spearman (ρ) é igual a zero ($\rho = 0$); já sua hipótese alternativa (H_1): assume existir associação monotônica entre as duas variáveis – o coeficiente de correlação de Spearman é portanto diferente de zero ($\rho \neq 0$).

Tabela 10 - teste de Spearman para a sala C301 (autor).

ρ (125 Hz)	ρ (250 Hz)	ρ (500 Hz)	ρ (1000 Hz)	ρ (2000 Hz)	ρ (4000 Hz)
-1	-1	-1	-1	-1	-1
VALOR-P (125)	VALOR-P (250)	VALOR-P (500)	VALOR-P (1000)	VALOR-P (2000)	VALOR-P (4000)
0	0	0	0	0	0

No MATLAB, o valor do coeficiente de correlação de Spearman (ρ) -1, indica uma correlação negativa perfeita, ou seja, quando uma variável aumenta, a outra diminui, em todas as frequências. O p-valor, 0, assinala a rejeição da hipótese nula (H_0) e indica que a correlação encontrada é altamente significativa: a probabilidade de encontrá-la por acaso é praticamente nula.

Em seguida, de forma complementar, optou-se por um teste paramétrico: uma regressão linear realizada no *software* Excel (figura 42), também entre os conjuntos de valores de unidade de absorção sonora e os respectivos tempos de reverberação; atingiram-se resultados *a priori* satisfatórios – com valores do coeficiente de correlação (R) por volta de -0,98 e valores do coeficiente de determinação (R^2) por volta de 0,96. No entanto, apesar de a regressão fornecer mais um elemento para validar o modelo

¹⁵³ Neufert, (2022)

¹⁵⁴ Bobran e Bobran, (1990)

¹⁵⁵ Triola, (2021)

computacional, surge a questão sobre se não seria a própria regressão uma alternativa capaz de representar o fenômeno – o que fragilizaria a justificativa de recorrer-se ao modelo BIM proposto. Assim sendo, a fim de investigar tal questão, percebeu-se, em uma primeira análise, que a distribuição dos erros (resíduos) do modelo de regressão linear apresentou gráficos com padrão em “U” (quando o esperado era uma distribuição aleatória), o que levantou dúvidas sobre sua acurácia ou sobre ser de facto a relação entre as variáveis linear (esperado, uma vez que há várias outras variáveis independentes e não se utilizou uma análise multivariada).

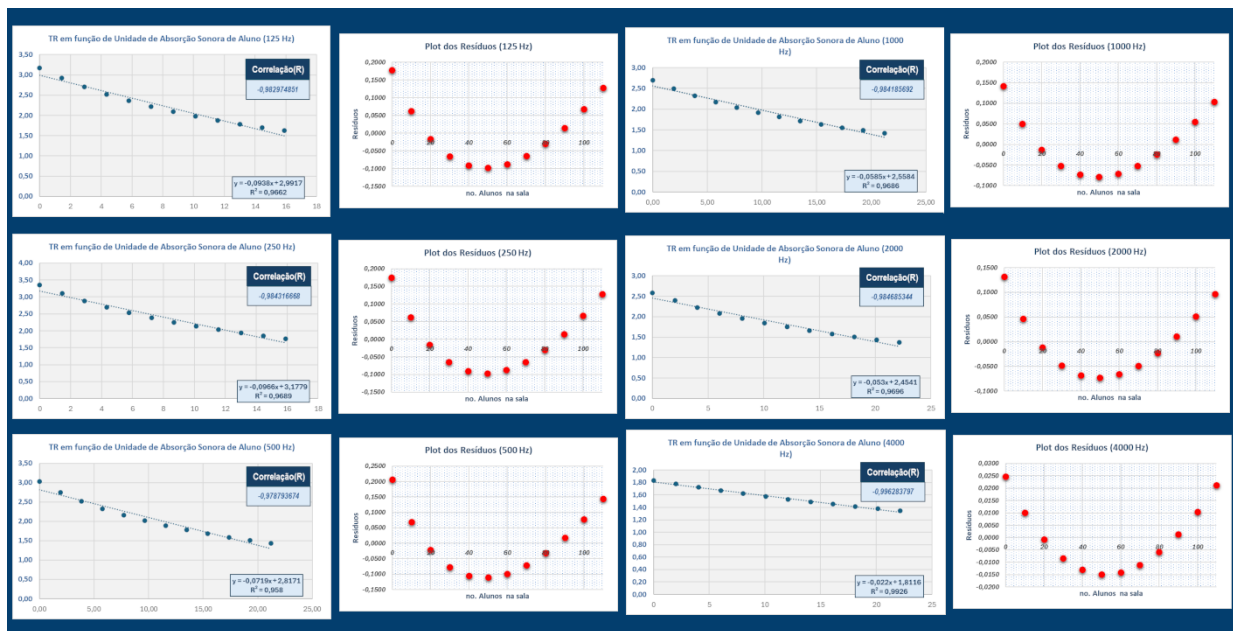


Figura 42 - Regressão linear para sala C301 (autor)

De forma a investigar se a linearidade da relação era um problema, uma regressão quadrática foi realizada, desta vez no *software* MATLAB. Os resultados apresentaram valores do coeficiente de correlação (R) e valores do coeficiente de determinação (R²) ambos a variar por volta de 0,99. Mesmo face a coeficientes de x^2 com valor baixo, o que pode indicar que o termo quadrático pode ser considerado estatisticamente insignificante, e a relação entre as variáveis pode ser bem aproximada por um modelo linear simples, os valores elevados de R e de R² permitem considerar-se esta regressão como alternativa para o modelo. Quanto aos resíduos, o gráfico Q-Q plot¹⁵⁶ ajustam-se a retas diagonais, o que pode indicar atender-se a premissa de sua normalidade; para testar tal premissa, realizam-se testes não paramétricos Kolmogorov-Smirnov¹⁵⁷ – tais testes têm como hipótese nula (H₀) que os dados seguem a distribuição teórica especificada (neste caso, normal); uma vez que o resultado foram valores-p que variaram entre 0,0028 e 0,0037 – muito abaixo do limite 0,05, portanto – conclue-se que eles, de forma unânime, a rejeitaram. De forma a corroborar este resultado, quase todos os gráficos dos

¹⁵⁶ Martinez e Martinez, (2015)

¹⁵⁷ Dudley, (2015)

resíduos apresentaram padrão em “S” (figura 43).

Os modelos de regressão não atenderam algumas premissas, o que reforça ser correta a intenção de sua implementação não para validá-los em si (enfim não há elementos suficientes para isso), mas para utilizá-los na validação o modelo computacional em REVIT e *Dynamo* desenvolvido neste trabalho, mediante demonstração de serem os dados gerados compatíveis com eles – o que mostrou-se acertado, tanto para uma relação linear quanto para uma relação quadrática. Neste sentido, a forte relação entre as variáveis segue demonstrada, estando reforçada a validação pretendida nesta etapa.

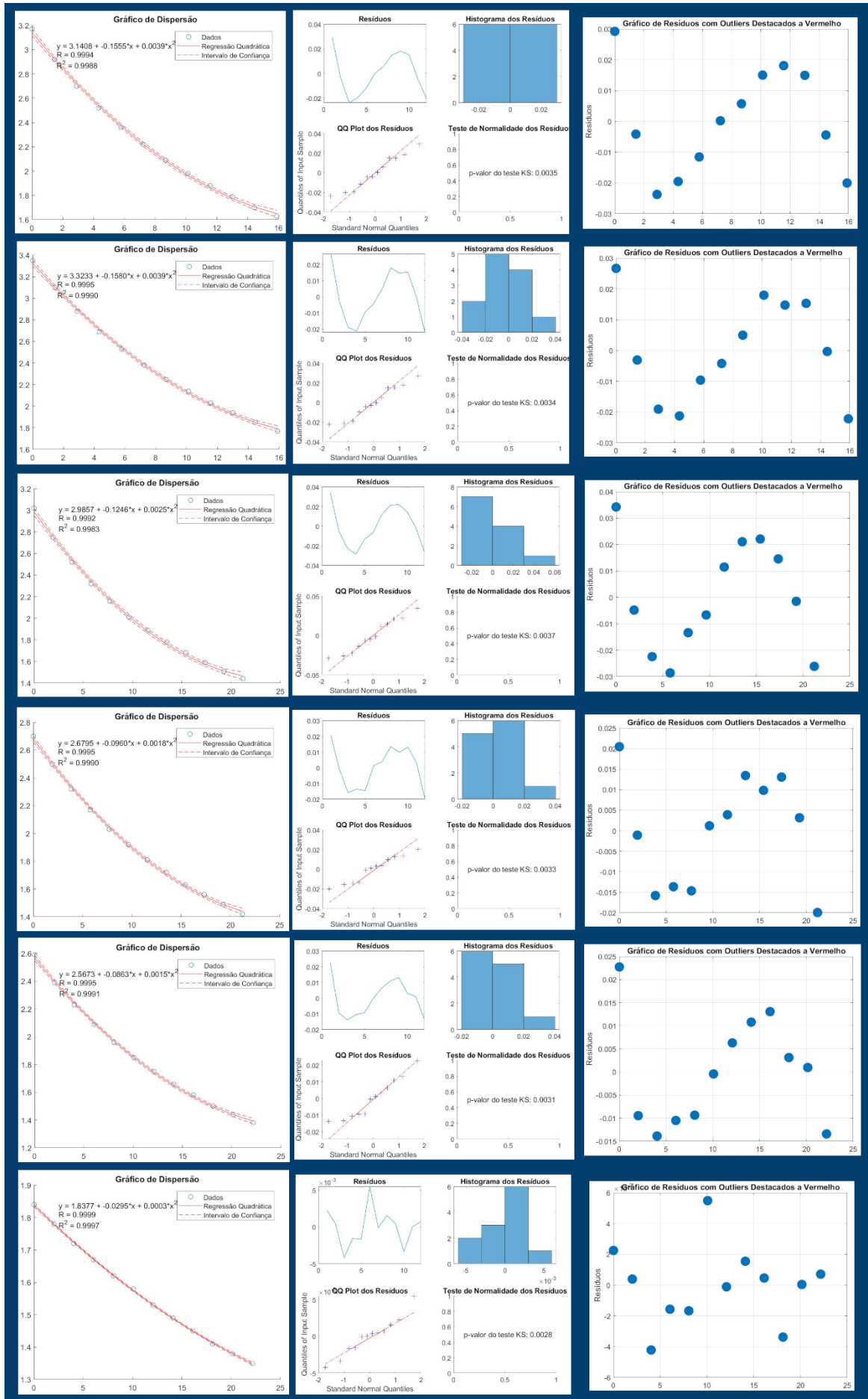


Figura 43 - regressão quadrática para sala C301 (autor)

Por fim, testou-se a regressão quadrática através da homocedasticidade (tabela 11), que indica que a variância dos erros (resíduos) em um modelo de regressão é constante ao longo de todos os valores da variável independente e é premissa para modelos de regressão; assim, foram implementados no MATLAB dois testes de heterocedasticidade: o teste de Breusch-Pagan, e o teste de White, ambos com a mesma hipótese Nula (H_0): a variância dos erros é constante, ou seja, não há heterocedasticidade. Recorreu-se a ambos por terem características complementares, embora fosse possível utilizar apenas um dos testes¹⁵⁸.

Tabela 11 - testes de heterocedasticidade de Breusch-Pagan e de White para a sala C301 (autor).

HETEROCEDASTICIDADE					
<i>checa se a variância dos erros do modelo é constante ao longo dos valores das variáveis independentes</i>					
125 Hz		250 Hz		500 Hz	
Breusch-Pagan	White	Breusch-Pagan	White	Breusch-Pagan	White
<i>valor-p</i>	<i>valor-p</i>	<i>valor-p</i>	<i>valor-p</i>	<i>valor-p</i>	<i>valor-p</i>
0,13	0,29	0,30	0,35	0,20	0,35
1000 Hz		2000 Hz		4000 Hz	
Breusch-Pagan	White	Breusch-Pagan	White	Breusch-Pagan	White
<i>valor-p</i>	<i>valor-p</i>	<i>valor-p</i>	<i>valor-p</i>	<i>valor-p</i>	<i>valor-p</i>
0,48	0,27	0,05	0,07	0,58	0,83

Como resultados, obtiveram-se valores-p (ambos com nível de significância 0,05) segundo os quais (com uma ressalva) não há evidências estatísticas significativas para rejeitar a hipótese nula (H_0).

Ressalva-se a possível ambiguidade dos valores obtidos para a banda de frequência de 2000 Hz, cujo p-valor do teste de Breusch-Pagan ficou pouco abaixo do limite aceitável (o que pode ter múltiplas causas) – o que inspira cautela num possível uso deste modelo de regressão, por comportar certa ambiguidade. Ora, como o objetivo é tão somente verificar a acurácia do modelo computacional, parece válido considerar reforçar-se a validação do modelo computacional: portanto, os diversos modelos de regressão linear e quadrática denotam que o modelo computacional (BIM) explica razoavelmente a variação na variável dependente, indicando um bom ajuste aos dados – consequentemente, não há evidências contra a conclusão de que o modelo em REVIT e *Dynamo* gera dados críveis para o cálculo do tempo de reverberação segundo a equação de Sabine.

4.4 Análise de Sensibilidade (etapa de testes 4) – sala C301

Por fim, analisaram-se os resultados cumulativos de uma redução do tempo de reverberação (figura 44) correspondente à introdução paulatina de alunos na sala de aula (a funcionarem como absorventes de energia sonora). Avaliou-se a mudança percentual da variável dependente (e não a mudança marginal).

¹⁵⁸ Obabire Akinleye A. et al., (2020)



Figura 44 - alteração percentual do TR segundo incremento de alunos para a sala C301 (autor)

Com base em estudo preexistente¹⁵⁹, tomou-se como valor de referência, dentre os valores obtidos, o correspondente à ocupação da sala por 60 alunos (figura 45), uma taxa de 51,28% de ocupação. Estabeleceram-se em seguida duas médias de redução percentual do tempo de reverberação: para a médias de todas as bandas de frequência, de 125 Hz a 4000 Hz, obteve-se uma previsão de redução média de 40,46% no tempo de reverberação; já para o intervalo determinado entre 500 Hz e 2000 Hz, o modelo preditivo tem como valor de saída uma redução média de 42,72%. Importante assinalar que a sala C301, de acordo com medição *in loco* e dados extraídos do modelo BIM, possui um volume de 253,49m³.

Os resultados mostraram-se compatíveis com estudo desenvolvido por Choi (2016), que analisou um grupo de salas de aula com características reflexivas, com volume médio de 253 m³; para uma taxa de ocupação de 55%, observando-se neste trabalho um decréscimo do T30 de 39%; trata-se de valores razoavelmente compatíveis. A estimacão também apontou uma reduçao do tempo de reverberacão ao longo de todas as bandas de frequencia, o que também é compatível com a literatura.

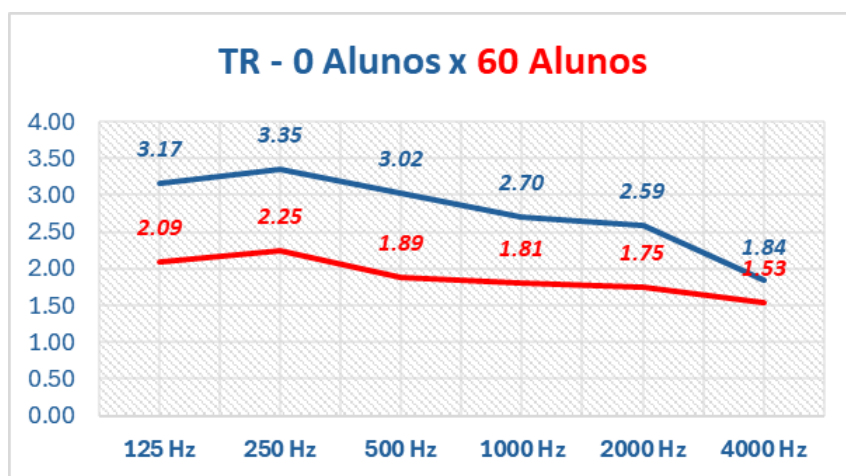


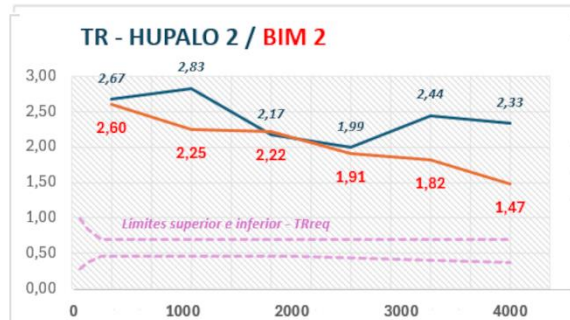
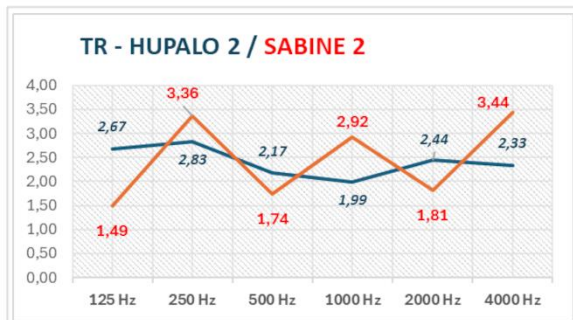
Figura 45 - Resposta da variável TR a ocupação média da sala C301 (autor)

¹⁵⁹ Choi, (2016)

Uma vez que, conforme já exposto, o objetivo não é analisar os modelos de regressão em si, mas sim o modelo computacional, e como ele possui outras variáveis independentes, este valor parece suficiente para considerá-lo adequado ao objetivo de estimar o valor do tempo de reverberação na sala de aula, bem como de adequar-se a mudanças em sua taxa de ocupação. Desta forma, ao fim desta última etapa, as evidências acumuladas apontam para a validação do modelo REVIT e *Dynamo* (BIM), e a repetição de testes complementares ao longo das quatro etapas tendem a diminuir a ocorrência de um possível erro tipo II, (probabilidade β), de não rejeição da hipótese nula quando falsa.

4.5 Validação (etapa de testes 1) – sala C302

Também para a sala C302, a análise de dados obtidos pelo modelo (conjunto aqui denominado BIM 2) deu-se no contexto de validação relativamente a dados preexistentes obtidos por medição (conjunto aqui denominado HUPALO 2) e de comparação com dados frutos de modelagem matemática prévia, baseada na equação de Sabine (conjunto aqui denominado SABINE 2). As mesmas etapas de análise e testes realizadas para a sala C301 foram repetidas, iniciando-se, no *software* Excel, também com análise mediante estatística descritiva e medidas de tendência central (figura 46).



HUPALO 2			BIM 2			SABINE 2		
HUPALO 2	Média	2,41	BIM 2	Média	2,05	SABINE 2	Média	2,46
2,67	Erro Padrão	0,127	2,60	Erro Padrão	0,160	1,49	Erro Padrão	0,359
2,83	Mediana	2,385	2,25	Mediana	2,065	3,36	Mediana	2,365
2,17	Moda	#N/D	2,22	Moda	#N/D	1,74	Moda	#N/D
1,99	Desvio Padrão	0,311	1,91	Desvio Padrão	0,392	2,92	Desvio Padrão	0,879
2,44	Variância da Amostra	0,097	1,82	Variância da Amostra	0,154	1,81	Variância da Amostra	0,773
2,33	Curtose	-1,023	1,47	Curtose	-0,197	3,44	Curtose	-2,785
	Assimetria	0,739		Assimetria	-0,102		Assimetria	0,091
	Amplitude	0,84		Amplitude	1,12		Amplitude	1,95
	Mínimo	1,99		Mínimo	1,47		Mínimo	1,49
	Máximo	2,83		Máximo	2,60		Máximo	3,44
	Soma	14,43		Soma	12,28		Soma	14,76
	Contagem	6		Contagem	6		Contagem	6
	Nível de Confiança (95.0%)	0,327		Nível de Confiança (95.0%)	0,412		Nível de Confiança (95.0%)	0,923
	Quartil 1	2,21		Quartil 1	1,85		Quartil 1	1,76
	Quartil 3	2,61		Quartil 3	2,24		Quartil 3	3,25
	Amplitude Interquartil	0,40		Amplitude Interquartil	0,40		Amplitude Interquartil	1,49

Figura 46 - análise descritiva e comparativa - modelagens da sala C302 (autor)

Após constatar-se a ausência de *outliers* nas amostras, foram realizados testes de normalidade: tanto a amostra HUPALO 2 quanto a amostra BIM 2 foram submetidas, no *software* MATLAB, aos testes Shapiro-Wilk e Shapiro-Francia (tabela 12).

Tabela 12 - testes Shapiro-Wilk e Shapiro Francia para a sala C302 (autor).

HUPALO 2 <i>não há evidências suficientes para concluir que a amostra HUPALO 2 não segue uma distribuição normal</i>				
Shapiro-Wilk	Observations	Skewness	Kurtosis	W
Var, 1	6	0,0764	1,7921	0,9818

Z	p-value	Nível significância
-1,7524	0.9602	0,05

BIM 2 <i>não há evidências suficientes para concluir que a amostra BIM 2 não segue uma distribuição normal</i>				
Shapiro-Wilk	Observations	Skewness	Kurtosis	W
Var, 1	6	-0,0677	2,0682	0,9805

Z	p-value	Nível significância
-1,6868	0.9542	0,05

HUPALO 2 <i>não há evidências suficientes para concluir que a amostra HUPALO 2 não segue uma distribuição normal</i>				
Shapiro-Francia	Observations	Skewness	Kurtosis	W
Var, 1	6	0,0764	1,7921	0,9715

Z	p-value	Nível significância
-3,8641	0.9999	0,05

BIM 2 <i>não há evidências suficientes para concluir que a amostra BIM 2 não segue uma distribuição normal</i>				
Shapiro-Francia	Observations	Skewness	Kurtosis	W
Var, 1	6	-0,0677	2,0682	0,9761

Z	p-value	Nível significância
-2,0627	0,9804	0,05

Mais uma vez, apesar de promissores, opta-se por encararem-se os resultados com cautela. A seguir, realizou-se também no *software* MATLAB, o teste de Kolmogorov-Smirnov¹⁶⁰ entre as amostras HUPALO e BIM; como resultado, para um nível de significância 0,05, obteve-se um valor-p de 0,3180, não sendo portanto possível rejeitar a hipótese nula (H_0 : ambas as amostras provêm de populações com a mesma distribuição).

Posteriormente, em relação às amostras HUPALO 2 e BIM 2, procedeu-se no MATLAB ao teste de Wilcoxon Pareado com Correção de Continuidade¹⁶¹; como resultado, para um nível de significância 0,05, obteve-se um valor-p de 0,1320. Desta forma, não há evidência suficiente para rejeitar a hipótese nula (H_0 : não há diferença significativa entre as amostras do modelo de simulação BIM 2 e as amostras reais de HUPALO 2).

Executou-se em seguida um teste simples de variância, no *software* MATLAB, mediante o teste não-paramétrico de Levene. Como resultado, para um nível de significância 0,05, obteve-se um valor-p de 0,521, portanto não há evidência estatística suficiente para rejeitar a hipótese nula (H_0 : as variâncias dos dados coletados e dos dados simulados são iguais – e as diferenças observadas entre os conjuntos podem ser devidas ao acaso).

¹⁶⁰ Dudley, (2015)

¹⁶¹ Dudley, (2015)

A seguir, executou-se no MATLAB o teste F: para um nível de significância 0,05, obteve-se um valor-p de 0,6149, e não há evidência estatística suficiente para rejeitar a hipótese nula. Há portanto indicação de que o modelo aproxima-se da amostra coletada, e avança-se no sentido da validação.

4.6 Análise dos resultados (etapa de testes 2) – sala C302

Nesta etapa, procede-se à comparação das métricas de desempenho do modelo computacional correspondente ao conjunto simulado BIM 2 e dos dados obtidos mediante modelo matemático previamente desenvolvido, correspondente ao conjunto aqui denominado SABINE 2¹⁶². Plotou-se em gráfico o Erro Percentual Médio (EPM, do inglês *APE*, *Average Percentual Error*) para ambos os modelos, e tomou-se como métrica de acurácia dos modelos o Erro Percentual Absoluto Médio (EPAM, do inglês *MAPE*, *Mean Absolute Percentage Error*)¹⁶³. Para os cálculos, implementados no Excel, os dois cenários já referenciados na sala C301 foram verificados: o da amplitude total de bandas de frequências e o demarcado pela maioria da legislação, assinalando-se no gráfico a frequência de Schroeder (figura 47).

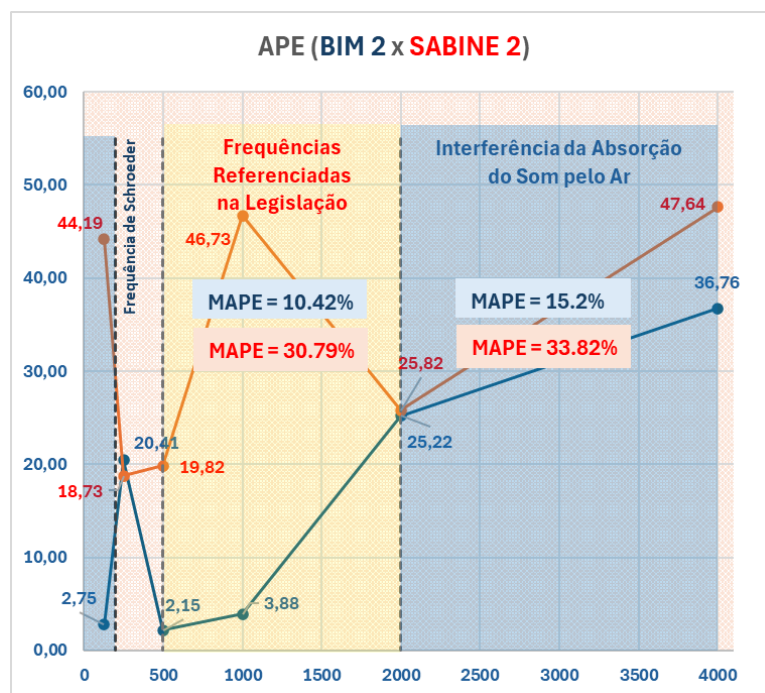


Figura 47 - comparação entre modelo computacional e matemático da sala C302 (autor).

Assim como observado em relação à sala C301, o indicador MAPE indicou, para os dois cenários, um incremento na acurácia do modelo BIM 2, em relação ao modelo SABINE 2.

¹⁶² Hupalo, (2017)

¹⁶³ Hodson, (2022)

4.7 Validação (etapa de testes 3) – sala C302

Nesta etapa, testou-se novamente a relação entre *outputs* com seus *inputs* no MATLAB, mediante o teste não paramétrico de Spearman¹⁶⁴, tendo-se como variável dependente o tempo de reverberação e escolhendo-se como variável independente a unidade de absorção sonora, definida como $A = S_a$, em sua parcela relativa à presença de uma pessoa em uma cadeira de estudante (tabela 13). Mais uma vez calculou-se o tempo de reverberação em diversas bandas de frequência sonora, mediante aumentos sistemáticos da ocupação da sala.

Tabela 13 - teste de Spearman para a sala C302 (autor).

ρ (125 Hz)	ρ (250 Hz)	ρ (500 Hz)	ρ (1000 Hz)	ρ (2000 Hz)	ρ (4000 Hz)
-1	-1	-1	-1	-1	-1
VALOR-P (125)	VALOR-P (250)	VALOR-P (500)	VALOR-P (1000)	VALOR-P (2000)	VALOR-P (4000)
0	0	0	0	0	0

Os resultados $\rho=-1$ indicam uma correlação negativa perfeita, e o p-valor 0 indica que a correlação encontrada é significativa: a probabilidade de encontrá-la por acaso é praticamente nula – em outras palavras, há indícios da relação entre as variáveis.

Complementarmente (figura 48), procede-se uma regressão linear realizada no *software* Excel, também entre os conjuntos de valores de unidade de absorção sonora e os respectivos tempos de reverberação.

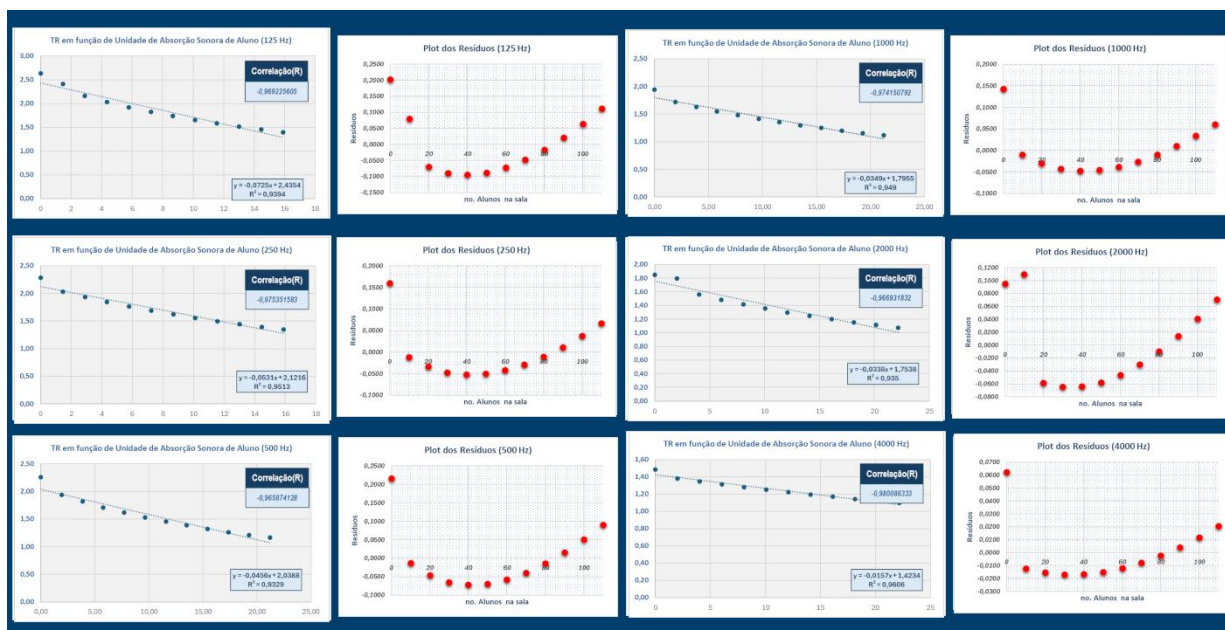


Figura 48 - Regressão linear para sala C302 (autor)

Assim como na sala C301, atingem-se resultados *a priori* satisfatórios – com valores do coeficiente de correlação (R) por volta de -0,97 e valores do coeficiente de determinação (R^2) por volta de 0,94 – a análise da distribuição dos erros (resíduos) do modelo de regressão linear apresentou gráficos com

¹⁶⁴ Triola, (2021)

padrão em “U”. Houve uma diferença no aspeto dos gráficos, intencionalmente produzida: nesta sala, a adição de alunos não foi aleatória, ocorrendo primeiro nas primeiras cadeiras – uma vez que estas situam-se sobre um piso de madeira assente diretamente sobre a laje, possui coeficiente de absorção diferente do piso sobre câmara vazia, sobre o qual estão as demais cadeiras – tal escolha gerou um pico inicial no tempo de reverberação obtido pelo modelo, mais evidente ao analisarem-se os plots de resíduos, o que indica serem as demais variáveis independentes relevantes se um modelo de regressão fosse o objetivo.

A seguir, uma regressão quadrática foi realizada, desta vez no *software* MATLAB (figura 49). Os resultados apresentaram valores do coeficiente de correlação (R) por volta de 0,99 e valores do coeficiente de determinação (R^2) por volta de 0,98. Novamente, o coeficientes de x^2 com valor baixo pode indicar ser o termo quadrático estatisticamente insignificante, e a relação entre as variáveis poderia ser bem aproximada por um modelo linear simples – porém os valores elevados de R e de R^2 permitem considerar-se esta regressão como alternativa para o modelo. Quanto aos resíduos, mais uma vez ajustam-se a retas diagonais no gráfico Q-Q plot¹⁶⁵, o que pode indicar atender-se a premissa de sua normalidade; para testar tal premissa, realizaram-se também neste passo os testes não paramétricos Kolmogorov-Smirnov; uma vez que seu resultado foram valores-p que variaram entre 0,0036 e 0,0054 – muito abaixo do limite 0,05, portanto – conclue-se que eles, de forma unânime, rejeitam a hipótese nula (H_0 : segundo a qual os dados seguiriam uma distribuição normal). De forma a corroborar este resultado, quase todos os gráficos dos resíduos apresentaram padrão em “U” invertido – denota-se ambiguidade, a indicar que um modelo de regressão, embora demonstre a relação entre as variáveis, não a explica, portanto não substitui o modelo computacional (BIM).

Desta forma, assim como em relação à sala C301, a forte relação entre as variáveis segue demonstrada, estando reforçada a validação pretendida nesta etapa.

¹⁶⁵ Martinez e Martinez, (2015)

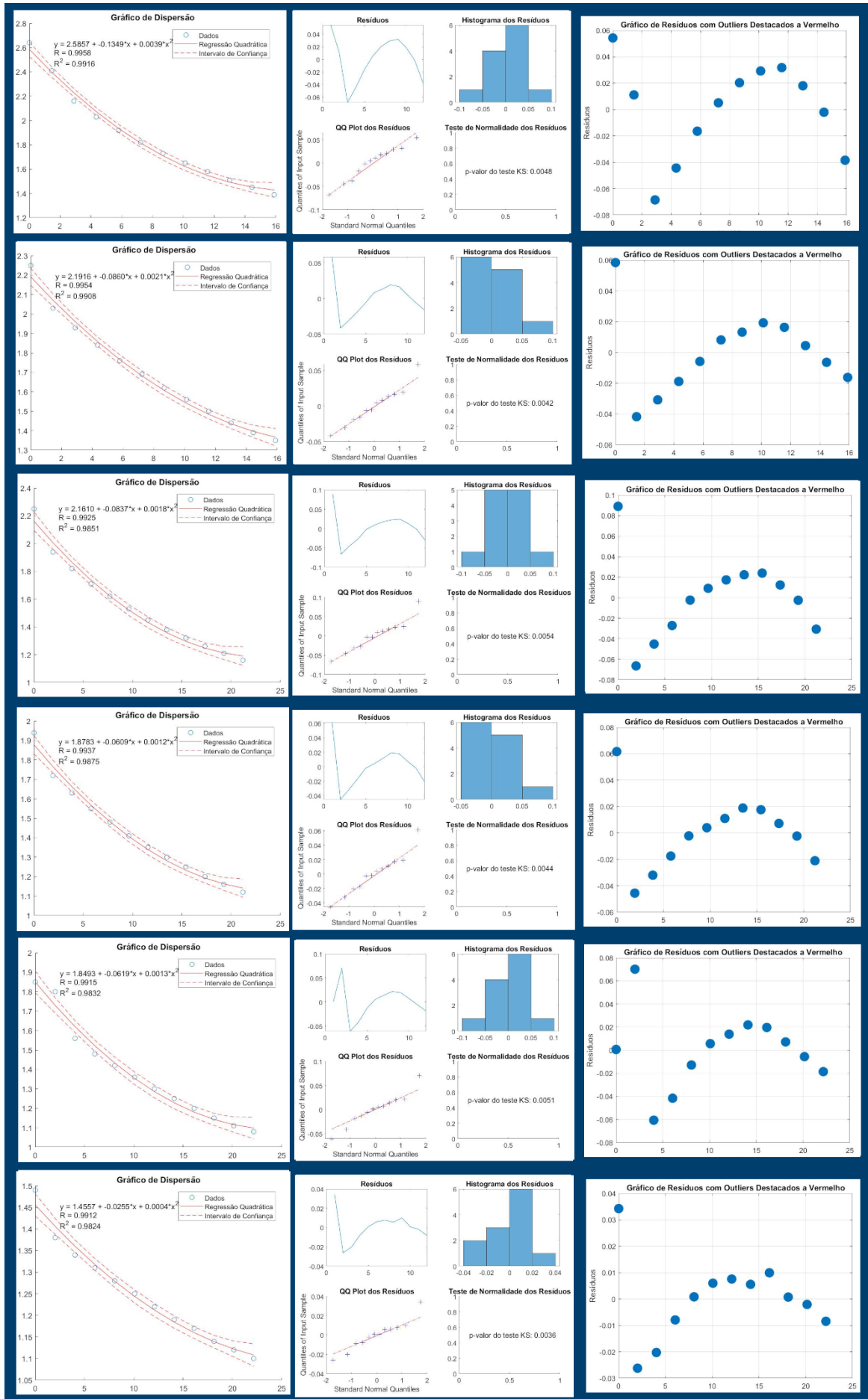


Figura 49 - regressão quadrática para sala C302 (autor)

Por fim (tabela 14), testou-se a regressão quadrática mediante implementação no MATLAB dois testes de heterocedasticidade: o teste de Breusch-Pagan, e o teste de White, novamente recorrendo-se a ambos por terem características complementares¹⁶⁶.

Tabela 14 - testes de heterocedasticidade de Breusch-Pagan e de White para a sala C302 (autor).

125 Hz		250 Hz		500 Hz	
Breusch-Pagan	White	Breusch-Pagan	White	Breusch-Pagan	White
<i>valor-p</i>	<i>valor-p</i>	<i>valor-p</i>	<i>valor-p</i>	<i>valor-p</i>	<i>valor-p</i>
0,08	0,43	0,01	0,02	0,01	0,02

1000 Hz		2000 Hz		4000 Hz	
Breusch-Pagan	White	Breusch-Pagan	White	Breusch-Pagan	White
<i>valor-p</i>	<i>valor-p</i>	<i>valor-p</i>	<i>valor-p</i>	<i>valor-p</i>	<i>valor-p</i>
0,01	0,02	0,05	0,07	0,05	0,02

Os resultados, ao contrário do observado para a sala C301, obtiveram diversos valores-p (ambos com nível de significância 0,05) segundo os quais há evidências estatísticas para rejeitar a hipótese nula (H_0), o que contribui para rejeitar o modelo de regressão quadrática.

Os modelos de regressão linear quadrática gerados de forma a interpretar os dados gerados em diversas bandas de frequência, portanto, podem não explicar a variação na variável dependente, havendo ambiguidade acerca do ajuste aos dados – consequentemente, este modelo não seria indicado para prever o fenômeno do tempo de reverberação.

Quanto ao modelo computacional, a relação entre as variáveis permanece demonstrada; por ser apenas este o objetivo deste conjunto de testes, não se apresentam evidências contra a conclusão de que o modelo em REVIT e *Dynamo* (BIM) gere dados críveis para o cálculo do tempo de reverberação segundo a equação de Sabine.

4.8 Análise de Sensibilidade (etapa de testes 4) – sala C302

Repetiu-se a análise dos resultados cumulativos de uma redução do tempo de reverberação correspondente à introdução paulatina de alunos na sala de aula, avaliando-se a mudança percentual da variável dependente (figura 50).

Com base em estudo preexistente¹⁶⁷, tomou-se como valor de referência, dentre os valores obtidos, o correspondente à ocupação da sala por 60 alunos, uma taxa de 51,28% de ocupação (figura 51). Estabeleceram-se em seguida duas médias de redução percentual do tempo de reverberação: para a médias de todas as bandas de frequência, de 125 Hz a 4000 Hz, obteve-se uma previsão de redução

¹⁶⁶ Obabire Akinleye A. et al., (2020)

¹⁶⁷ Choi, (2016)

média de 45,13% no tempo de reverberação; já para o intervalo determinado entre 500 Hz e 2000 Hz, o modelo preditivo tem como valor de saída uma redução média de 48,10%. Importante assinalar que a sala C302, de acordo com medição *in loco* e dados extraídos do modelo BIM, possui um volume de 244,45m³.



Figura 50 - alteração percentual do TR segundo incremento de alunos para a sala C302 (autor)

Os resultados mostraram-se menos compatíveis que os obtidos na sala C301 em relação ao trabalho desenvolvido por Choi (2016), que analisou um grupo de salas de aula com características reflexivas, com volume médio de 253 m³; para uma taxa de ocupação de 55%, observando-se neste trabalho um decréscimo do T30 de 39%. A estimacão também apontou uma reduçãõ do tempo de reverberaçãõ ao longo de todas as bandas de frequênciã, o que é compatível com o referido estudo.

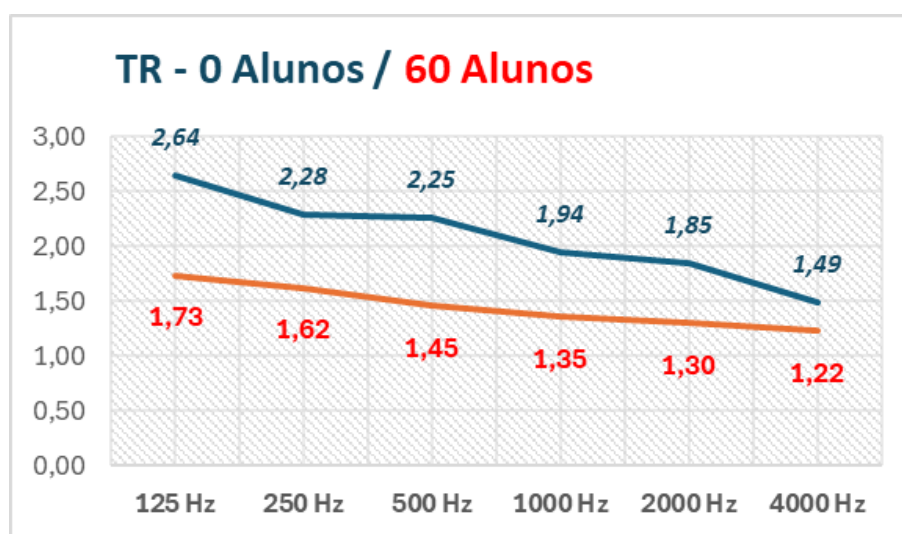


Figura 51 - Resposta da variável TR a ocupaçãõ média da sala C302 (autor)

Desta forma, assinaladas pontuais variações entre as salas, a serem discutida a seguir, ao fim desta última etapa as evidências acumuladas apontam para a validação do modelo REVIT e *Dynamo* (BIM), e a repetição de testes complementares ao longo das quatro etapas tendem a diminuir a ocorrência de um possível erro tipo II, (probabilidade β), de não rejeição da hipótese nula quando falsa.

4.9 Diferenças entre as salas C301 e C302

As salas C301 e C302 possuem características geométricas algo similares, porém seus resultados apresentam diferenças, perceptíveis tanto na coleta de dados quanto no modelo BIM (figura 52).

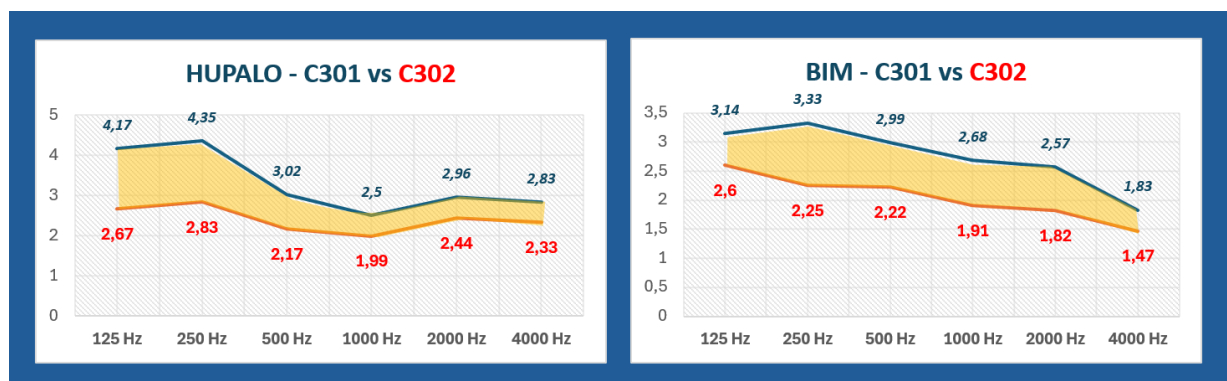


Figura 52 - comparação dos TRs coletados e modelados para ambas as salas (autor).

Tais diferenças podem ser explicadas por haver, na sala C302, um duto de AVAC com várias grelhas, que interage de forma diferente com as ondas sonoras. Embora a hipótese de atuarem como ressonadores¹⁶⁸ seja plausível, o modelo BIM não é capaz de capturar esta interação, limitando-se a atribuir coeficiente de absorção sonora específico a tais elementos. Da mesma forma, há maior área de piso de madeira com espaço na sala C302 que na sala C301, o que também pode implicar no registro de diferentes tempos de reverberação.

¹⁶⁸ Hupalo, (2017)

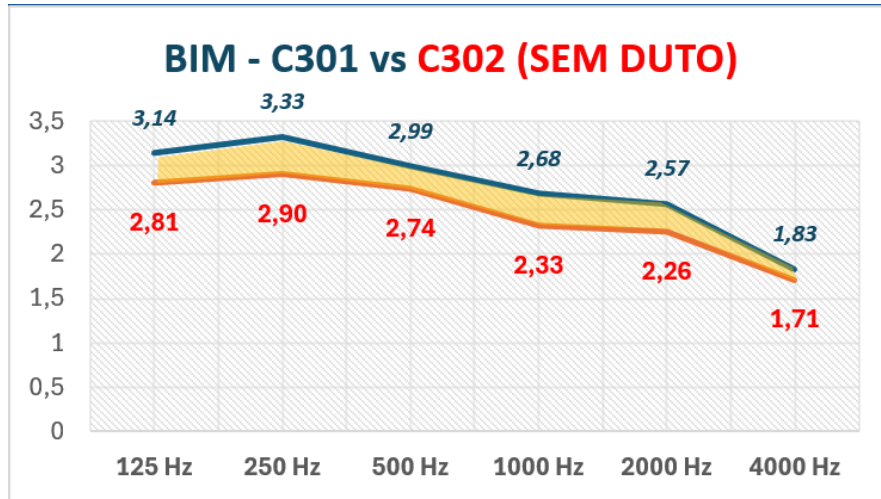


Figura 53 - ajuste dos dados modelados entre as salas após retirada do duto na sala C302 (autor).

De forma a analisar a hipótese da influência do duto na diferença dos resultados entre as salas, realizou-se modelagem da sala C302 após a sua eliminação (figura 53). A alteração dos tempos de reverberação obtidos demonstrou um ajuste a padrão gráfico semelhante ao modelado para sala C301.

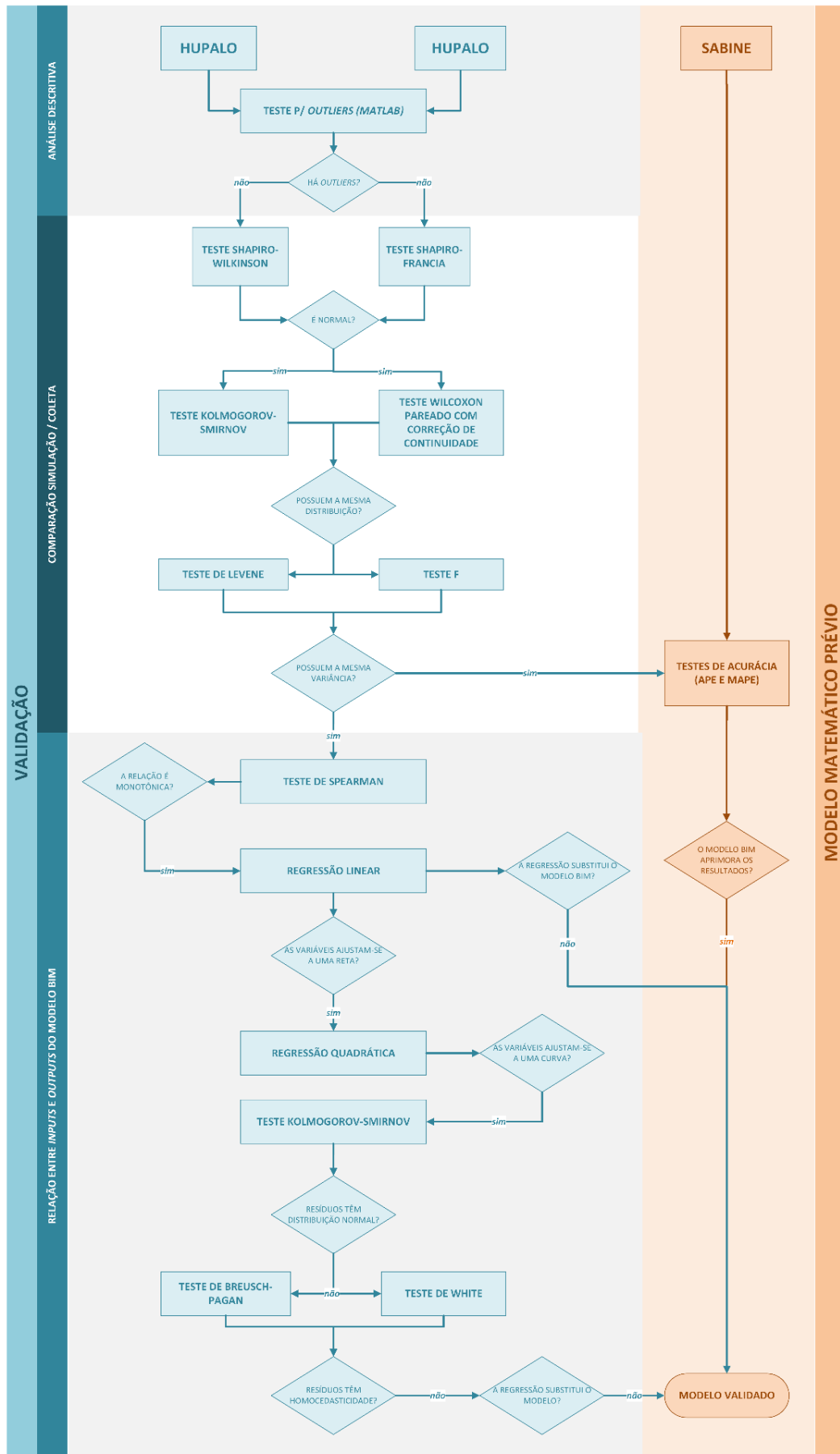


Figura 54 - sequência de testes da fase de validação.

5. Conclusões

5.1 Considerações finais

O presente trabalho propôs uma ferramenta de cálculo do tempo de reverberação: um modelo computacional construído segundo a metodologia de modelagem de informação da construção, com base no modelo matemático estabelecido pela fórmula de Sabine, com foco ao apoio à tomada de decisão projetual.

A revisão da literatura, que debruçou-se sobre o estado da arte na simulação acústica, elencou os diversos métodos para análise do desempenho acústico de ambiente construído correntemente utilizados, e revelou crescente produção científica no estudo e desenvolvimento de alternativas aliadas à metodologia utilizada, confirmando-se a lacuna da incorporação de tais ferramentas a programas de desenvolvimento de projecto.

A pesquisa analisou bancos de dados utilizados para análise acústica, identificando certa heterogeneidade em algumas fontes – assim sendo, optou-se pela adoção, para tabelas de dados de entrada, de um banco referencial de dados único, de forma a alimentar um modelo de simulação acústica de forma coerente. Consolidou-se portanto um banco de dados, opção da qual resultou a tradução do conjunto de tabelas de coeficientes de absorção sonora presentes no abrangente trabalho de Bobran e Bobran (1990). Esta etapa lidou com uma peculiaridade na própria concepção das tabelas, por vezes centradas em objetos e produtos, adequadas à respetiva projeção planar, o que pode incorporar uma taxa de imprecisão, por perderem-se dados relativos à tridimensionalidade.

O estudo teve como resultados tempos de reverberação que mostraram possuir compatibilidade aceitável com a medição previamente realizada no trabalho de Hupaló (2017), sobre a qual desenvolveu-se comparação subsequente. De forma a discutir a aplicabilidade da metodologia de modelagem de informação da construção frente a alternativas, procedeu-se uma comparação com técnicas de regressão (linear e quadrática), que mostraram-se limitadas frente à proposta.

Em conclusão, o modelo foi testado em relação à inserção de elementos acústico-absorventes, de forma a investigar seu possível uso para comparação de cenários de melhoria de desempenho acústico de salas de aula, mediante análise de sensibilidade que se deu segundo a variação percentual do tempo de reverberação obtido pela introdução de alunos (escolha alicerçada em literatura pesquisada¹⁶⁹). Como resultado, o modelo gerou estimações de variação compatíveis com o esperado, o que reforça sua aptidão como ferramenta de apoio à tomada de decisão projectual.

¹⁶⁹ Choi, (2016)

5.2 Críticas e Desenvolvimentos Futuros

5.2.1 Críticas

Abordam-se nesta secção as limitações metodológicas, teóricas e inerentes aos próprios resultados (e suas interpretações) do presente trabalho, por compreender-se esta discussão como essencial para sua inserção no contexto da produção científica presente na área, bem como sua contribuição em relação a pesquisas futuras, e com sorte aprimoramentos no campo de pesquisa.

A metodologia apresentada assenta-se sobre uma ferramenta de modelagem (REVIT) e utiliza-se de uma extensão a ela anexa (*Dynamo*) para introduzir-lhe novas capacidades – concepção que fundamenta-se, como lacuna de pesquisa, na necessidade de maior interoperabilidade entre soluções acústicas e ferramentas de projecto. A complexidade do modelo desenvolvido, no entanto, gera certa dificuldade em sua adaptação a cenários diferentes, cuja importância ainda requer maior estudo.

Do ponto de vista teórico, a escolha da equação de Sabine para representação do tempo de reverberação impõe limitações quanto à geometria do ambiente, pois esta equação possui melhores resultados para salas de formato regular e com distribuição difusa de ondas sonoras. Desta forma, a utilização deste modelo, apesar dos resultados no presente estudo, pode não ser reproduzível para ambientes de composição espacial mais complexa¹⁷⁰. Da mesma forma, a equação de Sabine não comporta fatores como distribuições excepcionais de elementos em uma sala; dado que a concentração de absorção sonora em uma dada área tende a gerar tempos de reverberação maiores que a presença da mesma quantidade de elementos com maior coeficiente de absorção distribuídos de forma uniforme, tem-se também neste ponto uma limitação, a depender da relevância deste aspeto no funcionamento do ambiente construído¹⁷¹.

Em relação às tabelas de coeficientes de absorção, sua própria concepção, de acordo com projeção plana sobre superfícies do ambiente, inclui limitações e pode comportar revisão, de forma a prover bancos de dados mais discretizados, de forma a incorporar aspetos tridimensionais e mais ligados a materiais que a objetos em si e ampliar sua aplicabilidade¹⁷².

Por fim, do ponto de vista da interpretação dos resultados, devem ser compreendidos como apoio a decisões de projecto, no sentido de comparações entre opções analisadas, porém dentro do contexto acima elaborado: salas de aula com formato regular, nas quais a posição da fonte sonora ou de elementos de absorção sonora (alunos inclusive) não seja de maior importância; não se trata de dados precisos de análise de desempenho acústico, portanto.

¹⁷⁰ Shalkouhi, (2009)

¹⁷¹ Bistafa e Bradley, (2000)

¹⁷² Menegotto e Torres, (2019)

5.2.2 Desenvolvimentos futuros

Em consequência do trabalho realizado, elencam-se os possíveis desenvolvimentos:

- Sugestão de pesquisa: face às limitações da equação de Sabine, há como possível desenvolvimento investigar qual modelo matemático de cálculo do tempo de reverberação possui melhores resultados ao ser utilizado em modelo preditivo com implementação em modelagem de informação da construção.
- Melhoria metodológica: face à complexidade do modelo em programação visual em *Dynamo*, há como possível pesquisa a investigação de abordagens de implementação mais incorporada à ferramenta de modelagem, como por exemplo através da interface *Dynamo Player* ou da própria *API* do REVIT, no presente exemplo.
- Aplicação em novas áreas: a revisão das tabelas de coeficientes de absorção sonora, de forma a aplicarem-se valores referentes a mais elementos e materiais, pode ensejar nova pesquisa e aplicações para além da pesquisa aqui abordada, de forma a beneficiar outras aplicações de análise do desempenho acústico.
- Aplicações práticas: apesar de ser este um estudo focado em duas ferramentas específicas (REVIT e *Dynamo*), a programação visual é amplamente utilizada em outras plataformas de modelagem de informação da construção, o que torna este tipo de estudo ampliável e aplicável a outras plataformas – o que potencialmente também abordaria a questão da interoperabilidade entre tais variantes de *software*.

Em conclusão, o presente trabalho insere-se no campo de pesquisa, com vistas a contribuir na forma dos supracitados pontos de aperfeiçoamentos de pesquisa.

6. Referências

- ABANDA, F. H. *et al.* - A critical analysis of Building Information Modelling systems used in construction projects. **Advances in Engineering Software**. . ISSN 09659978. 90:2015) 183–201. doi: 10.1016/j.advengsoft.2015.08.009.
- ABUALDENIEN, Jimmy; BORRMANN, André - Levels of detail, development, definition, and information need: a critical literature review. **Journal of Information Technology in Construction**. . ISSN 1874-4753. 27:2022) 363–392. doi: 10.36680/j.itcon.2022.018.
- AMARAL, Edilberto - Análise Harmônica. **Revista da Pesquisa Agropecuária Brasileira - PAB**. Brasília. 1968) 7–43.
- Acoustical Performance Criteria, Design Requirements, and Guidelines for Schools. **American National Standards Institute, Inc.** (02-
- APA - **Ruído ambiente** [Em linha] [Consult. 7 mar. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://apambiente.pt/ar-e-ruído/ruído-ambiente>.
- Arrêté du 25 avril 2003 relatif à la limitation du bruit dans les établissements de santé. **JORF n° 0123 du 28 mai 2003** (03-
- BAUNETZWISSEN - **Nachhall | Akustik | Glossar** [Em linha] [Consult. 11 mar. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://www.baunetzwissen.de/glossar/n/nachhall-44933>.
- BEKE, P. - Speech Intelligibility and Reverberation Time at Higher Education Teaching Spaces. Em **Proceedings of the Institute of Acoustics**. Cardiff : Institute of Acoustics, 2018
- BISTAFA, Sylvio R. - **Acústica Aplicada ao Controle do Ruído**. 2ª edição ed. São Paulo : Blucher, 2011
- BISTAFA, Sylvio R.; BRADLEY, John S. - Reverberation time and maximum background-noise level for classrooms from a comparative study of speech intelligibility metrics. **The Journal of the Acoustical Society of America**. . ISSN 0001-4966. 107:2 (2000) 861–875. doi: 10.1121/1.428268.
- BISTAFA, Sylvio R.; BRADLEY, John S. - Predicting reverberation times in a simulated classroom. **The Journal of the Acoustical Society of America**. . ISSN 0001-4966. 108:4 (2000) 1721–1731. doi: 10.1121/1.1310191.
- BOBRAN, Hans W.; BOBRAN, Ingrid - **Handbuch der Bauphysik**. 6ª edição ed. Braunschweig : Verlag Vieweg, 1990
- BS EN 12354-6:2003. **British Standards Institution (BSI)** (04-
- Building bulletin 93 - Acoustic design of schools: performance standards. **Department for Education - Education Funding Agency** (15-
- BUTORINA, Marina *et al.* - Implementation of noise data into building information model (BIM) to reduce noise in the environment and at workplace. **IOP Conference Series: Earth and Environmental**

Science. . ISSN 1755-1307. 337:1 (2019) 012083. doi: 10.1088/1755-1315/337/1/012083.

CARVALHO, Vitor Hugo Ribeiro - **Ruídos de Percussão em Salas de Aula - o caso da FEUP**. Porto : FEUP - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Jul. 2015 Dissertação de Mestrado.

CHEN, W. *et al.* - A Methodology for Indoor Human Comfort Analysis Based on BIM and Ontology. Em **36th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2019)**. Banff : [s.n.]

CHOI, Young-Ji - Effect of occupancy on acoustical conditions in university classrooms. **Applied Acoustics**. . ISSN 0003682X. 114:2016) 36–43. doi: 10.1016/j.apacoust.2016.07.010.

CLEVES, Mario A. - Robust tests for the equality of variances. **Stata Technical Bulletin**. STB-25:1996).

AUTODESK - **Construction Management Software | Autodesk Construction Cloud** [Em linha] [Consult. 26 jul. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://construction.autodesk.com/>.

COSTA, Ennio Cruz Da - **Acústica Técnica**. 1ª edição ed. São Paulo : Editora Edgard Blücher LTDA, 2003

CRANDELL, Carl C.; SMALDINO, Joseph J. - Classroom Acoustics for Children With Normal Hearing and With Hearing Impairment. **Language, Speech, and Hearing Services in Schools**. . ISSN 0161-1461. 31:4 (2000) 362–370. doi: 10.1044/0161-1461.3104.362.

CRESWELL, John W.; CRESWELL, J. David - **RESEARCH DESIGN - qualitative, quantitative, and mixed methods approaches**. 6ª edição ed. Thousand Oaks, California : SAGE, 2023

Decreto Legislativo Regional 22/83/A, de 29 de Junho. **Diário da República n.º 147/1983, Série I de 1983-06-29** (83-

Decreto-Lei n.º 9/2007 - Regulamento Geral do Ruído - RGR. **Diário da República n.º 12/2007, Série I de 2007-01-17** (07-

Decreto-Lei n.º 96/2008, de 9 de junho. **Diário da República n.º 110/2008, Série I de 2008-06-09** (08-

Decreto-Lei n.º 129/2002. **Diário da República n.º 109/2002, Série I-A de 2002-05-11** (02-

Decreto-Lei n.º 182/2006, de 6 de setembro. **Diário da República n.º 172/2006, Série I de 2006-09-06** (06-

Decreto-Lei n.º 251/87, de 24 de junho. **Diário da República n.º 142/1987, Série I de 1987-06-24** (87-

Decreto-Lei n.º 292/89, de 2 de setembro. **Diário da República n.º 202/1989, Série I de 1989-09-02** (89-

Decreto-Lei n.º 292/2000, de 14 de novembro. **Diário da República n.º 263/2000, Série I-A de 2000-11-14** (00-

Directiva 2002/49/CE do Parlamento Europeu e do Conselho. **Jornal Oficial das Comunidades Europeias** (02-

Directiva 2003/10/CE do Parlamento Europeu e do Conselho. . 32003L0010 (03-

Documento Básico HR - Protección frente al Ruído. **Real Decreto 732/2019 de 20 de diciembre (BOE 27/12/2019)** (19-12-

DUCOURNEAU, J.; PLANEAU, V. - The average absorption coefficient for enclosed spaces with non uniformly distributed absorption. **Applied Acoustics**. . ISSN 0003682X. 64:9 (2003) 845–862. doi: 10.1016/S0003-682X(03)00047-1.

BROWN, Pat; MAPP, Peter - **Early Decay Time as a System Performance Benchmark** [Em linha], atual. 2010. [Consult. 12 mar. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://www.prosoundtraining.com/2010/03/17/early-decay-time-as-a-system-performance-benchmark/>.

AUTODESK - **Explore - Dynamo BIM** [Em linha], atual. 2021. [Consult. 26 jun. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://dynamobim.org/explore/>.

FREITAS, Vasco Peixoto De - **Manual de Apoio ao Projecto de Reabilitação de Edifícios Antigos**. 1ª edição ed. Porto : Ordem dos Engenheiros da Região Norte, 2012

GIANNI, G. - **Wikimedia Commons** [Em linha], atual. 2010. [Consult. 19 abr. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lambert2.gif>.

GOLDSTEIN, Rhys *et al.* - SpaceAnalysis: A Tool for Pathfinding, Visibility, and Acoustics Analyses in Generative Design Workflows. Em **SimAUD2020**

GÓMEZ ESCOBAR, V.; BARRIGÓN MORILLAS, J. M. - Analysis of intelligibility and reverberation time recommendations in educational rooms. **Applied Acoustics**. . ISSN 0003682X. 96:2015) 1–10. doi: 10.1016/j.apacoust.2015.03.001.

GRANZOTTO, Nicola *et al.* - Influence of Sound-Absorbing Ceiling on the Reverberation Time - Comparison Between Software and Calculation Method EN 12354-6. Em PERNIGOTTO, GIOVANNI *et al.* (Eds.) - **Building Simulation Applications BSA 2022**. Bozen-Bolzano : bozen bolzano university press, Jul. 2022

GROSVELD, Ferdinand W. - **ACOUSTICS AND NOISE CONTROL IN SPACE CREW COMPARTMENTS**. Houston, TX : [s.n.]

HARVEY, Keith - Should Acoustic Simulation Technology be Utilised in Architectural Practice? Does it have the Potential for BIM Integration? **Capstone Experience**. 33:2021).

HODGSON, Murray; NOSAL, Eva-Marie - Effect of noise and occupancy on optimal reverberation times for speech intelligibility in classrooms. **The Journal of the Acoustical Society of America**. . ISSN 0001-4966. 111:2 (2002) 931–939. doi: 10.1121/1.1428264.

HODGSON, Murray; NOSAL, Eva-Marie - Effect of noise and occupancy on optimal reverberation times for speech intelligibility in classrooms. **The Journal of the Acoustical Society of America**. . ISSN 0001-4966. 111:2 (2002) 931–939. doi: 10.1121/1.1428264.

HODSON, Timothy O. - Root-mean-square error (RMSE) or mean absolute error (MAE): when to use them or not. **Geoscientific Model Development**. 15:2022) 5481–5487.

HUPALO, Cristiane - **Reverberação nas Salas do ISEP**. Porto, Portugal : Instituto Superior de Engenharia

do Porto, Jul. 2017 Dissertação de Mestrado.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO) - **ISO 11654:1997 - Acoustics — Sound absorbers for use in buildings — Rating of sound absorption**. [S.l.] : ISO, 1997

ISEP - **Instituto Superior de Engenharia do Porto** [Em linha] [Consult. 25 jun. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://www.isep.pt/ISEP/Campus>.

Field measurements of airborne and impact sound insulation and of service equipment sound - Survey method. **ISO (International Organization for Standardization)** (21-

ISO 19650-1 - Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) Information management using building information modelling - Part 1: Concepts and principles. Genebra. 2018) 1–34.

JACOBSEN, Finn *et al.* - **FUNDAMENTALS OF ACOUSTICS AND NOISE CONTROL**. 1ª edição ed. Copenhagen, Denmark : DTU Elektro, Acoustic Technology, 2008

JEONG, Cheol-Ho - Design, simulation, and virtual prototyping of room acoustics: challenges and opportunities. Em **24th International Congress on Acoustics**. Gyeongju : [s.n.]

DUDLEY, R. M. - KOLMOGOROV-SMIRNOV AND MANN-WHITNEY-WILCOXON TESTS. 2015).

KUTTRUFF, Heinrich - **ROOM ACOUSTICS**. 4ª edição ed. Aachen, Alemanha : Spon Press, Taylor & Francis Group, 2000

ELECTRONICS, L. A. - **What is White Noise Used For in Audio Testing?** [Em linha] [Consult. 10 mar. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://www.learningaboutelectronics.com/Articles/What-is-white-noise-used-for-in-an-audio-lab>.

ELECTRONICS, L. A. - **What is Pink Noise Used For in Audio Testing** [Em linha] [Consult. 10 mar. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://www.learningaboutelectronics.com/Articles/What-is-pink-noise-used-for-in-an-audio-lab>.

LEE, Joonhee; NIK-BAKHT, Mazdak - BIM-based Simulation for Analysis of Reverberation Time. Em Lei n.º 102/2009. **Diário da República, 1.ª série — N.º 176 — 10 de Setembro de 2009** (09-

AUTODESK - **Levels of Development (LOD) in BIM | Autodesk** [Em linha] [Consult. 28 jun. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://www.autodesk.com/solutions/bim-levels-of-development>.

LORETO, Samantha DI *et al.* - Comparison between Predictive and Measurement Methods of Speech Intelligibility for Educational Rooms of Different Sizes with and without HVAC Systems. **Energies**. . ISSN 1996-1073. 16:6 (2023) 2719. doi: 10.3390/en16062719.

LUBISICH NELSON, Elsa *et al.* - Background Noise Levels and Reverberation Times in Old and New Elementary School Classrooms. **Journal of Educational Audiology**. 14:2008).

MARTINEZ, Wendy L.; MARTINEZ, Angel R. - **Computational Statistics Handbook with MATLAB**. [S.l.] : Chapman and Hall/CRC, 2015. ISBN 9780429168215.

MATHWORKS - **Multiple-sample tests for equal variances - MATLAB vartestn** [Em linha] [Consult. 31 86

ago. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://www.mathworks.com/help/stats/vartestn.html>.

MENEGOTTO, José Luis; TORRES, Julio Cesar Boscher - Integração de simulador acústico em ferramenta de modelagem BIM. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**. . ISSN 1980-6809. 10:2019) e019020. doi: 10.20396/parc.v10i0.8653934.

MOGAS RECALDE, Jordi; PALAU, Ramon; MÁRQUEZ, Marian - How classroom acoustics influence students and teachers: A systematic literature review. **Journal of Technology and Science Education**. . ISSN 2013-6374. 11:2 (2021) 245. doi: 10.3926/jotse.1098.

MOGAS-RECALDE, Jordi; PALAU, Ramon; MÁRQUEZ, Marian - How classroom acoustics influence students and teachers: A systematic literature review. **Journal of Technology and Science Education**. . ISSN 2013-6374. 11:2 (2021) 245. doi: 10.3926/jotse.1098.

MONTENEGRO, Victor Díez; AGNOLIN, Sebastien; DUCRUET, Pascal - Development of an architectural acoustic study through a complete Open BIM workflow. Em **Euronoise 2021**. Madeira : Sociedade Portuguesa de Acústica (SPA), Out. 2021

MUHAMMAD, Imran; HEIMES, Anne; VORLÄNDER, Michael - Interactive real-time auralization of airborne sound insulation in buildings. **Acta Acustica**. . ISSN 2681-4617. 5:2021) 19. doi: 10.1051/aacus/2021013.

Tratamento acústico em recintos fechados. **ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas** (92-Edificações habitacionais - Desempenho - Parte 1: Requisitos gerais. **ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas** (24-Edificações habitacionais - Desempenho - Parte 3: Requisitos para os sistemas de pisos. **ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas** (21-Edificações habitacionais - Desempenho Parte 4: Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas - SVVIE. **ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas** (21-Edificações habitacionais - Desempenho - Parte 5: Requisitos para os sistemas de coberturas. **ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas** (21-Edificações habitacionais - Desempenho - Parte 6: Requisitos para os sistemas hidrossanitários. **ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas** (21-

NELSON, Elsa Lubisich *et al.* - Background Noise Levels and Reverberation Times in Old and New Elementary School Classrooms. **Journal of Educational Audiology**. 2008).

NEUBAUER, R.; KOSTEK, B. - PREDICTION OF THE REVERBERATION TIME IN RECTANGULAR ROOMS WITH NON-UNIFORMLY DISTRIBUTED SOUND ABSORPTION. **Archives of Acoustics**. 26:3 (2001) 183–2001.

NEUBAUER, Reinhard O. - Estimation of Reverberation Time in Rectangular Rooms with Non-Uniformly Distributed Absorption Using a Modified Fitzroy Equation. **Building Acoustics**. . ISSN 1351-010X. 8:2 (2001) 115–137. doi: 10.1260/1351010011501786.

NEUFERT, Ernst - **Arte de Projetar em Arquitetura**. 42. ed.

NIJS, Lau; RYCHTÁRIKOVÁ, Monika - Calculating the Optimum Reverberation Time and Absorption Coefficient for Good Speech Intelligibility in Classroom Design Using U50. **Acta Acustica united with Acustica**. . ISSN 16101928. 97:1 (2011) 93–102. doi: 10.3813/AAA.918390.

NIJS, Lau; RYCHTÁRIKOVÁ, Monika - Calculating the Optimum Reverberation Time and Absorption Coefficient for Good Speech Intelligibility in Classroom Design Using U50. **Acta Acustica united with Acustica**. . ISSN 16101928. 97:1 (2011) 93–102. doi: 10.3813/AAA.918390.

NOCETI FILHO, Sidnei - **FUNDAMENTOS SOBRE RUÍDOS** [Em linha], atual. set. 2018. [Consult. 10 mar. 2024]. Disponível em

WWW:<URL:https://www.researchgate.net/publication/327740850_FUNDAMENTOS_SOBRE_RUIDOS >.

NOCKE, Christian - DIN 18041 - a German view. Em **Euronoise 2018**. Creta : European Acoustics Association (EAA), Mai. 2018

NOWOŚWIAT, Artur; OLECHOWSKA, Marcelina - Investigation Studies on the Application of Reverberation Time. **Archives of Acoustics**. . ISSN 2300-262X. 41:1 (2016) 15–26. doi: 10.1515/aoa-2016-0002.

OBABIRE AKINLEYE A. *et al.* - Comparison of Different Tests for Detecting Heteroscedasticity in Datasets. **Anale. Seria Informatică**. XVIII:2 (2020) 78–84.

OLECHOWSKA, Marcelina *et al.* - The influence of the distribution of sound absorbing materials on the estimation of reverberation time in rooms. **E3S Web of Conferences**. . ISSN 2267-1242. 49:2018) 00078. doi: 10.1051/e3sconf/20184900078.

PARDO-QUILES, Domingo; RODRIGUEZ, Jose-Victor; RODRIGUEZ-RODRIGUEZ, Ignacio - PARDOS: An Educational Software Tool for the Analysis of Sound Propagation. **IEEE Access**. . ISSN 2169-3536. 8:2020) 194933–194949. doi: 10.1109/ACCESS.2020.3033894.

PATRÍCIO, Jorge - **Acústica nos Edifícios**. 7ª edição ed. Porto : Quântica Editora, 2018

PETERS, R. J.; SMITH, B. J.; HOLLINS, Margareth - **Acoustics and Noise Control**. 3ª edição ed. New York, NY : Routledge, 2013

PHOTINOS, Panos - **The Physics of Sound Waves**. 2ª edição ed. [S.l.] : IOP Publishing, 2021. ISBN 978-0-7503-3539-3.

PINHO, P. G. *et al.* - Aspects concerning the acoustical performance of school buildings in Portugal. **Applied Acoustics**. . ISSN 0003682X. 106:2016) 129–134. doi: 10.1016/j.apacoust.2016.01.002.

RAMIRES, Fabiana - **COEFICIENTE DE ESPALHAMENTO SONORO DE PAINÉIS PERFURADOS**. Campinas, SP : Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, 2011

RANE, Nitin - Integrating Building Information Modelling (BIM) and Artificial Intelligence (AI) for Smart Construction Schedule, Cost, Quality, and Safety Management: Challenges and Opportunities. **SSRN** 88

Electronic Journal. . ISSN 1556-5068. 2023). doi: 10.2139/ssrn.4616055.

REDON, Milan - **What is A-Weighting?** [Em linha] [Consult. 9 mar. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://www.ansys.com/blog/what-is-a-weighting>.

RIBA - **RIBA Plan of Work** [Em linha], atual. 2024. [Consult. 28 jun. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://www.architecture.com/knowledge-and-resources/resources-landing-page/riba-plan-of-work>.

ROBIN, Olivier *et al.* - Measurement of the absorption coefficient of sound absorbing materials under a synthesized diffuse acoustic field. **The Journal of the Acoustical Society of America**. . ISSN 0001-4966. 136:1 (2014) EL13–EL19. doi: 10.1121/1.4881321.

ROSÃO, Vitor; CONCEIÇÃO, Eusébio - APLICAÇÃO INFORMÁTICA LIVRE PARA CÁLCULO SEGUNDO A EN 12354-6 DE TEMPO DE REVERBERAÇÃO EM ESPAÇOS COM ABSORÇÃO SONORA IRREGULAR. Em **TECNIACUSTICA 2013**. Valladolid : [s.n.]

ROSENHOUSE, G. - The essence of noise in nature with reference to acoustics. Em

SÁ, K. S. *et al.* - Acústica e BIM – Comparação de resultados e procedimento de simulação para isolamento acústico entre software. Em **FIA 2020/2022**. Florianópolis : [s.n.]

SAVIOJA, Lauri; SVENSSON, U. Peter - Overview of geometrical room acoustic modeling techniques. **The Journal of the Acoustical Society of America**. . ISSN 0001-4966. 138:2 (2015) 708–730. doi: 10.1121/1.4926438.

SEFIDIAN, A. M. - **A guide on regression error metrics (MSE, RMSE, MAE, MAPE, sMAPE, MPE) with Python code** [Em linha], atual. 2022. [Consult. 31 ago. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://sefidian.com/2022/08/18/a-guide-on-regression-error-metrics-with-python-code/>.

SHALKOUHI, P. Jafari - Classroom Reverberation Time Based on the Sabine Equation. **Building Acoustics**. . ISSN 1351-010X. 16:4 (2009) 357–359. doi: 10.1260/135101009790291255.

SILVA, Bruno Martinho Pereira Da - **Análise do Efeito de Difusores Suspensos na Medição do Coeficiente de Absorção Sonora em Câmara Reverberante**. Porto : FEUP - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Fev. 2022 Dissertação de Mestrado.

SILVA, Carlos Miguel Ferreira E - **O Tempo de Reverberação e a Inteligibilidade da Palavra**. Porto, Portugal : FEUP - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Jul. 2013 Dissertação de Mestrado.

SILVA, Juliano Lima Da *et al.* - Programação em Plataforma BIM e a Norma de Desempenho Brasileira: Desenvolvimento de uma aplicação para estimativa de performance acústica em projetos arquitetônicos. Em **SIGraDi 2017, XXI Congreso de la Sociedad Ibero-americana de Gráfica Digital**. Concepción, Chile : [s.n.]

DUDLEY, R. M. - SOME NONPARAMETRIC TESTS. 2015).

CRESCENDO, Atelier - **Sound propagation, reflection, absorption and transmission** [Em linha], atual. 2024. [Consult. 29 mar. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://ateliercrescendo.ac/sound-propagation-reflection-absorption-and-transmission/>.

STEENEKEN, Herman J. M.; HOUTGAST, Tammo - Basics of the STI-measuring method. Em WIJNGAARDEN, S. J. VAN (Ed.) - **International Symposium on Speech Transmission Index (STI)**. ZG Soesterberg, The Netherlands : TNO Human Factors, 2002

TAN, Y. *et al.* - Improve Indoor Acoustics Performance by Using Building Information Modeling. Em **34 International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2017)**

DUDLEY, R. M. - THE SHAPIRO-WILK AND RELATED TESTS FOR NORMALITY. 2015).

TRIOLA, Mario F. - **Elementary Statistics**. 14ª edição ed. [S.l.] : Pearson, 2021

VORLÄNDER, Michael - Computer simulations in room acoustics: Concepts and uncertainties. **The Journal of the Acoustical Society of America**. . ISSN 0001-4966. 133:3 (2013) 1203–1213. doi: 10.1121/1.4788978.

VORLÄNDER, Michael - **Auralization - Fundamentals of Acoustics, Modelling, Simulation, Algorithms and Acoustic Virtual Reality**. 2ª edição ed. Aachen, Germany : Springer, 2020

VRASQA, A. T. - **VRASQA Academy | Behaviour of sound waves** [Em linha], atual. 2021. [Consult. 29 mar. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://www.vrasqa.com/post/understanding-sound-behaviour-and-noise-reduction>.

THOMAS, Reuben - **Wayverb - Home** [Em linha], atual. 2016. [Consult. 2 mai. 2024]. Disponível em WWW:<URL:https://reuk.github.io/wayverb/>.

WHITLOCK, James; DODD, George - Classroom Acoustics - Controlling the Cafe Effect... is the Lombard Effect the key? Em **ACOUSTICS 2006**. Christchurch, New Zealand : [s.n.]

YAHYA, Musli Nizam *et al.* - Investigation the Capability of Neural Network in Predicting Reverberation Time on Classroom. **International Journal of Sustainable Construction Engineering & Technology**. 2011).

ZAINUDIN, Fathin Liyana *et al.* - Prediction of Classroom Reverberation Time using Neural Network. **Journal of Physics: Conference Series**. . ISSN 1742-6588. 995:2018) 012028. doi: 10.1088/1742-6596/995/1/012028.

ZHANG, Dadi; MUI, Kwok-Wai; WONG, Ling-Tim - Ten Questions Concerning Indoor Environmental Quality (IEQ) Models: The Development and Applications. **Applied Sciences**. . ISSN 2076-3417. 13:5 (2023) 3343. doi: 10.3390/app13053343.

ZHOU, Xiaoru *et al.* - Predicting the reverberation time in rectangular rooms with non-uniform absorption distribution. **Applied Acoustics**. . ISSN 0003682X. 171:2021) 107539. doi: 10.1016/j.apacoust.2020.107539.

Anexo A

Níveis de absorção sonora

(tabelas extraídas e traduzidas de BOBRAN e BOBRAN, 1990)

Visão geral

1. Gesso denso	125	250	500	1000	2000	4000
gesso liso, gesso ou similar, oco	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.05
reboco liso, gesso ou similar diretamente sobre alvenaria ou concreto	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.04
Teto pesado suspenso de gesso	0.02	-	0.03	-	0.05	-
Teto de estuque fortemente estruturado	0.03	-	0.04	-	0.07	-
gesso áspero (gesso de cal), oco	0.03	-	0.04	-	0.04	-
reboco áspero (reboco de cal e cimento) em alvenaria	0.02	0.02	0.03	0.04	0.05	0.05

2. Gesso poroso (em alvenaria ou betão)	125	250	500	1000	2000	4000
Gesso de amianto pulverizado com 15 mm de espessura	0.08	0.15	0.31	0.5	0.61	0.71
idêntico, com superfície compactada	0.15	0.25	0.35	0.45	0.4	0.4
Gesso de amianto pulverizado com 20 mm de espessura	0.17	0.25	0.5	0.8	0.89	1
idêntico, com superfície compactada	0.2	0.35	0.5	0.6	0.55	0.55
Gesso de amianto pulverizado com 25 mm de espessura	0.19	0.22	0.48	0.59	0.73	0.69
idêntico, com superfície compactada	0.25	0.4	0.6	0.7	0.65	0.65
Gesso de fibra de vidro com 10 mm de espessura	0.02	0.07	0.4	0.68	0.68	0.75
Gesso de lã de rocha com 10 mm de espessura	0.04	0.09	0.26	0.51	0.72	0.76
Gesso de lã de rocha com 20 mm de espessura	0.09	0.29	0.55	0.61	0.82	0.91
Gesso em spray de grão grosso com 20 mm de espessura (grãos de material expansível) sobre uma placa de cimento com revestimento liso	0.26	0.29	0.33	0.61	0.89	0.95

3. Betão, lajes de betão	125	250	500	1000	2000	4000
Superfícies de concreto pesado, ásperas	0.02	0.03	0.03	0.03	0.04	0.07
Betão pesado, liso, sem pintura	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.05
Betão pesado, liso, pintado ou envernizado	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
Betão celular com 40 mm de espessura (700 kg/m ³), painéis de betão celular	0.14	-	0.24	-	0.41	-
Betão com agregado de pedra-pomes, sem reboco	0.15	0.4	0.6	0.6	0.6	0.6
Placas de pedra-pomes ásperas	0.1	0.22	0.52	0.49	0.5	0.73
Tábuas de pedra-pomes lisas	0.07	0.14	0.24	0.17	0.18	0.21
Painéis não perfurados de cimento com amianto com 4 mm de espessura sobre uma cavidade de ar com 50 mm de espessura, juntas estanques	0.43	0.15	0.1	0.05	0.04	0.02
idêntico, cavidade com lã mineral	0.51	0.29	0.1	0.05	0.04	0.02
idêntico, placas perfuradas, proporção de furos de aproximadamente 16%.	0.13	0.65	0.9	0.82	0.82	0.77

4. Alvenaria	125	250	500	1000	2000	4000
alvenaria sem pintura, sem reboco, sem juntas	0.02	0.03	0.03	0.04	0.05	0.07
alvenaria pintada, rejuntada ou similar.	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03
Parede de pedra aluvial com 100 mm de espessura, sem reboco, sem juntas	0.09	0.18	0.26	0.5	0.56	0.65
Alvenaria de tijolos perfurados, furos visíveis, 6 cm à frente da parede maciça, cavidade vazia	0.11	0.22	0.36	0.32	0.55	0.43
idêntico, cavidade preenchida com material absorvente de som	0.25	0.71	0.84	0.75	0.9	0.75

5. Revestimento em pedra	125	250	500	1000	2000	4000
Revestimento em mármore	0.01	-	0.01	-	0.02	-
revestimento comum de pedra artificial (travertino artificial)	0.02	-	0.05	-	0.07	-
revestimento com pedra em acabamento vítreo em peças ajustadas rentes umas às outras	0.04	-	0.03	-	0.02	-
Revestimento com pedra em acabamento vítreo com distância à parede de aproximadamente 50 mm	0.25	0.2	0.1	0.05	0.02	0.02

6. Placas de gesso finas	125	250	500	1000	2000	4000
Luz suspensa e teto liso em gesso cartonado	-	0.2	0.1	0.05	-	-
Painéis compostos de gesso cartonado com 9,5 mm de espessura, não perfurados; a 50 mm de distância da parede, com cavidade vazia	0.32	0.07	0.05	0.04	0.05	0.08
Painéis compostos de gesso cartonado com 9,5 mm de espessura, não perfurados; a 50 mm de distância da parede, com cavidade preenchida por lã mineral	0.35	0.12	0.08	0.07	0.06	0.07
Painéis compostos de gesso cartonado com 12,5 mm de espessura, não perfurados; a 650 mm de distância da parede, com cavidade vazia	0.05	0.02	0.06	0.04	0.1	0.11
Placa de gesso perfurada, com 20% de furos na frente do velo de fibra e esteiras de lã de vidro, com papel betuminoso no verso	0.5	-	0.7	-	0.75	-

7. Pinturas, papel de parede, papel	125	250	500	1000	2000	4000
Camada com 2,5 mm de espessura de material de fibra aplicado sobre gesso	0.02	0.03	0.04	0.07	0.13	0.21
Papel de parede em papel-jornal e alvenaria rebocada	0.02	0.03	0.04	0.05	0.07	0.08
Papel kraft, distância à parede de 50 mm	0.02	0.02	0.05	0.16	0.08	0.02

8. Painéis de madeira	125	250	500	1000	2000	4000
Revestimento de madeira com 25 mm de espessura (revestimento econômico) composto por tábuas perfiladas de 45 mm de largura e juntas de 16 mm. Espessura da cavidade 50 mm. Tábuas com aplicação de material absorvente de som com 20 mm de espessura	0.19	0.36	0.73	0.5	0.25	0.31
Revestimento de madeira com 20 mm de espessura (revestimento econômico) composto por tábuas perfiladas de 100 mm de largura e juntas de 10 mm. Espessura da cavidade 50 mm. Tábuas com aplicação de material absorvente de som com 20 mm de espessura	0.06	0.26	0.63	0.17	0.05	0.08
Revestimento de madeira com 16 mm de espessura com encaixe de tábuas do tipo macho e fêmea ou por rebaixo, com distância à parede de aproximadamente 40 mm	0.18	0.12	0.1	0.09	0.08	0.07
Tábuas de madeira de 16 mm com 90 mm de largura a uma distância de 15 mm do velo de fibra com placas de fibra de vidro de 20 mm e câmara de ar de 20 mm	0.38	0.73	0.49	0.47	0.37	0.33

9. Painéis derivados de madeira (revestimento)	125	250	500	1000	2000	4000
Painéis isolantes de fibra de madeira (MDF) densa, não perfurada, com 6 mm de espessura, de superfície lisa, em estrutura de ripas em frente a um espaço de ar maior	0.3	0.2	0.2	0.1	0.2	-
Painéis acústicos de fibra de madeira (MDF) com 12 mm de espessura, perfurados ou ranhurados. Distância à parede de 50 mm	0.3	0.3	0.3	0.4	0.5	0.6
Painéis isolantes de fibra de madeira (MDF) com 15 mm de espessura, estanques à superfície. Distância à parede de 50 mm	0.4	-	0.3	-	0.35	-
Placa de aglomerado com 10 mm de espessura (620 kg/m ³), superfície ligeiramente rugosa. Distância à parede de 20 mm	0.13	0.24	0.14	0.14	0.16	0.2
Aglomerado com 22 mm de espessura (640 kg/m ³), superfície lisa, cavidade preenchida com lã mineral. Distância à parede de 50 mm	0.12	0.04	0.06	0.03	0.07	0.01
Aglomerado com 8 mm de espessura, superfície lisa. Distância à parede de 20 mm (caso não seja possível, adota-se a solução anterior)	0.46	0.24	0.04	0.01	0.01	-
Painéis leves em lã de madeira com 25 mm de espessura, estanques à superfície. Distância à parede de 50 mm	0.25	0.33	0.5	0.65	0.65	0.7
Placas de fibra dura (HDF) de 4 mm de espessura ou painéis de contraplacado equivalentes. Distância à parede de 50 mm	0.3	0.2	0.15	0.1	0.08	0.1

Painéis de fibra dura (HDF) de 4 mm de espessura ou painéis de contraplacado equivalente, cavidade preenchida com isolante em geotêxtil. Distância à parede de 50 mm	0.2	0.4	0.2	0.1	0.08	0.1
Painéis de fibra dura (HDF) de 4 mm de espessura ou painéis de compensado equivalente, 20% perfurados, cavidade preenchida com isolante em geotêxtil. Distância à parede de 50 mm	0.12	0.45	0.8	0.9	0.78	0.58

1 piso de madeira	125	250	500	1000	2000	4000
Piso flutuante de madeira maciça com tábuas longas, dimensões médias	0.15	-	0.1	-	0.08	-
Parquet sobre betonilha ou similar, colado, sem aplicação de selante	0.04	0.04	0.06	0.12	0.1	0.17
Parquet sobre betonilha ou similar, colado, com aplicação de selante	0.02	0.03	0.04	0.05	0.05	0.1
Parquet ou similar, sobre piso modular elevado	0.2	0.15	0.1	0.1	0.05	0.1
Plataforma elevada de madeira, ou pódio de madeira, sem acabamentos	0.11	-	0.11	-	0.11	-
Piso em blocos de madeira maciça	0.06	-	0.08	-	0.12	-

2 pisos em tapetes e/ou alcatifas	125	250	500	1000	2000	4000
Tapete Bouclé (tapete de lã frisada), versão fina e rígida sobre bet	0.03	0.03	0.04	0.1	0.19	0.35
Feltro para piso com 7 mm	0.02	0.04	0.12	0.2	0.36	0.57
Tapete Bouclé (tapete de lã frisada), versão grossa e macia sobre betonilha	0.08	-	0.2	-	0.52	-
Tapete com 5 mm de espessura sobre betonilha	0.04	0.04	0.15	0.29	0.52	0.59
Tapete de 6 mm de espessura com camada de feltro de 5 mm de espessura	0.07	0.21	0.57	0.68	0.81	0.72
Tapete com 8 mm de espessura, solto	0.04	0.12	0.26	0.49	0.28	0.29
Tapete fino de fibra de coco, solto	0.02	0.03	0.05	0.1	0.27	0.48
Piso revestido por camada de fibra de coco com aproximadamente 10 mm de espessura, solta da betonilha, com densidade bruta de aproximadamente 2kg/m ²	0.03	0.03	0.07	1.13	0.28	0.55
Tapete de veludo com 13 mm de espessura, incluindo camada inferior em espuma de borracha colada com 5 mm de espessura, sobre betonilha	0.04	0.1	0.43	0.28	0.44	0.56
Tapete, de pelo comprido, sobre betonilha	0.09	0.08	0.21	0.26	0.27	0.37

3 Outros revestimentos de piso	125	250	500	1000	2000	4000
Peças de pedra industrializada (mármore compacto) polidas, fixas com argamassa	0.02	-	0.05	-	0.07	-
Pavimento de magnesita	0.06	-	0.08	-	0.1	-
Pavimento em espuma de borracha, solto	0.04	0.04	0.08	0.12	0.03	0.01
Parquet de cortiça	0.04	0.03	0.05	0.11	0.07	0.02
Revestimento em linóleo, totalmente colado	0.02	-	0.03	-	0.04	-
Pavimento de cortiça, borracha ou similar, colado	0.02	0.03	0.04	0.05	0.05	0.1
Revestimento de piso em PVC, com 2,5 mm de espessura, colado à betonilha	0.01	-	0.01	-	0.05	-

4 janelas, portas, aberturas	125	250	500	1000	2000	4000
janela aberta	1	1	1	1	1	1
janela de duas folhas fechada	0.1	0.04	0.03	0.02	0.02	0.02
Janela de vidro duplo com isolamento acústico 4/12/4 (4mm - vidro/12mm - ar/4mm - vidro)	0.2	0.15	0.1	0.05	0.03	0.02
Painéis de vidro separados por uma distância entre 25 a 50 mm	0.28	0.2	0.1	0.06	0.02	0.01
Vidro plano com espessura entre 3 mm e 4 mm, à frente de um vão de 50 mm de espessura, com aplicação de fita de vedação nas bordas, em parede estrutural	0.23	0.11	0.09	0.01	0.01	0.03
Vidro, simples (janela única)	0.04	-	0.03	-	0.02	-
Portas de madeira, compensado liso, portas pesadas	0.14	-	0.06	-	0.1	-
Palco sem cortinas	0.2	-	0.25	-	0.4	-
Nichos com cortinas	0.25	-	0.3	-	0.35	-

Abertura em espaço situado sob sacada	0.25	bis	-	-	-	0.8
Grelha de ventilação, secção transversal livre de aproximadamente 50%	0.3	-	0.5	-	0.5	-

5 Plateia	125	250	500	1000	2000	4000
1 pessoa em cadeira (sala pequena)	0.33	-	0.44	-	0.46	-
por pessoa em bancos corridos	0.25	0.34	0.41	0.45	0.45	0.38
Plateia em cadeiras de madeira, valores médios para auditórios	0.15	0.3	0.44	0.45	0.46	0.46
por pessoa em salas muito grandes	0.13	0.31	0.45	0.51	0.51	0.43
por pessoa em pé ou em assentos de madeira em salas grandes com filas normais de assentos rebatíveis ou similares.	0.15	0.3	0.5	0.55	0.6	0.5
por pessoa em assentos estofados com filas normais de assentos rebatíveis ou similares.	0.2	0.4	0.55	0.6	0.6	0.5
Orquestra com instrumentos no pódio, por pessoa	0.4	0.8	1	1.4	1.3	1.2
Espaço para orquestras ou coros, incluindo-se aí corredores estreitos, ocupado pelos músicos (valores por m²)	0.6	0.74	0.88	0.96	0.93	0.85
Crianças nas aulas escolares	0.12	0.18	0.26	0.32	0.38	0.38

6 assentos para uso coletivo	125	250	500	1000	2000	4000
cadeira dobrável de madeira, vazia	0.05	0.05	0.05	0.05	0.08	0.05
Assento rebatível, com contraplacado no assento e encostos	0.02	-	0.02	-	0.04	-
Assento rebatível, com almofada plana e capa de tecido no assento e encosto	0.12	-	0.2	-	0.27	-
Assento rebatível, assento em couro artificial e encostos com estofos planos	0.13	-	0.15	-	0.07	-
Cadeira dobrável, assento e encosto em couro artificial, com o assento dobrado	0.09	0.13	0.15	0.15	0.11	0.07
Cadeira dobrável, assento e encosto estofados em veludo	0.14	0.32	0.28	0.31	0.34	-
Cadeira alta (infantil), por peça	0.01	-	0.02	-	0.02	-
Assento/poltrona/banco de madeira vazios, por lugar	0.01	0.01	0.02	0.03	0.05	0.05
Bancos corridos com almofadas de espuma de borracha revestidas com tecido de 3,5 cm de espessura	0.11	0.26	0.37	0.46	0.52	0.48
cadeira estofada com estofos mais delgados e revestimento em tecido, vazia	0.13	-	0.2	-	0.25	-
cadeira estofada com estofos mais espessos e revestimento em tecido, vazia	0.28	0.28	0.28	0.28	0.34	0.34
cadeira estofada com tecido em espuma de borracha, vazia	0.15	0.15	0.15	0.15	0.18	0.3
Zona de convívio (cadeiras estofadas com forro de tecido), cadeiras vazias	0.49	0.66	0.8	0.88	0.82	0.7
Zona de convívio (cadeiras estofadas com forro de couro), cadeiras vazias	0.44	0.54	0.6	0.62	0.58	0.5

7 têxteis, cortinas etc.	125	250	500	1000	2000	4000
Tecido de algodão, liso	0.04	-	0.13	-	0.32	-
Revestimento em cretone	0.07	-	0.15	-	0.25	-
Tecido de algodão, distância à parede entre 50 a 150 mm (parede lisa)	0.2	-	0.38	-	0.45	-
cortina de janela habitual, fechada	0.05	-	0.23	-	0.3	-
cortina de janela habitual, semi aberta	0.1	0.15	0.3	0.4	0.5	0.6
Cortina de PVC com 0,15 mm de espessura, distância à parede de 60 mm	0.06	-	0.17	-	0.03	-
cortina de porta opaca comum	0.15	-	0.2	-	0.4	-
cortina grossa e enrugada	0.25	-	0.4	-	0.6	-
tecido de juta com fio grosso	0.05	-	0.07	-	0.12	-
tecido de juta com fio grosso e revestimento de feltro de 15 mm de espessura	0.08	0.18	0.38	0.72	0.75	0.78
feltro de fibra natural de 5 mm de espessura aplicado diretamente sobre a parede	0.09	0.12	0.18	0.3	0.55	0.59
Tecido saran, distância à parede de 50 mm (parede lisa)	0.03	0.05	0.13	0.29	0.51	0.38
Tecido de fibra de vidro, distância à parede de 50 mm (parede lisa)	0.04	0.05	0.19	0.6	0.84	0.86
tela de cinema	0.1	-	0.2	-	0.5	-

Disposições especiais para absorção sonora

1 Equipamentos diversos	125	250	500	1000	2000	4000
Almofada de assento, em tecido fino, 1 peça	0.07	-	0.14	-	0.13	-
Almofada de assento, em tecido aveludado, 1 peça	0.09	-	0.17	-	0.13	-
Almofada de assento, em tecido de couro sintético, 1 peça	0.11	-	0.18	-	0.07	-
Estofamento com revestimento em tecido (por m ²)	0.1	0.3	0.35	0.45	0.5	0.4
Estofamento com revestimento em couro (por m ²)	0.1	0.25	0.35	0.35	0.2	0.1
Plataforma elevada de madeira, ou pódio de madeira (por m ²)	0.11	-	0.11	-	0.09	-
Pintura a óleo (por m ²)	-	-	ca. 0.28	-	-	-
Piano, 1 peça	0.2	-	0.6	-	0.52	-

2 Materiais aerados	125	250	500	1000	2000	4000
Placa de VERMICULITA de 22 mm (aprox. 260 kg/m ³) diretamente sobre a parede	0.075	0.21	0.47	1.01	0.97	0.95
idêntico, com folga de 5cm na estrutura de ripas de madeira	0.22	0.79	0.97	0.56	0.66	0.85
Placa de VERMICULITA de 22 mm (aprox. 390 kg/m ³) diretamente sobre a parede	0.19	0.52	1.1	0.88	0.98	0.91
idêntico, com folga de 5cm na estrutura de ripas de madeira	0.46	0.96	0.91	0.81	0.72	0.77
reboco poroso de perlite, em camada com aproximadamente 20 mm de espessura, projetado sobre lajotas de betão armado de 16 cm de espessura	0.26	0.29	0.33	0.61	0.89	0.95
Reboco de projeção com gesso e PERLITE com 1,2 cm de espessura, pulverizado sobre rede de arame em frente a uma parede altamente reflectora, a uma distância de 3 cm da parede	0.28	0.39	0.52	0.51	0.57	0.56
Placa de pedra-pomes 60 mm	0.1	0.21	0.52	0.5	0.5	0.72
Painéis de mica expandida com 15 mm de espessura, com camada superior microporosa em ambos os lados (MIKROPOR UB, não inflamável), a uma distância de 48 mm da parede	0.1	0.41	0.82	0.67	0.56	0.71

3 Painéis de fibra de linho com/sem ranhuras (ca. 400 kg/m ³)	125	250	500	1000	2000	4000
Placas de fibra de linho com 16 mm de espessura, ranhuradas e folheadas (ESO F), largura da ranhura 4 mm, profundidade da ranhura 7-8 mm, espaçamento entre ranhuras 27,5 mm, distância à parede de 33 mm	0.26	0.26	0.31	0.43	0.43	0.45
Painéis idênticos de 16 mm, sem folheado (ESO N), distância à parede de 27 mm	0.12	0.37	0.43	0.53	0.73	0.78
Placas de fibra plana de 15 mm de espessura sem ranhuras, com aproximadamente 40% da parte traseira coberta por orifícios de 70 mm de diâmetro e 13 mm de profundidade. Distância à parede de 24 mm	0.36	0.37	0.34	0.4	0.31	0.25
Placas de aglomerado, de 20 mm de espessura, sem revestimento e sem ranhuras, com superfície áspera - MDF (ESO 20-S), com espaçamento de 30 mm	0.31	0.46	0.57	0.64	0.63	0.64
idêntico, com duas demãos de tinta à base de água	0.6	0.16	0.14	0.12	0.08	0.02

4 Painéis Acústicos Porosos	125	250	500	1000	2000	4000
Folhas onduladas de 1 mm de espessura, espaçadas a 10 mm, feitas de fibra de vidro aglomerada, com massa de 0,89 kg/m ² e impedância acústica média de 31 Rayl (entre folhas MIKROPOR, planas e MIKROPOR-V, onduladas em V).	0.04	0.14	0.33	0.6	0.79	0.67
idêntico, a uma distância de 200 mm	0.22	0.61	0.9	0.63	0.76	0.75
como antes, espessura da chapa 0,8 mm, 0,64 kg/m ² , impedância acústica média de 65 Rayl (folha MIKROPOR L), a uma distância de 70mm	0.17	0.44	0.83	0.92	0.73	0.71
idêntico, a uma distância de 100 mm	0.21	0.67	0.93	0.85	0.56	0.61
idêntico, folhas com 1 mm de espessura, dobradas em formato de trapézio. Altura do perfil de 40 mm, largura trapezoidal entre 60 e 65 mm, distância trapezoidal 20 mm; 0,89 kg/m ² , impedância acústica média de 31 Rayl (folha MIKROPOR V), a uma distância de 10mm	0.04	0.14	0.33	0.6	0.79	0.67
idêntico, a uma distância de 200 mm	0.22	0.61	0.9	0.63	0.76	0.75

As cavidades atrás das folhas estavam vazias em todas as configurações medidas

5 Lâminas de Plástico	125	250	500	1000	2000	4000
lâmina decorativa de PVC flexível usual, com cavidade vazia, distância à parede de 20 mm	0.05	0.04	0.03	0.21	0.18	0.12
lâmina de PVC flexível com 0,15 mm de espessura, com cavidade vazia. Distância à parede de 60 mm (coeficiente de absorção sonora máximo entre 400 e 800 Hz: 0,18)	0.03	0.03	0.13	0.12	0.01	0.01

idêntico, com o espaço vazio preenchido por uma camada de lã de rocha de aproximadamente 30 mm de espessura (coeficiente de absorção sonora máximo entre 400 e 600 Hz > 0,8)	0.15	0.22	0.77	0.33	0.07	0.01
lâmina de PVC flexível com 0,15 mm de espessura, dobrada sobre uma camada de lã mineral com 60 mm de espessura	0.57	0.75	0.68	0.51	0.25	0.28
lâmina de PVC flexível com 0,2 mm de espessura e camada aveludada de 0,2 mm de espessura. Distância à parede de 35 mm	0.02	0.04	0.22	0.17	0.1	0.17
Painéis de 0,3 mm de espessura feitos de lâmina de PVC rígido denso com superfície em relevo. Distância à parede de 11 mm	0.04	0.06	0.12	0.57	0.56	0.3
idêntico, com painéis isolantes de fibra de madeira com 15 mm de espessura	0.11	0.25	0.43	0.57	0.59	0.32
lâmina de poliâmida de 28 g à frente de uma camada de lã mineral de 50 mm de espessura (44 kg/m ³)	0.13	0.53	0.92	0.99	0.8	0.73

1 Painéis em grelha folheados	125	250	500	1000	2000	4000
Folheado de 4 mm de espessura, ranhurado, com papelão ondulado fixo colado pelo verso - papel (elemento acabado). Distância à parede de 24 mm	0.03	0.06	0.1	0.58	0.4	0.25
idêntico, com preenchimento de cavidades por camada de lã de rocha	0.13	0.2	0.5	1	0.58	0.38
Painéis de contraplacado de 5 mm de espessura com furos quadrados (proporção de furos aprox. 14%), revestidos com lã de rocha de 20 mm de espessura (elemento acabado). Distância da parede 24 mm	0.1	0.18	0.42	0.8	0.77	0.62
Grelha folheada de aproximadamente 2 mm de espessura com nervuras de reforço altas e estreitas com 17 mm de altura, revestida na parte traseira por uma folha fonoabsorvente microporosa (proporção de ranhuras de aproximadamente 20%). Distância à parede de 550 mm	0.59	0.45	0.47	0.38	0.53	0.44
idêntico, sem revestimento posterior e sem espaçamento à parede, proporção de ranhura de aproximadamente 20%.	0.04	0.02	0.05	0.08	0.2	0.24

2 Placa de gesso	125	250	500	1000	2000	4000
Placas de gesso cartonado, sem perfurações, com 12,5 mm de espessura, revestidas com manta de lã de rocha basáltica de 20 mm. Distância à parede de 650 mm	0.13	0.05	0.12	0.15	0.1	0.12
idêntico, sem manta de lã de rocha basáltica	0.05	0.01	0.06	0.04	0.09	0.1
idêntico, espessura da placa 9,5 mm, cavidade entre as placas de gesso vazia, distância 100 mm	0.11	0.13	0.05	0.02	0.02	0.03
idêntico, espessura da placa 9,5 mm, cavidade entre as placas de gesso vazia, distância 200 mm	0.08	0.09	0.04	0.01	0.02	0
idêntico, espessura da placa 9,5 mm, cavidade entre as placas de gesso vazia, distância 400 mm	0.11	0.09	0.05	0.03	0.05	0.07
idêntico, mas com isolamento acústico a preencher a cavidade entre placas de gesso. Distância 100mm	0.28	0.14	0.09	0.06	0.05	0.1
idêntico, mas com isolamento acústico a preencher a cavidade entre placas de gesso. Distância 200mm	0.24	0.11	0.08	0.05	0.06	0.1
idêntico, mas com isolamento acústico a preencher a cavidade entre placas de gesso. Distância 400mm	0.2	0.12	0.11	0.06	0.06	0.12
Placa de gesso cartonado de 12,5 mm de espessura, 60 cm de largura, revestida com manta de lã basáltica de 20 mm de espessura. Distância entre as placas de 10 mm, distância à parede de 650 mm.	0.28	0.16	0.27	0.2	0.22	0.28
idêntico, placas de 30 cm de largura. Distância entre as placas de 30 mm, distância à parede de 650 mm	0.36	0.32	0.35	0.28	0.25	0.2
idêntico, distância à parede de 50 mm	0.28	0.56	0.53	0.27	0.26	0.2
Placa de gesso cartonado perfurada de 9,5 mm de espessura, com furos de 8 mm de diâmetro e 18 mm de espaçamento entre si. A área perfurada é de aproximadamente 15%. Revestida com feltro não tecido. Distância à parede de 100 mm	0.12	0.28	0.75	0.5	0.38	0.3
idêntico, distância à parede de 50 mm	0.07	0.13	0.56	0.65	0.33	0.3
Placa de gesso cartonado perfurada de 9,5 mm de espessura, com furos de 8 e 12 mm de diâmetro alternados. Espaçamento entre os furos de 36 mm, área perfurada de 12,6%. Revestida com feltro de lã de vidro. Distância à parede de 100 mm	0.12	0.41	0.85	0.51	0.34	0.28
idêntico, distância à parede de 50 mm	0.03	0.18	0.7	0.7	0.31	0.25
Placa de gesso cartonado perfurada de 9,5 mm de espessura, com furos de 8 e 12 mm de diâmetro alternados entre si. Espaçamento entre os furos de 36 mm, área perfurada de 12,6%. Revestida com feltro de lã de vidro. Distância à parede de 450 mm	0.85	0.81	0.74	0.76	0.59	0.53
idêntico, distância à parede de 50 mm	0.27	0.74	0.8	0.73	0.47	0.41

Placa de gesso cartonado de 12,5 mm de espessura, com furos de 12 mm de diâmetro e espaçamento de 25 mm, área perfurada é de 18,1%. Revestida com manta de lã de rocha basáltica. Distância à parede de 50 mm	0.18	0.68	1.3	0.86	0.56	0.43
Placa de gesso cartonado de 12,5 mm de espessura, com furos de 8 e 12 mm de diâmetro alternados entre si. Espaçamento entre os furos de 36 mm, área perfurada de 12,6%. Revestida com manta de lã rocha basáltica. Distância à parede de 50 mm	0.19	0.75	1.16	0.66	0.59	0.24
Placa de gesso cartonado de 9,5 mm de espessura, com furos de 12 e 20 mm de diâmetro alternados entre si. Espaçamento entre furos de 46 mm, área perfurada de 20,2%. Revestida com manta de lã de rocha basáltica. Distância à parede de 100 mm	0.33	0.79	1.03	0.83	0.65	0.54
idêntico, com 9,5 mm de espessura, revestido com feltro laminado de fibra de vidro	0.26	0.7	0.8	0.74	0.48	0.42
Placa de gesso cartonado com ranhuras, área de ranhuras de 8,8%, revestida com feltro não tecido. Distância à parede de 100 mm	0.11	0.28	0.66	0.38	0.28	0.3
idêntico, distância à parede de 50 mm	0.07	0.13	0.62	0.55	0.25	0.28
Placa de gesso cartonado com ranhuras, área de ranhuras de 8,8%, revestida com feltro não tecido e manta de fibra mineral de 20 mm. Distância à parede de 100 mm	0.25	0.8	0.97	0.75	0.48	0.32
idêntico, distância à parede de 50 mm	0.11	0.55	1.11	0.74	0.49	0.3

3 Painéis de gesso cartonado	125	250	500	1000	2000	4000
Painel de gesso cartonado perfurado de 30 mm de espessura, com 11,1% de área perfurada, espaçamento de 48 mm, revestido com papel de máscara e uma manta de lã mineral de 20 mm de espessura. Acabamento final com folha de papel alumínio	0.15	0.44	1.11	0.74	0.64	0.43
idêntico, mas sem lã mineral e papel alumínio	0.21	0.23	0.17	0.19	0.25	0.42
Painel de gesso cartonado perfurado de 30 mm de espessura, com 19% de área perfurada, revestido com papel de máscara e com manta de lã de rocha de 15 mm e folha de alumínio na parte posterior. Distância à parede de 70 mm	0.17	0.53	0.75	0.62	0.55	0.44
Placas de gesso cartonado estriadas de 15 mm de espessura (625/625 mm). Estrias com 10 mm de profundidade, terminando em 884 aberturas quadradas de 7/7 mm. As placas são revestidas com papel de máscara e preenchidas com 25 mm de lã mineral. Acabamento final com folha de alumínio. Distância à parede de 70 mm	0.31	0.75	0.9	0.66	0.54	0.35
Painéis de gesso cartonado estriados e perfurados de 35 mm de espessura, revestidos apenas com feltro não tecido (45 g/m ²), espaçados a 50 mm	0.14	0.48	0.84	0.66	0.39	0.45

4 Material de fibra de vidro	125	250	500	1000	2000	4000
Painéis de lã de vidro com 2 cm de espessura, aprox. 150 kg/m ³ (GERRIX XV), sobre estrutura de ripas de 2,4 cm, cavidade vazia atrás dos painéis	0.08	0.24	0.68	1.09	1.03	0.88
Painéis de lã de vidro com 2 cm de espessura, aprox. 150 kg/m ³ (GERRIX XV), sobre estrutura de ripas de 2,4 cm, cavidade preenchida com lã de vidro para construção	0.15	0.57	0.87	1.12	1.03	0.91
Painéis de lã de vidro com 2 cm de espessura, aprox. 100 kg/m ³ (GERRIX X), sobre estrutura de ripas de 2,4 cm, cavidade vazia atrás dos painéis	0.15	0.37	0.7	0.95	1	0.99
Painéis de 2 cm de espessura idênticos, sem distância à parede, sem revestimento	0.1	0.29	0.73	1.05	0.9	0.88
Painéis de 2 cm de espessura idênticos, cobertos com painéis perfurados de compensado de 4 mm, com 20% de área perfurada. Distância à parede de 40 mm	0.1	0.33	0.87	1.15	0.99	0.89
Painéis idênticos, sem distância à parede, cobertas por lâmina plástica de 250 g/m ²	0.1	0.31	1.03	0.64	0.36	0.18
Painéis de 2 cm de espessura idênticos, sem distância à parede, cobertas por lâmina plástica de 30 g/m ²	0.1	0.28	0.8	1.14	1.01	0.82
Painéis de 3 cm de espessura, cerca de 50 kg/m ³ (GERRIX V), sem distância à parede, sem revestimento	0.19	0.42	0.82	1.07	0.9	0.88
Painéis de 3 cm de espessura (GERRIX V), sem distância à parede, cobertas com treliça de ripas (ripas com largura de 10 mm, profundidade de 15 mm, espaçamento de 30 mm)	0.22	0.47	0.96	1.14	0.99	0.96
Painéis de 4 cm de espessura (GERRIX V) sobre um ripado de 4 cm de espessura, cobertas com chapa perfurada de alumínio, orifícios de 6 mm de diâmetro e espaçamento entre os orifícios de 13 mm	0.16	0.48	1	0.99	0.82	0.78

Painéis de lâ de vidro de 4 cm (BERGLA-TEL PB), sem distância à parede, cobertas por chapa perfurada, com orifícios de 6 mm de diâmetro e proporção de orifícios de 18,1%	0.12	0.35	0.69	0.94	0.82	0.69
Painéis de lâ de vidro de 4 cm como antes, sem distância da parede, sem cobertura	0.12	0.35	0.68	0.87	0.87	0.97
Feltro de fibra de vidro de 4 cm (BERGLA-TEL FC), sem distância à parede, coberto por chapa perfurada, com orifícios de 6 mm de diâmetro e proporção de orifícios de 18,1%	0.13	0.36	0.55	0.81	0.86	0.67
idêntico, sem distância à parede, sem revestimento	0.18	0.33	0.53	0.73	0.88	0.96

1 Placas isolantes comuns de fibra de madeira (aproximadamente 200 kg/m³)	125	250	500	1000	2000	4000
Placa de aglomerado com 13 mm de espessura. Distância à parede de 50 mm	0.32	0.25	0.25	0.25	0.28	0.32
12,5 mm de espessura, perfurado normal (GUTEX), diretamente sobre a parede	0.06	0.15	0.26	0.42	0.54	0.6
idêntico, com 12,5 mm de espessura, com distância da parede de 50 mm	0.25	0.3	0.3	0.4	0.55	0.6
12 mm de espessura, ranhurado em cruz, diretamente sobre a parede	0.08	0.13	0.23	0.31	0.49	0.67
idêntico, com 12 mm de espessura, distância à parede de 50 mm	0.16	0.4	0.28	0.32	0.48	0.64
12 mm de espessura, ranhuras longitudinais, diretamente sobre a parede	0.05	0.13	0.26	0.36	0.49	0.63
idêntico, com 12 mm de espessura, distância à parede de 50 mm	0.21	0.23	0.3	0.37	0.5	0.62
12,5 mm de espessura, perfurado (GUTEX), diretamente sobre a parede	0.03	0.23	0.37	0.7	0.8	0.72
idêntico, com 12 mm de espessura, distância à parede de 50 mm	0.04	0.23	0.7	0.61	0.73	0.7
12,5 mm de espessura com revestimento rígido (TONATEX), espaçamento de 30 mm sobre ripas de madeira	0.05	0.3	0.38	0.41	0.5	0.58
12 mm de espessura, perfurado irregularmente (ODENWALD), pintado. Distância à parede de 48 mm	0.26	0.43	0.48	0.61	0.87	0.83
18 mm de espessura - o restante mantém-se idêntico	0.3	0.35	0.43	0.58	0.81	0.91
10 mm de espessura com ranhuras paralelas, espaçamento entre ranhuras de aprox. 50 mm, com aprox. 3,2 kg/m² (ATEX), sobre ripas de madeira de 24 mm de espessura	0.15	0.74	0.31	0.29	0.41	0.5
Como antes, com retardante contra incêndio aplicado por spray (placas com aproximadamente 3,2 kg/m², retardante contra incêndio com aproximadamente 315 g/m²)	0.21	0.74	0.28	0.25	0.36	0.43

2 Placas leves e porosas de aglomerado e similares	125	250	500	1000	2000	4000
Mikropor M na frente de camada de 300 mm de ar, vazia	0.21	0.77	0.64	0.7	0.8	0.71
Placa simples com 18 mm de espessura, revestida com papel na parte traseira, superfície com cobertura fina, microporosa e uniforme (MIKROPOR S), 5,9 kg/m². Distância à parede de 50 mm	0.16	0.42	0.55	0.72	0.55	0.6
idêntico, com uma distância de 200 mm à parede	0.32	0.28	0.5	0.75	0.57	0.67
idêntico, com uma distância de 300 mm à parede	0.42	0.28	0.49	0.78	0.58	0.62
idêntico, cobertura fina microporosa com superfície texturizada ("padrão de gotas" - MIKROPOR SP), distância à parede de 50 mm	0.14	0.38	0.54	0.86	0.65	0.68
idêntico, mas teto falso do tipo "favo de mel" 600/600 mm, 300 mm de altura, a uma distância de 400 mm	0.12	0.26	0.44	0.7	0.77	0.79
idêntico, com uma distância de 200 mm à parede	0.26	0.3	0.49	0.84	0.68	0.73
idêntico, com uma distância de 300 mm à parede	0.32	0.26	0.49	0.92	0.67	0.68
Placa de 18 mm de espessura com camada superior de aglomerado não poroso e revestimento em verniz poroso conforme especificado (MIKROPOR ST ou VARIANTEX 09), ca. 6 kg/m². Distância à parede de 50 mm	0.32	0.31	0.16	0.1	0.07	0.1
idêntico, com uma distância de 200 mm à parede	0.47	0.19	0.13	0.11	0.09	0.1
idêntico, com uma distância de 300 mm à parede	0.41	0.16	0.14	0.12	0.11	0.09
Placa simples de 18 mm de espessura, aproximadamente 6 kg/m² (VARIANTEX 52). Superfície grosseiramente porosa, lixada e pulverizada, sem revestimento de papel no verso, distância à parede de 50 mm	0.23	0.6	0.83	0.52	0.62	0.64
idêntico, com uma distância de 200 mm à parede	0.68	0.82	0.6	0.55	0.68	0.58
idêntico, com uma distância de 300 mm à parede	0.46	0.84	0.62	0.53	0.63	0.55
idêntico, superfície bruta, não lixada, mas pulverizada de branco. Distância à parede de 50 mm (VARIANTEX 06)	0.08	0.52	0.75	0.62	0.61	0.57
idêntico, com uma distância de 200 mm à parede	0.38	0.66	0.54	0.56	0.66	0.53
idêntico, com uma distância de 300 mm à parede	0.53	0.6	0.44	0.48	0.64	0.58

0.5

0.54

1 Placas de aglomerado perfuradas e ranhuradas	125	250	500	1000	2000	4000
Placa de aglomerado perfurado com 8 mm de espessura, furo com diâmetro de 10 mm, espaçamento entre furos 12,5 cm. Distância à parede de 20 mm, preenchido com lã de rocha	0.11	0.51	0.15	0.05	0.01	0.05
Placa de aglomerado perfurado com 22 mm de espessura, furo com diâmetro de 10 mm, espaçamento entre furos 12,5 cm e suporte com manta de lã de rocha com 30 mm de espessura. Distância à parede de 50 mm	0.41	0.15	0	0.03	0.08	0.12
Placas de aglomerado com 13 mm de espessura e 30 cm de largura, colocadas com um espaçamento de 2 cm entre si. Atrás, lã de rocha com 20 mm de espessura, seguida por aglomerado perfurado com 22 mm de espessura (furos com diâmetro de 10 mm, espaçamento entre furos 12,5 cm) à frente de uma câmara vazia com 80 mm de espessura	0.17	0.28	0.4	0.4	0.22	0.21
Placas de aglomerado de 8 mm de espessura, com ranhuras de 3 mm de largura, espaçadas entre si a 70 cm, com um espaçamento lateral de 25 mm. Distância à parede: 100 mm	0.17	0.43	0.49	0.33	0.23	0.22
idêntico, preenchido com lã de vidro	0.49	0.78	0.52	0.49	0.28	0.22
idêntico, preenchido com lã de vidro e feltro	0.54	0.9	0.61	0.47	0.31	0.21

2 Placas de aglomerado pesadas (aproximadamente 620 kg/m²)	125	250	500	1000	2000	4000
Superfície áspera com 10 mm de espessura. Distância 20mm	0.13	0.24	0.14	0.14	0.16	0.2
22 mm de espessura, preenchido com manta de lã mineral de 30 mm. Distância 50mm	0.12	0.04	0.06	0.03	0.07	0.01
8 mm de espessura, preenchido com manta de lã mineral de 20 mm. Distância 20mm	0.46	0.24	0.04	0.01	0.01	-

3 Painéis aglomerados com cavidades cilíndricas, folheados em ambos os lados (DEWETON)	125	250	500	1000	2000	4000
Painéis de 25 mm de espessura, com ranhuras em cada cilindro na parte frontal. Distância à parede: 30 mm	0.24	0.2	0.23	0.54	1.02	0.65
idêntico, mas com duas ranhuras em cada cilindro. Distância à parede: 30 mm	0.28	0.25	0.36	0.58	0.88	0.51
idêntico, cada quarto cilindro com ranhura	0.18	0.33	0.31	0.32	0.57	0.36
Painéis de 25 mm de espessura, cada cilindro com ranhuras na frente e cada quarto cilindro com ranhuras na parte traseira de 300 mm de comprimento. Distância à parede de 30 mm	0.09	0.31	0.49	0.6	0.99	0.71
idêntico, com placas de fibra mineral de 10 mm de espessura nas cavidades cilíndricas	0.14	0.7	0.51	0.58	0.99	0.68
Painéis de 25 mm de espessura, cada cilindro com ranhuras na frente, cada segundo cilindro possui ranhuras na parte traseira de 300 mm de comprimento. Distância à parede de 30 mm	0.05	0.23	0.57	0.67	1.01	0.71
idêntico, com manta de fibra mineral de 10 mm de espessura nas cavidades cilíndricas	0.09	0.5	0.67	0.74	1.01	0.82
Painéis de 25 mm de espessura, com ranhuras em cada segundo cilindro na parte frontal e em cada quarto cilindro na parte traseira, com aproximadamente 300 mm de comprimento. Distância à parede de 30 mm	0.08	0.29	0.46	0.4	0.66	0.52
idêntico, com manta de fibra mineral de 30 mm de espessura	0.26	0.72	0.54	0.42	0.63	0.51
idêntico, sem ranhuras e sem material fonoabsorvente	0.18	0.07	0.05	0.01	0.06	0.06

4 Painéis de construção leve de lã de madeira (HERAKLITH, HERAKUSTIK)	125	250	500	1000	2000	4000
25 mm de espessura, diretamente sobre a parede	0.04	0.13	0.52	0.75	0.6	0.72
25 mm de espessura, com papel de parede colado	0.11	0.12	0.19	0.21	0.3	0.42
26 mm de espessura, com papel de parede pregado	0.05	0.15	0.64	0.61	0.75	0.71
25 mm de espessura, com folha de couro sintético automotivo (Acella) perfurada	0.05	0.14	0.54	0.71	0.66	0.85
25 mm de espessura, cavidade vazia, distância à parede de 24 mm	0.08	0.2	0.66	0.49	0.71	0.76
25 mm de espessura, com papel de parede colado. Distância à parede de 24 mm	0.18	0.09	0.1	0.21	0.28	0.32
25 mm de espessura, com papel de parede pregado. Distância à parede de 24 mm	0.07	0.27	0.63	0.52	0.84	0.61
25 mm de espessura, com folha de couro sintético automotivo (Acella) perfurada. Distância à parede de 24 mm	0.08	0.2	0.71	0.5	0.75	0.77
25 mm de espessura, cavidade com fibra mineral (1,7 kg/m ²). Distância à parede de 24 mm	0.17	0.7	0.63	0.49	0.75	0.72

25 mm de espessura, cavidade vazia, distância à parede de 50 mm	0.13	0.42	0.54	0.45	0.7	0.73
25 mm de espessura, cavidade com material fonoabsorvente. Distância à parede de 50 mm	0.18	0.33	0.8	0.9	0.8	0.83
25 mm de espessura, cavidade vazia. Distância à parede de 80 mm	0.2	0.67	0.48	0.44	0.72	0.73
35 mm de espessura, diretamente sobre a parede	0.08	0.17	0.7	0.71	0.64	0.64
50 mm de espessura, diretamente sobre a parede	0.11	0.33	0.91	0.6	0.79	0.68

espumas plásticas

1 Espuma de ureia macia (ISOSCHAUM)	125	250	500	1000	2000	4000
Tradução: 50 mm de espessura (15 kg/m ³), aplicado diretamente sobre a parede	0.12	0.2	0.45	0.65	0.7	0.75
40 mm de espessura, atrás de tecido de juta, aplicado diretamente sobre a parede	0.09	0.2	0.36	0.6	0.45	0.42
40 mm de espessura, atrás de tecido de juta, 3% uniformemente perfurado, aplicado diretamente sobre a parede	0.12	0.5	0.92	1	0.98	0.84
50 mm de espessura, atrás de tecido de juta, aplicado diretamente sobre a parede	0.08	0.13	0.38	0.59	0.42	0.4
50 mm de espessura, atrás de tecido de juta, 3% uniformemente perfurado, aplicado diretamente sobre a parede	0.18	0.6	0.86	0.96	0.98	0.87
30 mm de espessura, atrás de tecido de juta. Distância à parede de 250 mm	0.76	0.5	0.42	0.54	0.76	0.64
30mm de espessura, atrás de tecido de juta, 3% uniformemente perfurado. Distância à parede de 250 mm	0.64	0.5	0.52	0.7	0.83	0.69

2 Espuma de poliuretano (elástico MOLTOPREN)	125	250	500	1000	2000	4000
30 mm de espessura, sobre parede rígida (qualidade mediana) como antes, com tecido laminado. Espessura total 15mm	0.11	0.16	0.34	0.95	0.94	0.93
idêntico, espessura 8 mm	0.06	0.21	0.53	0.7	0.91	0.93
idêntico, espessura 8 mm	0.07	0.11	0.21	0.54	0.69	0.92
Placas de espuma acústica pirâmide, com 100 mm no total, coladas	0.15	0.32	0.83	0.84	0.98	1.09

3 Espuma de poliestireno (ESFEROVITE)	125	250	500	1000	2000	4000
Painel liso de 5 mm de espessura, forrado com manta de lã mineral de 40 mm de espessura. Distância à parede de 50 mm	0.07	0.21	0.64	0.72	0.49	0.5
Painel liso com 10 mm de espessura, cavidade vazia. Distância da parede 40 mm	0.07	0.14	0.3	0.84	0.59	0.59
Painel liso com 10 mm de espessura, cavidade preenchida com lã mineral. Distância à parede de 40 mm	0.2	0.38	0.93	0.92	0.58	0.69
Painel perfurado de 10 mm de espessura, sem perfurações adicionais, cavidade vazia. Distância à parede de 40 mm	0.06	0.11	0.31	0.73	0.59	0.48
idêntico, mediante corte elétrico	0.1	0.14	0.35	0.82	0.55	0.57
idêntico, mediante corte mecânico	0.12	0.38	0.87	0.9	0.62	0.68
Painel perfurado de 15 mm de espessura, sem perfurações adicionais, cavidade preenchida com lã mineral. Distância à parede de 40 mm	0.25	0.62	0.84	0.68	0.53	0.63
Painel perfurado de 20 mm de espessura, sem perfurações adicionais, diretamente sobre a parede	0.04	0.07	0.16	0.39	0.74	0.67
Painel perfurado com 20 mm de espessura, sem perfurações adicionais, cavidade vazia. Distância à parede de 40 mm	0.07	0.27	0.58	0.83	0.75	0.86
Painel com placas de ranhuras cruzadas de 20 mm de espessura com ranhuras cruzadas na parte superior e inferior, encaixadas em relação à placa de base de 5 mm de espessura. Cavidade vazia. Distância à parede de 20 mm	0.07	0.11	0.32	0.69	0.62	0.79
Painel liso de 25 mm de espessura, cavidade vazia ($f_{\alpha} \approx 180\text{Hz}$). Distância à parede de 250 mm	0.42	0.53	0.33	0.29	0.29	0.24
Painel liso de 25 mm de espessura sobre manta de fibra mineral de 20 mm de espessura. Distância à parede de 250 mm	0.34	0.25	0.46	0.41	0.33	0.33

1 Revestimento metálico	125	250	500	1000	2000	4000
Chapa perfurada de alumínio de 0,5 mm, com 23% de área de perfuração, revestida com papel de seda fino e tiras de fibra mineral de 10 mm de espessura. Distância à parede de 250 mm	0.23	0.41	0.45	0.51	0.61	0.63
idêntico, sem papel de seda, tira de fibra mineral envolvida em película de plástico	0.3	0.46	0.45	0.56	0.7	0.44
Chapa perfurada de alumínio de 0,5 mm, com 23% de área de perfuração, revestida com papel de seda fino e tiras de fibra mineral de 10 mm de espessura, bem como rolo de feltro de fibra mineral de 20 mm. Distância à parede de 250 mm	0.67	0.76	0.88	0.85	0.8	0.87
Chapa perfurada de alumínio de 0,5 mm, área perfurada 12,5% com suporte em painéis de fibra de vidro com 2x10 mm de espessura. Distância à parede de 450 mm	0.77	0.56	0.5	0.48	0.49	0.4
Chapa fina de alumínio, com feltro de fibra mineral de 12 mm de espessura por trás. Distância à parede de 75 mm	0.07	0.48	0.3	0.14	0.02	0.02
idêntico, distância à parede de 300 mm	0.54	0.18	0.19	0.12	0.02	0
Chapa leve de alumínio, com 12,6% de área de perfuração, diâmetro do furo de 2 mm, distância entre furos de 5 mm, revestida com papel de seda e lâ mineral de 25 mm de espessura. Distância à parede de 500 mm	0.8	0.68	0.58	0.78	0.79	0.66
idêntico, diâmetro do furo 4 mm, distância entre furos 10 mm	0.7	0.65	0.67	0.75	0.84	0.78
painéis leves de fachada em chapa de aço, não perfurados (ELEKTRO-METALL), distância à parede de 200 mm	0.15	0.13	0.06	0.05	0.04	0.04
idêntico, 10% perfurado, diâmetro do furo 4 mm. Cavidade vazia. Distância à parede de 200 mm	0.02	0.09	0.09	0.07	0.11	0.12
idêntico, com manta de lã de vidro de 20 mm colocada atrás	0.14	0.64	0.73	0.59	0.75	0.65
idêntico, com manta de espuma colada com 5 mm de espessura. Distância à parede de 200 mm	0.12	0.57	0.62	0.44	0.53	0.55
idêntico, com folha de alumínio colada de 0,09 mm de espessura	0.17	0.4	0.41	0.3	0.22	0.16
idêntico, com um painel de lã de vidro colado, com 10 mm de espessura, pulverizado com tinta nas duas faces. Distância à parede de 200 mm	0.14	0.67	0.87	0.69	0.83	0.7
chapa de aço com 0,63 mm de espessura, retangular, cerca de 16% perfurada, à frente de camada de 25 mm lã de vidro, parte de trás revestida com folha de alumínio. Distância à parede de 300 mm	0.5	0.58	0.56	0.7	0.69	0.64
idêntico, sem folha de alumínio	0.41	0.54	0.56	0.64	0.69	0.64
idêntico, com lã de vidro de 25 mm, envolvida em folha de alumínio. Distância à parede de 100 mm	0.35	0.54	0.56	0.7	0.69	0.67
idêntico, sem folha de alumínio	0.24	0.44	0.51	0.64	0.62	0.64
Painéis metálicos de fachada, com tecido à frente de câmara de ar de 10 mm e 2 placas revestidas por fibra mineral de 20 mm de espessura (100 kg/m ²). Distância à parede de 500 mm	0.44	0.77	0.93	0.93	0.97	0.94
telhado de chapa trapezoidal simples	0.13	-	0.15	-	0.11	-
Painéis metálicos de fachada MIKROPOR-M à frente de câmara de ar de 300 mm	0.21	0.77	0.64	0.7	0.8	0.71
idêntico, mas com acréscimo de 20 mm de fibra mineral	0.45	0.83	0.68	0.87	0.84	0.69
2 Painéis pesados de fibra mineral	125	250	500	1000	2000	4000
Painéis de 16 mm de espessura (325 kg/m ³) com superfície pintada estriada (ARMSTRONG). Distância à parede de aproximadamente 8 mm	0.12	0.25	0.83	0.87	0.64	0.52
Painéis com 16 mm de espessura idênticos, distância à parede de 400 mm	0.44	0.57	0.74	0.93	0.75	0.76
Painéis de 19 mm de espessura (350 kg/m ³) com superfície pintada semelhante a estuque listrado (ARMSTRONG). Distância à parede de cerca de 8 mm	0.08	0.23	0.79	0.93	0.88	0.86
Painéis com 19 mm de espessura idênticos, distância à parede de 400 mm	0.65	0.56	0.63	0.76	0.88	0.91

Painéis de 19 mm de espessura (350 kg/m ³) com superfície pintada semelhante a travertino (ARMSTRONG). Distância à parede de cerca de 8 mm	0.08	0.32	0.79	0.93	0.87	0.8
Painéis com 19 mm de espessura idênticos, distância à parede de 400 mm	0.53	0.49	0.57	0.82	0.9	0.83
Painéis perfurados de 15 mm de espessura (400 kg/m ³), pintados (ODENWALD MF), diretamente sobre a parede	0.03	0.15	0.51	0.83	0.86	0.64
Painéis perfurados com 15 mm de espessura idênticos, distância à parede de 200 mm	0.44	0.37	0.52	0.76	0.85	0.67

3 Tapetes de lã mineral	125	250	500	1000	2000	4000
Tapete de 40 mm de espessura (15 kg/m ²), sem cobertura de chapa perfurada	0.19	0.34	0.55	0.74	0.88	0.97
Tapete de 40 mm de espessura (15 kg/m ²), com cobertura de chapa perfurada (taxa de perfuração de 18%)	0.14	0.36	0.56	0.81	0.86	0.69
Tapete de 40 mm de espessura (20 kg/m ²), sem cobertura de chapa perfurada	0.11	0.36	0.68	0.88	0.89	0.97
Tapete de 40 mm de espessura (20 kg/m ²), com cobertura de chapa perfurada (taxa de perfuração de 18%)	0.11	0.36	0.69	0.95	0.81	0.7

4 Painéis leves de lã mineral	125	250	500	1000	2000	4000
Painéis de 12 mm de espessura (160 kg/m ³), diretamente sobre a parede	0.04	0.11	0.34	0.57	0.85	0.96
Painéis de 12 mm de espessura (160 kg/m ³), com textura de fibra áspera. Distância à parede de 50 mm	0.1	0.26	0.65	0.88	0.84	0.88
Painéis de 20 mm de espessura (130 kg/m ³), com padrão de flocos de neve pulverizado (SILLAN), diretamente sobre a parede	0.05	0.21	0.89	1.06	1.09	0.98
idêntico, distância à parede de 25 mm	0.07	0.39	0.9	1.08	1.05	1.04
quase igual ao anterior, mas com deck de PVC	0.36	0.2	0.4	0.4	0.33	-
idêntico, distância à parede de 200 mm	0.46	0.97	0.84	0.9	0.92	0.83
Painéis de 30 mm de espessura (160 kg/m ³) sob painéis corrugados de fibrocimento com amianto (7 mm de espessura)	0.51	0.7	0.95	0.79	0.79	0.76
idêntico, com painéis de 40 mm de espessura (136 kg/m ³)	0.52	0.73	0.92	0.87	0.84	0.9
idêntico, com painéis de 50 mm de espessura (120 kg/m ³)	0.52	0.86	0.97	0.89	0.88	0.84
Painéis de 15 mm de espessura (200 kg/m ³) com superfície pintada e gofrada, diretamente sobre a parede	0.04	0.15	0.44	0.74	0.85	0.94
Painel de 15 mm de espessura idênticos, distância à parede de 50 mm	0.15	0.51	0.62	0.74	0.84	1.07

1 Tijolos	125	250	500	1000	2000	4000
Tijolos perfurados 25 x 11,5 x 6,5 cm, com percentagem de perfuração de 26%, cavidades vazias. Distância à parede de 65 mm	0.15	0.37	0.55	0.42	0.75	0.59
idêntico, cavidades preenchidas com lã mineral	0.25	0.91	0.8	0.74	1.03	0.75
Tijolos perfurados, 7,1 cm de espessura, com percentagem de perfuração de 47%, cavidades vazias. Distância à parede de 50 mm	0.06	0.04	0.16	0.22	0.3	0.26
idêntico, espaços vazios preenchidos com placas de fibra mineral de 3 cm de espessura (110 kg/m ³)	0.23	0.51	0.88	0.76	0.88	0.77
Camada de tijolo perfurado, com 6,5 cm de espessura, com percentagem de perfuração média de 9%, tendo atrás de si painéis de lã de rocha de 40 mm de espessura (80 kg/m ³) e uma câmara de ar de 21 cm de espessura	0.8	0.8	0.6	0.4	-	-